



**UNIVERSIDAD NACIONAL**  
**“PEDRO RUIZ GALLO”**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS  
ALIMENTARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y GAS  
DE SÍNTESIS A PARTIR DE LA ELECTRÓLISIS  
DEL AGUA CON ENERGÍA SOLAR Y USO DEL  
CO<sub>2</sub>”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**POR**

**Bach. SOFÍA MARÍA MARTÍNEZ AMAYA**

**Bach. VÍCTOR EMMANUEL RAMÍREZ DILAS**

**Dr. PEDRO PABLO ÁNGELES CHERO  
ASESOR**

**LAMBAYEQUE  
PERU- 2017**

**“PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y GAS DE SÍNTESIS  
A PARTIR DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA CON ENERGÍA  
SOLAR Y USO DEL CO<sub>2</sub>”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**POR**

**SOFÍA MARÍA MARTÍNEZ AMAYA**

**VÍCTOR EMMANUEL RAMÍREZ DILAS**

**Sustentado y aprobado ante  
el siguiente jurado**

**Dr. Rubén Darío Sachún García**  
**Presidente**

-----

**Dr. Carlos Reinerio Arce Cruzado**  
**Secretario**

-----

**Dr. José Enrique Hernández Ore**  
**Vocal**

-----

**Dr. Pedro Pablo Ángeles Chero**  
**Asesor**

-----

## AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer en primer lugar a Dios que en todo momento estuvo acompañándonos en el desarrollo de esta investigación, por la sabiduría, la fe, el compromiso y así tener la satisfacción de ver realizados nuestros objetivos.

La realización de nuestra tesis en el tiempo de investigación ha sido de esfuerzo y dedicación, es por ello que es inevitable agradecer a todas aquellas personas que de alguna u otra manera contribuyeron en el desarrollo de ésta.

Debemos agradecer de manera especial a nuestros padres y hermanos, por brindarnos su apoyo moral y económico que ha sido de vital importancia para superar las dificultades a lo largo de este camino.

Además, con mucha sinceridad queremos agradecer al Dr. Pedro Pablo Ángeles Chero por aceptar la dirección de esta tesis, por su buena disposición con nosotros, su confianza y apoyo, que ha sido un valioso aporte para nuestro desempeño en este trabajo.

Queremos expresar también nuestro agradecimiento al técnico Don Sergio Suclupe Cruz quien partió de esta vida pero que durante el periodo de esta investigación tuvo la disposición y el apoyo para facilitarnos el uso de instrumentos y equipos de los laboratorios de nuestra facultad.

Y a la vez quisiera terminar con una frase que en particular este trabajo significó:

*“Aquellos que están lo suficientemente locos como para pensar que pueden cambiar el mundo son los que lo hacen”*

Steve Jobs.

## INDICE

AGRADECIMIENTO-----	iii
RESUMEN -----	xi
ABSTRAC-----	xiii
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN-----	1
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO-----	2
1. REALIDAD PROBLEMÁTICA-----	5
1.1. Planteamiento del problema-----	8
1.2. Formulación del problema-----	8
1.3. Hipótesis.-----	8
1.4. Justificación e importancia del estudio-----	9
1.5. Objetivos-----	9
1.5.1. Objetivo general-----	9
1.5.2. Objetivos específicos-----	9
2. MARCO TEÓRICO-----	10
2.1. Antecedentes-----	10
a. Internacionales.-----	10
b. Nacionales-----	14
c. Locales-----	15
3. HIDRÓGENO-----	15
a. Características-----	16
b. Principales usos del hidrógeno:-----	17
3.1. Producción de hidrógeno:-----	17
a. Reformación con vapor de gas natural-----	17
a.1. Oxidación parcial de hidrocarburos-----	19
a.2 Gasificación de carbón-----	20
b. Producción biotecnológica de hidrógeno-----	21
b.1 Gasificación de biomasa-----	21
b.2 Fermentación anaeróbica de biomasa-----	22
b.3 Fotoproducción de hidrógeno-----	22
3.2. Almacenamiento de Hidrogeno-----	22
a. Sistema de almacenamiento de hidrógeno a alta presión:-----	23
b. Sistema de almacenamiento de hidrógeno líquido a temperatura criogénica:	23
c. Mediante hidruros metálicos:-----	24

d.	Hidruros químicos -----	25
e.	Almacenamiento subterráneo de hidrógeno gaseoso:-----	26
4.	ANHÍDRIDO CARBÓNICO – CO <sub>2</sub> -----	26
a.	-Características-----	26
4.1.	Usos y aplicaciones del CO <sub>2</sub> en las diferentes industrias -----	29
4.2.	Tipos de Captura de CO <sub>2</sub> -----	31
a.	Precombustión. -----	31
b.	Post-combustión-----	32
c.	Oxicombustión.-----	36
4.3.	Tipos de almacenamiento de CO <sub>2</sub> -----	37
a.	Almacenamiento Geológico -----	37
5.	ELECTRÓLISIS-----	39
5.1.	Tipos de electrólisis -----	40
a.	Electrólisis alcalina -----	40
b.	Diseño monopolar o electrolizadores de célula -----	40
c.	Electrólisis de óxido sólido -----	41
6.	ENERGÍA SOLAR:-----	42
6.1.	Características: -----	42
6.2.	Tipología De La Energía Solar-----	43
6.3.	Tecnologías Que Usan Energía Solar-----	43
6.4.	Beneficios De La Energía Solar:-----	43
6.5.	Aplicaciones De La Energía Solar-----	44
6.6.	Ventajas De La Energía Solar -----	45
6.7.	Desventajas De La Energía Solar -----	45
6.8.	La energía solar hoy en día:-----	45
6.9.	Futuro De La Energía Solar:-----	46
7.	ENERGÍA ELÉCTRICA VÍA HIDROGENO -----	46
8.	PILA DE COMBUSTIBLE -----	46
8.1.	Funcionamiento de pila de combustible -----	47
8.2.	Tipos de pilas de combustible -----	48
a.	Pilas de combustible alcalinas (AFC)-----	48
b.	Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC) -----	49
c.	Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC) -----	50
d.	Pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC) -----	51
e.	Pila de combustible de óxido sólido (SOFC)-----	52

f. Pilas de combustible de conversión directa de metanol (DMFC) -----	53
8.3. Relación pila, electrolito, ventaja y desventaja -----	55
8.4. Beneficios de las pilas de combustible -----	56
9. GAS DE SÍNTESIS: -----	56
9.1. Obtención-----	56
9.2. Usos del gas de síntesis -----	57
CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN -----	59
DIAGRAMA DE PROCESO-----	60
DIAGRAMA FLUJO-----	61
1. Metodología Experimental-----	61
1.1. Diseño, construcción y proceso de neutralizador eliminador de CO <sub>2</sub> -----	61
2.1. Experimentación de permanganato de potasio: -----	62
2.2. Diseño, construcción y proceso de neutralizador de CO <sub>2</sub> -----	62
2.2.1. Diseño y construcción-----	62
2.2.2. Proceso de recuperación de CO <sub>2</sub> -----	64
a. Recuperación de CO <sub>2</sub> : -----	64
3.1. Diseño y construcción de celda electrolítica-----	65
3.1.1. Diseño de la celda electrolítica: -----	65
3.2. Realizar el proceso de electrolisis para la obtención del hidrógeno.-----	65
3.2.1. Con la celda electrolítica -----	65
3.2.2. Con el PEM ELECTROLYZER -----	66
4.1. Convertir la energía química de la electrólisis del agua en energía eléctrica utilizando el hidrógeno y una pila de combustible. -----	66
4.2. Obtener gas de síntesis (CO+H <sub>2</sub> ) a partir de hidrogeno que sale de la pila de combustible con CO <sub>2</sub> .-----	67
2. Variables -----	78
CAPÍTULO IV RESULTADOS -----	79
CAPÍTULO V DISCUSIÓN Y RECOMENDACIÓN -----	82
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES-----	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	86
APÉNDICE-----	89
ANEXOS -----	103

## INDICE DE FIGURAS

Figura 01: Tecnología de Reforma de vapor de Metano (SMR) (Foster Wheeler).....	19
Figura 02. Proceso de oxidación parcial de hidrocarburos.....	20
Figura 03. Esquema del Proceso IGCC (gasificación del carbón) .....	21
Figura 04: Diseño planta con tecnología de captura en pre combustión .....	31
Figura 05. Etapas del proceso de absorción química.....	34
Figura 06. Operación de la oxi-combustión .....	37
Figura 07: Componentes de simulación .....	67
Figura 08: Paquete de fluidos a componentes .....	68
Figura 09: Reacción para primer reactor (ERV-100) .....	68
Figura 10: Balance estequiométrico de reacción.....	69
Figura 11: Reacción para segundo reactor .....	70
Figura 12: Balance estequiométrico de segunda reacción.....	70
Figura 13: Confirmación de balance para el segundo reactor .....	71
Figura 14: Componentes con sus respectivas condiciones de almacenamiento .....	71
Figura 15: Conexión de mixer para mezcla de componentes .....	72
Figura 16: Conexión de intercambiador de calor .....	72
Figura 17: Conexión de a reactor de equilibrio ERV-100.....	73
Figura 18: Adición de primera reacción para reactor .....	73
Figura 19: Conexión de compresor .....	74
Figura 20: Conexión a segundo reactor .....	74
Figura 21: Adición de segunda reacción a reactor .....	75
Figura 22: Conexión a expansor.....	75
Figura 24: Conexión a separador flash .....	76
Figura 25: Composición del gas de síntesis.....	77
Figura 26: Condiciones de Presión y Temperatura .....	77
Figura 27: Pesado de permanganato de potasio.....	103
Figura 27: Disolución de permanganato de potasio en agua destilada.....	103
Figura 29: Enrazado de fiolas .....	104
Figura 30: Almacenamiento de permanganato de potasio en una bolleta ambar .....	104
Figura 31: Orificios a tubo de ½'' .....	105
Figura 32: Tubos de 4'' de neutralización de CO <sub>2</sub> .....	105
Figura 33: Sellado de tubos de 4'' con tapas (solo parte inferior) .....	106
Figura 34: Orificios de ½'' a tapas de tubos de 4'' .....	107
Figura 35: Conexión con niples de ½'' .....	107

Figura 36: Conexión de niples con uniones de ½"	108
Figura 37: Conexión de uniones con tubos de ½" de 10 cm	109
Figura 38: Union de codos ½" para conexión entre tapas	110
Figura 39: Conexión de tubos con llaves globos	111
Figura 40: Union al tubo de alimentacion de CO <sub>2</sub>	112
Figura 41: Colocación de abrazadera de cremallera	112
Figura 42: Equipo terminado para llevar proceso	113
Figura 43: Hermetizado de Tanque de fermentación	113
Figura 44: Vaciado de permanganato de potasio a tubo	114
Figura 45: Aseguramiento de brida con abrazadera	114
Figura 46: Comprobación de CO <sub>2</sub> por válvula de desfogue	115
Figura 47: Conexión de salida de CO <sub>2</sub> limpio a compresor	115
Figura 48: Conexión de compresor a tanque de almacenamiento	116
Figura 49: Proceso de recuperación de CO <sub>2</sub>	117
Figura 50: Control de almacenamiento de CO <sub>2</sub>	117
Figura 51: Orificios a recipiente de celda	118
Figura 52: Colocación de pernos y terminal crimpado	119
Figura 53: Orificio a tapa del recipiente de electrolisis	120
Figura 54: Conexión con mangueras	120
Figura 55: Medición de voltaje del panel solar para celda electrolítica	121
Figura 56: Llenado a recipiente	121
Figura 57: Producción de hidrogeno en celda electrolítica	122
Figura 58: Verificación de la producción de H <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> en relación de 2 a 1	123
Figura 59: Comprobación de H <sub>2</sub>	123
Figura 60: Llenado con agua destilada a PEM ELECTROLYZER	124
Figura 61: Toma de medida de voltaje para PEM Electrolyzer	125
Figura 62: Comprobación de medida de H <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> – relación 2 a 1	125
Figura 63: Verificación de la presencia de Hidrogeno	126
Figura 64: Inyección del agua destilada al PEM REVERSIBLE FUEL CELL	127
Figura 65: Instalación de PEM en carro prediseñado	127
Figura 66: Conexión de mangueras a PEM	128
Figura 67: Conexión de del panel solar al PEM	128
Figura 69: Producción de hidrogeno	129
Figura 70: Trayecto del carro con energía del hidrogeno	130
Figura 71: PEM REVERSIBLE FUEL CELL	131



Figura 72: PEM ELECTROLYZER.....	132
Figura 73: Verificación de salida de CO <sub>2</sub> de fermentador.....	133
Figura 74: Control de presión en neutralizador .....	133

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Países con mayor emisión de CO <sub>2</sub> según sus fuentes principales.....	6
Tabla 2 Principales fuentes de emisión de CO <sub>2</sub> .....	7
Tabla 3 Almacenamiento mediante hidruros .....	24
Tabla 4 Reacción en hidruros químicos .....	25
Tabla 5 Estimado de emisiones de CO <sub>2</sub> de las plantas alcoholeras de Perú.....	28
Tabla 6 Solventes más usados para la Post Combustión .....	33
Tabla 7 Relación pila, electrolito, ventajas y desventajas .....	55

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue producir  $H_2$  y gas de síntesis a partir de la electrólisis del agua con energía solar y uso del  $CO_2$ , siendo este tema una visión a futuro donde el gas Hidrogeno es generado de forma limpia, el cual ayudará a la sociedad con la necesidad energética. Los objetivos se enfocaron en convertir la energía química de la electrólisis del hidrógeno en energía eléctrica con los iones de Hidrógeno utilizando una pila de combustible de tipo PEM ELECTROLYZER.

El hidrogeno es un vector energético y como tal se perfila como la energía del futuro en la medida que produce energía eléctrica de manera limpia sin eliminar residuos contaminantes como lo hacen los combustibles fósiles. Para realizar el proceso de la electrólisis del agua se diseñó una celda electrolítica para obtener  $H_2$  y  $O_2$  utilizando energía solar como energía de activación de la celda a través del uso de un panel solar conectado a dicha celda, la cual provee de hidrógeno al PEM REVERSIBLE FULL CELL. La prueba experimental para demostrar la generación de energía eléctrica se hizo movilizand o un carro de juguete. Para ello se realizó un balance de masa desde la cantidad de  $H_2O$  utilizada en la electrólisis, la cantidad de  $H_2$  obtenido, intensidad de la celda electrolítica, hidrogeno requerido para generar 1A de corriente en una celda de combustible e intensidad de corriente y consumo de voltaje según equipo; todo ello con el fin de demostrar que en la realidad un carro puede trabajar con hidrógeno para que avance una determinada distancia.

Al realizar esta investigación se reduce la contaminación atmosférica y la emisión de los gases del efecto invernadero, esto gracias al diseño de un proceso de recuperación del  $CO_2$  de la destilería NAYLAMP, en representación de las destilerías del país, ya que son demasiadas las emisiones de este gas a nivel nacional, sin evaluar el costo que demanda producirla ni los diferentes usos en la industria que significan un beneficio económico.

El  $CO_2$  capturado trae consigo partículas de alcohol y productos secundarios, por tal motivo se realizó un cálculo de gr de  $KMnO_4$  al 1% P/V que neutralizarán la salida de este gas de los fermentadores, este pasará a ser almacenado para luego ser mezclado con el  $H_2$  obtenido del PEM REVERSIBLE FULL CELL. Por la información recopilada sabe que las condiciones del  $CO_2$  y del  $H_2$  son elevadas para llevar en escala laboratorio y se optó por realizar la simulación en el Aspen Hysys V8.0, el cual nos ayudó a demostrar

que se puede realizar la producción de gas de síntesis. Además, para ello se realizó un balance estequiométrico a partir de las cantidades de  $H_2$  producido.

La parte experimental comenzó con la recuperación del  $CO_2$  esta se realizó en la destilería NAYLAMP y los demás ensayos en el laboratorio de Química analítica y Fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Con material de PVC (Poli cloruro de vinilo) se realizó el proceso de recuperación de  $CO_2$  que se explicará posteriormente, además del uso del PEM REVERSIBLE FUEL CELL que cuenta con una pila de combustible que generó la energía eléctrica a partir del hidrógeno obtenido en la electrólisis, siendo este uno de los métodos para producir este gas, además de su producción mediante una celda electrolítica, todo esto se genera a partir del uso de energía solar, a través de un panel.

De esta manera y con el uso del PEM REVERSIBLE FULL CELL se obtuvo 0.3L de  $H_2$  a partir de 0.6 ml de  $H_2O$  destilada, para generar esa cantidad de hidrógeno se necesitó una intensidad de corriente de 0.97 A. El voltaje que se midió después de la producción de  $H_2$  es de 1.47 V y la potencia del equipo es de 210 mW. Con estos parámetros el carrito que se utilizó para demostrar la producción de energía eléctrica mediante el  $H_2$  obtenido en el proceso de electrólisis comienza a desplazarse.

## ABSTRAC

The objective of this research was to produce  $H_2$  and synthesis gas from the electrolysis of water with solar energy and use of  $CO_2$ , which is a vision of the future where hydrogen gas is generated in a clean, which will help society with the need for energy. The objectives focused on converting the chemical energy of the electrolysis of hydrogen into electrical energy with hydrogen ions using a fuel cell PEM electrolyzer.

Hydrogen is an energy carrier and as such is emerging as the energy of the future in the measure that produces electrical energy from clean way without removing pollutants as fossil fuels. To make the process of electrolysis of water was designed an electrolytic cell for  $H_2$  and  $O_2$  using solar energy as the energy of activation of the cell through the use of a solar panel connected to that cell, which provides REVERSIBLE PEM hydrogen FULL CELL. The experimental test to demonstrate the electric power generation was made by mobilizing a toy car. In order to do this, it performed a mass balance from the amount of  $H_2O$  used in the electrolysis, the amount of  $H_2$  obtained, the intensity of the electrolytic cell, the hydrogen required to generate 1A of current in a fuel cell and current and voltage consumption according to equipment; All in order to demonstrate that in reality a car can work with hydrogen to advance a certain distance.

In carrying out this research, we will reduce atmospheric pollution and the emission of greenhouse gases, thanks to the design of a  $CO_2$  recovery process from the NAYLAMP distillery, representing the country's distilleries, Gas at the national level, without evaluating the cost that demands to produce it or the different uses in the industry that mean an economic benefit.

The captured  $CO_2$  brings with it particles of alcohol and by-products. For this reason we calculate the gr of  $KMnO_4$  at 1% P / V, which will neutralize the exit of this gas from the fermentors, this will be stored and then mixed with the  $H_2$  obtained from PEM REVERSIBLE FULL CELL. From the information gathered we know that  $CO_2$  and  $H_2$  conditions are high to carry in laboratory scale and it was chosen to perform the simulation in the Aspen Hysys V8.0, which helped us to demonstrate that the gas production of synthesis. In addition to this, a stoichiometric balance was made from the amounts of  $H_2$  produced.

The experimental part began with CO<sub>2</sub> recovery this was done at the Naylamp distillery and the other tests in the laboratory of Analytical Chemistry and Physicochemistry of the Faculty of Chemical Engineering of the National University Pedro Ruiz Gallo.

The PVC recovery process will be carried out with PVC material (Polyvinyl chloride), which will be explained later, in addition to the use of PEM REVERSIBLE FULL CELL which has a fuel cell that will generate the electric energy from the hydrogen obtained in the Electrolysis, this being one of the methods to produce this gas, in addition to its production through an electrolytic cell, all this is generated from the use of solar energy, through a panel.

In this way and with the use of PEM REVERSIBLE FULL CELL obtains 0.3L of H<sub>2</sub> from 0.6 ml of distilled H<sub>2</sub>O, to generate that amount of hydrogen a current of 0.97 A is needed. The voltage that we measured after the H<sub>2</sub> production is 1.47 V and the power of the equipment is 210 mW. With these parameters the cart that we use to demonstrate the production of electrical energy through the H<sub>2</sub> obtained in the process of electrolysis begins to move.

---

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

---

La presente investigación hace referencia a la producción de energía eléctrica y gas de síntesis a partir de la electrólisis del agua con energía solar y uso del CO<sub>2</sub>; inspirados en el marco de una nueva política ambiental que considera la protección del medio ambiente y mejora la calidad del combustible, permitió desarrollar el presente trabajo de tesis a fin de encontrar la producción de energía eléctrica a partir del hidrógeno y el uso del CO<sub>2</sub> para producir gas de síntesis, este último a través del simulador ASPEN HYSYS V8.0.

El hidrógeno es el elemento más ligero de la naturaleza, así como el más abundante en el universo, totalizando más del 70%. Se encuentra en las estrellas jóvenes, en el polvo interestelar y en las enormes nubes de gas suspendidas en el espacio, pero la mayor parte de él se encuentra formando diversos compuestos químicos.

La idea de generar energía limpia partiendo de la captura de las emisiones CO<sub>2</sub> (fermentación alcohólica) mediante el proceso de electrólisis para la producción de hidrógeno nos permitirá controlar y disminuir las emisiones de dicho gas y evitar el aumento de la temperatura ambiente en el planeta que se ve reflejada en el calentamiento global.

El tema se seleccionó en base a que uno de los problemas críticos que asume nuestro planeta es la contaminación por las emisiones de CO<sub>2</sub> específicamente de las destilerías, así como otras industrias, nuestra investigación a la vez es generar energía eléctrica limpia (forma de hidrógeno) a partir de la electrólisis del agua para aliviar las condiciones energéticas del planeta, cabe resaltar que para llevar a cabo el presente se tuvo acceso a la Destilería NAYLAMP de la cual se pudo extraer el CO<sub>2</sub> de los fermentadores, como segundo paso se llevó a cabo el proceso de la electrólisis utilizando el PEM ELCTROLYSER obteniendo hidrógeno y oxígeno, luego de esto se llevó a cabo la simulación de gas de síntesis; se optó por llevarlo a cabo en un simulador ya que las condiciones de producción de este son muy elevadas que sería difícil realizarlo a micro escala.

Finalmente se desea con el desarrollo de este tema, reducir la contaminación por las emisiones de CO<sub>2</sub> y producir la energía eléctrica de manera limpia a través del uso del PEM ELCTROLYZER y la pila de combustible.



Por este motivo el resultado de este trabajo tendrá un impacto positivo debido a que será un aporte para la ciencia y tecnología siendo una ventaja, ya que proporciona una fuente de energía enormemente versátil y conserva el medio ambiente.

---

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

---

## **1. REALIDAD PROBLEMÁTICA**

La ciencia ha avanzado mucho los últimos 180 años. Hoy sabemos que el efecto invernadero es vital para el sistema climático de la tierra, en la actualidad aumenta la temperatura de nuestro planeta alrededor de 33°C. Sin ella nuestro mundo habría sido mucho más frío quizá incluso incapaz de albergar forma de vida como nosotros. Es fácil comprender que si la concentración de los gases del efecto invernadero es alterado también es alterado el efecto invernadero. Si los cambios son suficientemente grandes, este eventualmente tendrá impacto en el clima de nuestro planeta también.

Existen gases severos del efecto invernadero presente en la atmosfera. Los dos más importantes son el vapor de agua y del CO<sub>2</sub>. No se cree que las actividades humanas no influyen directamente en la concentración de vapor de agua en la atmósfera, pero ese no es el caso para el CO<sub>2</sub>. Esta establecido que nuestra forma de vivir incrementa la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmosfera rápidamente. Gracias a diferentes estudios sabemos con certeza que la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmosfera ha aumentado más del 30% desde el inicio de la revolución industrial.

Una de las fuentes productoras de CO<sub>2</sub> en nuestro país son los procesos fermentativos por lo tanto es de gran preocupación la captura de CO<sub>2</sub> y su utilización convirtiéndolo en productos no contaminantes de los gases del efecto invernadero. Otra de las grandes fuentes son las calderas que queman combustibles fósiles y generan CO<sub>2</sub> que se va al ambiente.

Bajo estas precisiones es de gran importancia mitigar la producción de CO<sub>2</sub> en estas dos grandes fuentes, poniendo en práctica nuevas formas de generar energía limpia, libre de CO<sub>2</sub>, y capturar el CO<sub>2</sub> y convertirlo en nuevos productos.

Esta es una problemática que compromete a los ingenieros que operan en las plantas industriales y/o tales que utilizan formas de combustión, en tal sentido en este estudio se plantea soluciones alternativas.

Se conoce que existe preocupación en el mundo por dar solución a este tipo de problemas como se puede ver a continuación los antecedentes:

### Antecedentes Internacionales:

Según la Oficina Meteorológica del Reino Unido (Met Office), (2017) cuyo Centro Hadley y el Instituto Scripps de Oceanografía de la Universidad de California en San Diego (Estados Unidos) han realizado un pronóstico de los niveles de concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> para 2017, basado en datos de la estación más antigua de vigilancia de los gases de efecto invernadero, situada en Mauna Loa (Hawái) y que comenzó sus observaciones en 1958.

Las emisiones globales de CO<sub>2</sub> han aumentado, por lo que la acumulación en la atmósfera es más rápida que hace 10 años. Antes del reciente fenómeno de El Niño, las concentraciones aumentaron constantemente durante algunos años en lugar de acelerarse, posiblemente debido a que las temperaturas promedio de la superficie global aumentaban más lentamente en ese momento. El aumento del dióxido de carbono atmosférico del año 2015 fue el más grande observado en el registro de 50 años de Mauna Loa y que la predicción de 2016 fue acertada porque fue el primer año en el que la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> no bajó de 400 partes por millón (ppm). Para 2017 han pronosticado un aumento de alrededor de 2.5 ppm, más pequeño que el de 3.4 ppm entre 2015 y 2016, pero es todavía una cifra superior a la media de la última década. (Richard Betts, responsable del pronóstico de CO<sub>2</sub> en Met Office, marzo 2017).

Tabla 1

Países con mayor emisión de CO<sub>2</sub> según sus fuentes principales

<b>PAISES CON MAYOR EMISIÓN DE CO<sub>2</sub></b>	<b>FUENTES DE EMISIONES</b>				
	<b>ENERGÍA</b>	<b>INDUSTRIA</b>	<b>AGRICULTURA</b>	<b>RESIDUOS</b>	<b>TOTAL</b>
<b>CHINA</b>	19.98%	3%	1.92%	0.46%	25.36%
<b>EE.UU</b>	12.62%	0.59%	0.82%	0.38%	14.40%
<b>UNIÓN EUROPEA 28</b>	8.39%	0.51%	0.94%	0.33%	10.16%
<b>INDIA</b>	4.91%	0.39%	1.52%	0.14%	6.96%
<b>RUSIA</b>	4.82%	0.16%	0.21%	0.17%	5.36%
<b>JAPON</b>	2.85%	0.19%	0.06%	0.01%	3.11%
<b>BRASIL</b>	1.09%	0.12%	1.03%	0.10%	2.34%
<b>INDONESIA</b>	1.20%	0.03%	0.38%	0.15%	1.76%
<b>MEXICO</b>	1.13%	0.09%	0.19%	0.25%	1.67%
<b>IRAN</b>	1.43%	0.08%	0.10%	0.04%	1.65%

Fuente: [www.wri.org/blog/2015/06/infographic-what-do-your-countrys-emissions-look](http://www.wri.org/blog/2015/06/infographic-what-do-your-countrys-emissions-look)

## Nacionales:

Según Freitas, G., (2014) coordinador ejecutivo Programa Nacional de Conservación de Bosques del Ministerio del Ambiente (MINAM). Menciona que el Perú emite cada día a la atmósfera 380 000 toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), lo que equivale a 138 millones de toneladas por año, contribuyendo así a tener mayor calentamiento global. Como consecuencia, la reducción de glaciares, elevamiento del nivel del mar, expansión de enfermedades tropicales, afectación de cultivos y mayor intensidad y frecuencia de eventos climáticos como El Niño.

En el diagrama siguiente se explica de donde proviene las emisiones de CO<sub>2</sub>

Tabla 2  
Principales fuentes de emisión de CO<sub>2</sub>

PRINCIPALES FUENTES DE EMISIÓN DE CO <sub>2</sub>	Porcentaje de emisión
Uso de suelo, cambio del uso del suelo y silvicultura	51%
Energía	26%
Agricultura	15%
Desechos	5%
Procesos industriales	3%

Fuente: MINAM “El Perú y el cambio climático” – Tercera Comunicación Nacional del Perú

La principal fuente de emisiones de GEI a nivel nacional, se encuentra en la categoría Uso del Suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura (USCUSS), con 86 742 Gg CO<sub>2</sub>eq, que representa el 51 % del INGEI 2012. Dentro de esta categoría, la principal fuente de emisiones es la Conversión de Bosques y Pasturas, con 79 772 Gg CO<sub>2</sub>eq. Esta categoría también considera las únicas fuentes que contribuyen como sumideros de GEI de la atmósfera: Cambios en Biomasa Forestal y Otros Stocks Leñosos, con una captura de 3 923 Gg CO<sub>2</sub>eq (donde se incluye: Incremento de biomasa y Cultivos perennes) y Abandono de Tierras Cultivadas, con una captura de 12 301 Gg CO<sub>2</sub>eq, derivada del incremento de biomasa principalmente por la natural formación de bosques secundarios. La segunda categoría con mayores emisiones de GEI reportadas fue Energía, con 44 638 Gg CO<sub>2</sub>eq, que representan el 26 % del INGEI 2012. Dentro de esta categoría, destaca la fuente de emisión generada por la combustión de combustibles en el sector Transporte, con 17 847 Gg CO<sub>2</sub>eq. Agricultura es la tercera categoría con emisiones más altas reportadas: 26 044 Gg CO<sub>2</sub>eq, que representan el 15 % del INGEI 2012. Las emisiones generadas por la fuente Suelos Agrícolas son las mayores, con 12 196 Gg CO<sub>2</sub>eq; le sigue la fuente Fermentación Entérica, con 10 735 Gg CO<sub>2</sub>eq. Las tres categorías descritas previamente representan alrededor de 92 %

del total de las emisiones de GEI en el Perú, La cuarta y quinta categoría de contribución de emisiones de GEI están representadas, respectivamente, por Desechos con 7 823 Gg CO<sub>2</sub>eq, equivalente a casi el 5 % del INGEI (Inventario Nacional de gases del Efecto Invernadero) 2012, cuya fuente principal de emisiones proviene de la descomposición de la materia orgánica de los residuos sólidos; y por Procesos Industriales, con 6064 Gg CO<sub>2</sub>eq, equivalente aproximadamente al 3 %. En esta categoría destacan las emisiones generadas en los procesos industriales de los productos minerales. (MINAM (2017). EL PERU Y EL CAMBIO CLIMATICO. LIMA: MINISTERIO DE AMBIENTE).

### **1.1. Planteamiento del problema**

Ante la problemática descrita se plantea para la tecnología de producción de H<sub>2</sub> vía electrólisis del agua y generación de electricidad (energía limpia); utilizando energía solar como energía renovable y de reducido costo para producir la electrólisis.

La producción de hidrógeno además de producir electricidad, se mezcla con O<sub>2</sub> para obtener agua nuevamente; sin embargo, se puede utilizar para hacerlo reaccionar con CO<sub>2</sub> y producir combustible como el gas de síntesis, el metano, o también producir metanol. Con este proceso se estará mitigando la cantidad de CO<sub>2</sub> que va al ambiente.

El CO<sub>2</sub> utilizado será captura de la corriente de Anhídrido Carbónico que eliminan los fermentadores de la planta de alcohol NAYLAMP como muestra para el experimento.

### **1.2. Formulación del problema**

¿Se puede generar energía eléctrica y gas de síntesis a partir de la electrólisis del agua con energía solar, y uso del CO<sub>2</sub>?

### **1.3. Hipótesis.**

Con el H<sub>2</sub> de la electrólisis del agua con energía solar, se puede generar energía eléctrica y producir gas de síntesis utilizando CO<sub>2</sub>.

#### **1.4. Justificación e importancia del estudio**

El desarrollo de este trabajo de investigación es importante ya que este tipo de tecnología es la que permite que, a partir de recursos renovables como el agua y la biomasa, podamos obtener energía limpia y a su vez disminuir el grado de emisiones de CO<sub>2</sub>; mediante la producción de Hidrógeno. Esta investigación inicia con la captura de CO<sub>2</sub> la cual proviene de la fermentación alcohólica, para luego ser utilizada en el proceso de electrólisis donde se libera en forma de gas hidrógeno y oxígeno, sin producir ninguna emisión, por esto es que el hidrógeno se considera como vector energético, siendo uno de sus usos una buena opción para producir energía reducir las emisiones ambientales.

La idea de generar energía limpia partiendo de la captura de las emisiones CO<sub>2</sub> (fermentación alcohólica) mediante el proceso de electrólisis para la producción de hidrógeno nos permitirá controlar y disminuir las emisiones de dicho gas y evitar el aumento de la temperatura ambiente en el planeta que se ve reflejada en el calentamiento global. Por este motivo el resultado de este trabajo tendrá un impacto positivo debido a que será un aporte para la ciencia y tecnología siendo una ventaja, ya que proporciona una fuente de energía enormemente versátil y conserva el medio ambiente.

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. Objetivo general**

- Producir H<sub>2</sub> y gas de síntesis a partir de la electrolisis del agua con energía solar, y uso de CO<sub>2</sub>

##### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Diseñar el proceso de captura de CO<sub>2</sub> de la planta de alcohol NAYLAMP
- Diseñar y construir una celda electrolítica.
- Realizar el proceso de electrólisis para la obtención del hidrógeno.
- Convertir la energía química de la electrólisis del agua en energía eléctrica utilizando el hidrógeno y una pila de combustible.
- Obtener gas de síntesis (CO+H<sub>2</sub>) a través de la simulación con el ASPEN HYSYS V8.0.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### a. Internacionales.

- En España, Herradón C., (2014) realizó un estudio de: “Producción de Hidrógeno a partir de Energía Solar Concentrada Mediante el Ciclo Termoquímico  $\text{Mn}_2\text{O}_3/\text{MnO}$ ”. En este estudio resalta que el hidrógeno se presenta como un vector energético muy prometedor, sin embargo, los métodos actuales de producción de hidrógeno basados en energías renovables son muy costosos y no están suficientemente desarrollados. Como consecuencia, algunas valoraciones de su potencial han centrado la atención en su producción, considerándolo un aspecto crucial para su desarrollo. Por todo ello, la posibilidad de obtener hidrógeno a partir de procesos como la termólisis del agua, en la que únicamente se produce  $\text{H}_2$  y  $\text{O}_2$ , está cobrando cada vez mayor importancia. El inconveniente de este método son las elevadas temperaturas necesarias para llevar a cabo la reacción de disociación del agua por lo que, las investigaciones se centran, especialmente, en ciclos termoquímicos de múltiples etapas basados en óxidos metálicos que permiten trabajar a temperaturas más bajas y cuyo resultado neto es el mismo que en la termólisis directa del agua.

Así, su trabajo surge de la necesidad de obtener datos realistas de temperatura de reacción de los distintos ciclos termoquímicos debido a las discrepancias encontradas en bibliografía, para realizar un posterior estudio en detalle del ciclo seleccionado. En este sentido, esta tesis forma parte de un trabajo más amplio desarrollado conjuntamente, en materia de ciclos termoquímico.

- En España, Villa, K., (2013) ha desarrollado el: “Estudio de la Producción de Hidrógeno Mediante Fotocatálisis Heterogénea”. En la cual nos menciona la importancia de este tipo de tecnología es que permite, a partir de recursos renovables como la luz solar y la biomasa, obtener energías limpias y a su vez disminuir el grado de contaminación de las aguas empleadas. En este sentido, se han examinado los siguientes sistemas fotocatalíticos con vistas a mejorar la eficiencia fotocatalítica a nivel de laboratorio:  $\text{TiO}_2$  dopado con nitrógeno, un composite formado por  $\text{CdS}$  y  $\text{WO}_3$  y, por último, un composite de  $\text{CdS}$  y  $\text{ZnS}$ . Posteriormente, las configuraciones que han mostrado una mejor eficiencia fueron



probadas a escala de planta piloto. Asimismo, se han utilizado distintas técnicas de caracterización para determinar las propiedades físico-químicas de los materiales preparados, tales como análisis elemental, estructural, textural, óptico, superficial y morfológico. Con la información obtenida en los estudios de caracterización se ha intentado establecer una correlación entre las propiedades de los catalizadores y la actividad fotocatalítica observada en los experimentos de generación de  $H_2$ .

En general, se evidenció que fue posible llevar a cabo, simultáneamente, la generación fotocatalítica de  $H_2$  y la mineralización parcial de ácido fórmico y agua residual municipal real. La mayor eficiencia fotocatalítica, bajo irradiación visible, se obtuvo con el composite de Pt/(CdS/ZnS) (composite obtenido a partir de la precipitación de CdS sobre partículas de ZnS con posterior platinización) para las siguientes condiciones experimentales optimizadas: razón molar de CdS:ZnS 1:1, temperatura de sinterización  $700^{\circ}C$ ,  $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de catalizador, ácido fórmico 0.05 M, y pH 3.75.

- En Argentina, Faroldi, B., (2012) realizó un estudio de: “Desarrollo y optimización de catalizadores de Ru para la obtención de hidrógeno de alta pureza en reactores de membrana a partir de gas natural”. Resaltando que: El reformado seco de metano ha cobrado importancia en los últimos años como medio de obtención de  $H_2$  de alta pureza. Con el objetivo de reducir el consumo energético y aumentar la producción de hidrógeno, se ha propuesto acoplar el reformado con dióxido de carbono (endotérmico) y la oxidación parcial (exotérmico). Este proceso que podría ser autotérmico confiere un valor agregado fundamental a dichas reacciones en estudio. Actualmente se busca desarrollar un catalizador de menor costo que posea alta actividad y alta resistencia a la deposición de carbón, garantizando así un sistema estable.

En su Tesis se estudiaron catalizadores de Ru soportados sobre distintos sustratos con el objetivo de aumentar y optimizar la superficie específica y dispersión metálica, para aplicarlos en reactores de membrana (RM) para la producción de hidrógeno. Como soportes se investigaron sistemas binarios  $La_2O_3-SiO_2$ , oxocarbonatos de lantano ( $La_2O_2CO_3$ ) y titanosilicatos ETS-10. Los catalizadores

de Ru en una primera etapa, se evaluaron en un reactor convencional de lecho fijo operando en condiciones diferenciales.

En los sistemas binarios de  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  se prepararon soportes con diferentes contenidos de  $\text{La}_2\text{O}_3$ . A dichos sólidos se incorporó Ru, mediante impregnación a humedad incipiente. Los catalizadores se evaluaron catalíticamente después de distintos tratamientos térmicos y atmósferas. Se observó la formación del disilicato de lantano, el cual es un compuesto de alta estabilidad. Mediante el empleo combinado de técnicas de caracterización se logró caracterizar las especies activas de Ru. Con estas evidencias se propusieron modelos representativos de los catalizadores con diferentes contenidos de Lantano. Por otra parte, se sintetizó una fase de oxicarbonato de lantano ( $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ ) de alta superficie específica. Se estudió el efecto del método de secado y de la incorporación de Ru en la actividad catalítica y estabilidad. En los soportes sintetizados está presente la fase de  $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ -tipo Ia que no se modifica al incorporarle el metal activo. Sin embargo, en los catalizadores usados en reformado combinado se detectó la presencia de la fase de  $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ -tipo II. Debido a la reactividad de las especies de lantano se llevaron a cabo estudios de Raman in situ exponiendo a los catalizadores a las diferentes atmósferas de reacción. Se completó el estudio mediante quimisorción de CO, reducción a temperatura programada y XPS.

En tercer lugar, se estudió el titanosilicato ETS-10 como sustrato ya que posee propiedades adecuadas para dispersar fases de Ru. Se han seguido diferentes alternativas de incorporación de rutenio: impregnación a humedad incipiente (RuH), intercambio iónico (RuI) y en el gel de síntesis (RuG). Además, se estudió el efecto del tiempo de síntesis en la superficie específica y el volumen de poros de los soportes.

Mediante microscopia electrónica de barrido y transmisión se observó la morfología, tamaño y distribución de las partículas de Ru en los soportes. Se complementó la caracterización utilizando otras técnicas, tales como ICP, TGA, TPR, UV-Vis y XPS. Los catalizadores RuH y RuI fueron activos y estables para la reacción de reformado seco de metano. Estos resultados muestran la potencial aplicación de estos sólidos como soporte en catalizadores de Ru para la producción de  $\text{H}_2$ .

Finalmente, las mejores preparaciones obtenidas se ensayaron en RM de Pd-Ag para el reformado seco y combinado de metano. Se estudió el comportamiento de un catalizador en RM contruidos con dos membranas diferentes. Además, se analizó el efecto del área de permeación y de la relación de reactivos en función del caudal del gas de arrastre. Para ambos sólidos, se utilizaron distintas composiciones de la mezcla de alimentación con y sin  $O_2$ , buscando aumentar la conversión de metano y favorecer la producción de  $H_2$ . Se analizaron distintos parámetros que permiten caracterizar el funcionamiento de los reactores de membrana (recuperación de  $H_2$  y  $H_2$  permeado/ $CH_4$  alimentado). Se observaron comportamientos diferentes para cada sólido para las diferentes reacciones y relaciones de reactivos estudiadas.

- En Suecia, Rydén, M., (2008) Desarrollo estudio de: “Hydrogen production from fossil fuels with carbon dioxide capture, using chemical-looping technologies”, En el cual nos menciona: La captura y almacenamiento de carbono han recibido últimamente un creciente interés, principalmente como una opción para reducir las emisiones de  $CO_2$  del sector eléctrico. El concepto podría ser adaptada para la producción de  $H_2$ , lo cual proporcionaría un portador de energía libre de carbono que podría utilizarse por ejemplo como combustible para el transporte. En esta tesis doctoral, la opción para utilizar las tecnologías de bucle de química para producir  $H_2$  a partir de combustibles fósiles con captura de  $CO_2$  es explorada.

El circuito químico de combustión, el contacto directo entre el combustible y el aire de combustión es evitada. En su lugar, un transportador de oxígeno sólidos realiza la tarea de llevar el oxígeno del aire al combustible. Por tanto, las consiguientes emisiones de  $CO_2$  y  $H_2O$  no se diluye con  $N_2$  y  $CO_2$  puro puede ser recuperado fácilmente por enfriamiento y condensación. El calor de reacción es la misma que para la combustión ordinaria. El circuito químico utiliza los mismos principios básicos de química de combustión en bucle, pero el oxígeno opera en condiciones no diluidas.

Dos ideas principales han sido exploradas. Steam Reforming (Reformado de vapor) integrado con combustión de bucle de química significa que la combustión de bucle de química se utiliza para la captura de  $CO_2$  y como fuente de calor para generación de  $H_2$  a través de la reacción endotérmica Steam Reforming. Bucle de

química utiliza understoichiometric autothermal reformar las condiciones y la posibilidad de añadir algunos  $H_2O$  para el combustible, con el fin de tener tanto la oxidación parcial y Steam Reforming reacciones que se producen en la misma vasija del reactor. De esta forma, un proceso neutral de thermo es obtenida. Se comprobó que ambas opciones tienen potencial para proporcionar ventajas sustanciales en comparación con las tecnologías convencional. Modelado termodinámico muestra ese reformador eficiencias del 80% o superior, incluyendo la captura de  $CO_2$ , compresión parecen obtenerse con ambos procesos. En la parte experimental, química de bucle de reformar y combustión de bucle de química ha sido demostrada en dos diferentes que circulan de reactores de lecho fluidizado. En total, más de 200 horas de experimentos han sido grabadas. El gas natural se utiliza como combustible, y cuatro diferentes materiales basados en NiO se han utilizado como transportador de Oxígeno. Condiciones de proceso han variado desde casi una combustión completa en  $CO_2$  y  $H_2O$ , a casi estequiométricas de oxidación parcial en CO y  $H_2$ . La temperatura del reactor ha sido de entre 800 y 950°C. Los experimentos funcionaron muy bien, pero ocasionalmente una formación limitada de carbono sólido podría ocurrir en el reactor. Agregar 25-30%  $H_2O$  o  $CO_2$  para el gas natural redujo esta tendencia significativamente.

#### **b. Nacionales**

- En Lima, Terrones, H., (2007) estudió la: “Integración de la producción de hidrógeno a partir del gas natural a la matriz energética nacional”, En este trabajo de tesis se analiza las características del Hidrógeno y sus aplicaciones industriales identificándose su uso en la industria química del petróleo, a fin de gestar la idea de su utilización en la desulfurización del Diésel, para más adelante conocer las fuentes de generación de Hidrógeno e igualmente identificar al Gas Natural como potencial fuente de hidrógeno en el Perú, además se muestra los procesos asociados a la producción industrial de hidrógeno, concluyéndose que lo más adecuado, debido a la materia prima que se pretende emplear, es el uso de Reformado con Vapor; que consiste en el reformado catalítico del Gas Natural junto a una mezcla de vapor de agua en un reformador primario para continuar por un proceso de conversión del hidrógeno crudo y finalmente la purificación del producto; a partir de lo cual se analiza las tecnologías existentes para la

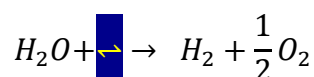
producción de hidrógeno a fin de conocer las ventajas que cada una de estas ofrece.

### c. Locales

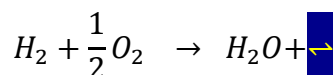
- No se encontraron antecedentes locales

## 3. HIDRÓGENO

En una breve historia sobre el hidrógeno hablamos de Sir Willian Robert Grove (1811-1896) quien fue el primero en darse cuenta de las posibilidades energéticas del hidrogeno, este con tan solo diecinueve años ideó una batería eléctrica con la que fue posible la implementación del telégrafo en el Reino Unido. Pero su relación con el hidrogeno tuvo su escenario en 1939 y 1842 cuando ideó su “batería de gas” poco después de que el científico Suizo Christian Friedrich Schonbein (1777-1868) el descubridor del Ozono, descubriera en 1838 que el hidrógeno y el oxígeno podían combinarse para formar el agua y electricidad. la batería de Grove se basó en pasar una corriente a través del agua, y esta se descomponía en sus elementos constituyentes es decir en hidrógeno y oxígeno; siendo esto lo que llamamos electrólisis del agua y que fue descubierta tan solo unos años antes en 1800 por William Nicholson (1753-1815) y Anthony Carlisle (1768-1842):



Lo que hizo Grove fue trabajar en una batería en la que tuviera lugar el proceso inverso, es decir en que el hidrógeno y el oxígeno gaseoso se recombinaran para formar agua y generar electricidad.



Siendo esta reacción la base de las pilas de combustible, aunque el nombre de pila de combustible lo acuño Ludwing Mond (1939-1909), quien intento desarrollar en 1889, junto a su colaborador Charles Langer, un dispositivo a gran escala que funcionara con aire y gas de síntesis (una mezcla de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO)). (Jordi Lorca, 2010).

El elemento más abundante del universo, constituye el 75 por ciento de la masa del universo, raramente se encuentra en estado libre y aislado, como si sucede con el carbón, el petróleo y el gas natural, todas estas fuentes energéticas nombradas son vectores energéticos, aunque se pueden considerar que fueron previamente “cargados” por la naturaleza, en un proceso que requirió de ciertas condiciones de presión y temperatura, además de un tiempo considerable para su creación.

El hidrógeno, por otra parte, es un vehículo de la energía, una forma secundaria de energía que antes tiene que ser producida, como la electricidad pero que, a diferencia de esta, se puede almacenar. Si bien desde el punto de vista energético, entre todos los combustibles el hidrógeno es el que posee la máxima relación energía/peso, la relación energía/volumen es baja, dado que la densidad del hidrógeno como gas di-atómico en condiciones normales de presión y temperatura es de 0.0898 [g/L]. Esto significa que 1 kilogramo de hidrógeno en condiciones ambientales ocupa 11.135 [m<sup>3</sup>]. (MARTINS et al, 2008).

#### a. **Características**

Las principales características son:

##### ➤ **Propiedades químicas**

- Símbolo químico	H
- Número atómico	1
- Grupo	1
- Periodo	1
- Aspecto	incoloro
- Densidad	0.0899 kg/m <sup>3</sup>
- Estados de oxidación	1, -1

##### ➤ **Propiedades físicas**

- Estado	gaseoso
- Punto de fusión	14.025 °K
- Punto de ebullición	20.268 °K
- Punto de inflamabilidad	255 °K
- Presión de vapor	209 Pa a 23 °K
- Presión crítica	1,293·10 <sup>6</sup> Pa
- Calor específico	1,4304·10 <sup>4</sup> J/(°K·kg)

## **b. Principales usos del hidrógeno:**

Las principales fuentes de hidrogeno en los diferentes aspectos industriales tenemos:

### ➤ Aeroespacial y Aeronáutica

Sirve de fuente de energía, el gas hidrógeno como combustible es utilizado para cohetes y a la vez como fuente de energía de sistemas de mantenimiento de vida y computadoras en ambientes espaciales en las diferentes naves.

### ➤ Automotriz y equipos de transporte

Como horno con tratamiento térmico, el gas hidrógeno reacciona con oxígeno para funcionar como pulidor en acabado brillante de piezas de acero. También funciona como un excelente gas industrial de enfriamiento y también como un combustible alternativo, el hidrógeno juega un papel clave al reducir las emisiones no deseadas.

### ➤ Energía

El gas hidrógeno se utiliza para propulsar cualquier tipo de vehículo los mismos que rompen récords y estos mismos ayudan al transporte para pasajeros, autobuses y montacargas que funcionan con pilas de combustible.

### ➤ Refinería

El gas hidrógeno es esencial para la transformación de petróleos crudos pesados a combustible refinado, y para ayudar a que las características del combustible de transporte sean cada vez más ajustadas.

### ➤ Soldadura y metalmecánica

Es utilizado para las operaciones de soldaduras y cortes por plasma; el gas de hidrógeno comúnmente se mezcla con el argón para soldar acero inoxidable.

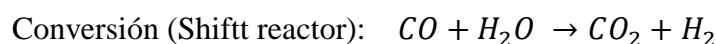
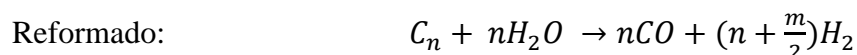
## **3.1.Producción de hidrógeno:**

### **a. Reformación con vapor de gas natural**

Actualmente, el reformado de gas natural es el proceso más importante y el más comúnmente usado para la producción de hidrógeno. Es un proceso endotérmico y catalítico llevado a cabo en un rango de temperaturas de entre 970- 1100 °K. y una presión sobre los 3,5 MPa. Los catalizadores usados en este proceso son de Níquel soportado. Respecto a las materias primas utilizadas, comúnmente los combustibles fósiles más apropiados son aquellos con una razón Hidrógeno/Oxígeno alta. Generalmente, la principal materia prima utilizada es gas natural, de ahí el nombre

que lleva este proceso, sin embargo, también pueden utilizarse alimentaciones de hidrocarburos pesados como el Nafta. Una cantidad significativa del vapor producido no es requerido en el proceso por lo cual parte importante es llevado a producir energía eléctrica que puede ser utilizada en otras instalaciones del proceso, esto último, hace de las plantas de reformado de gas un proceso bastante eficiente. (Evaluación Técnico Económica de una Planta de Producción de Hidrógeno Mediante Electrólisis de Agua Utilizando Energía Eléctrica Producida con Celdas Fotovoltaicas de Alta Eficiencia, Santiago de Chile, Marzo 2009)

El proceso se lleva a cabo en dos etapas:



Una gran desventaja del proceso de reformado de gas natural es que la producción de hidrógeno está acompañada de grandes cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, esto debido a que el proceso libera este compuesto y además a que se requiere de combustibles fósiles para satisfacer los requerimientos energéticos del mismo proceso.

Este proceso requiere además de realizar la reformación del gas natural, una remoción de los altos contenidos de azufre y otras impurezas del combustible. Además, una vez realizada la reformación del gas se precisa de una limpieza del gas cuando los requerimientos de pureza del hidrógeno son altos. (Evaluación Técnico Económica de una Planta de Producción de Hidrógeno Mediante Electrólisis de Agua Utilizando Energía Eléctrica Producida con Celdas Fotovoltaicas de Alta Eficiencia, Santiago de Chile, Marzo 2009)



A continuación, se muestra el diagrama de flujo del proceso de reformado de gas natural

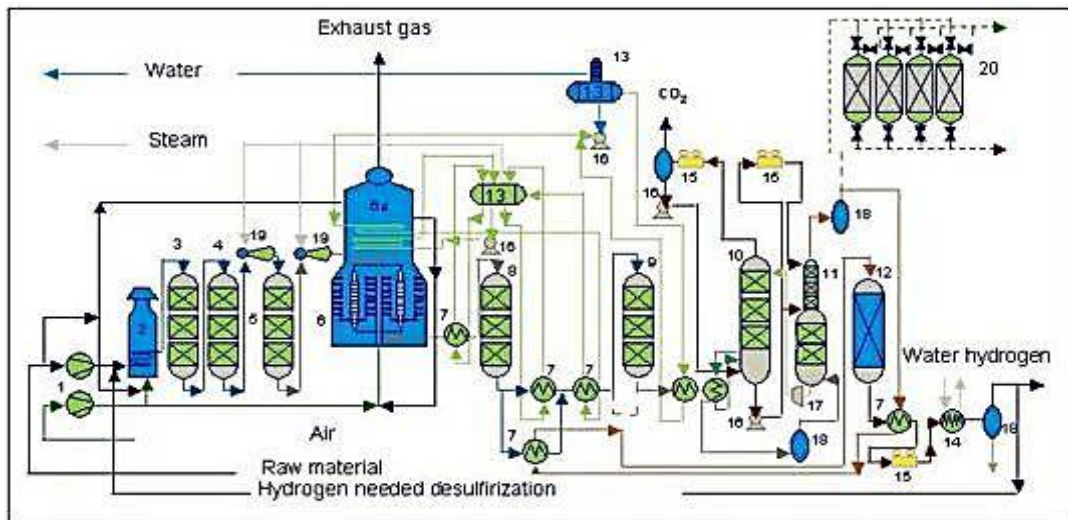
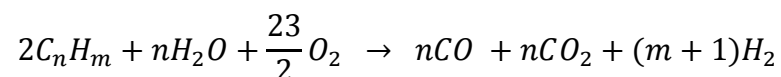


Figura 01: Tecnología de Reforma de vapor de Metano (SMR) (Foster Wheeler)

Fuente: Roads2HyCom

### a.1. Oxidación parcial de hidrocarburos

La oxidación parcial de hidrocarburos es una reacción capaz de expulsar grandes cantidades de energía es decir es exotérmica teniendo los componentes como el oxígeno y vapor a presiones moderadamente altas. Dependiendo al tipo de alimentación que se lleve este proceso es factible que se pueda o no utilizar catalizadores para que se pueda llevar el proceso. La oxidación parcial de hidrocarburos es el segundo proceso en importancia para la producción de hidrógeno (figura 2) y requiere de cualquier tipo de combustible fósil tanto en estado líquido o gaseoso. Siendo esta última característica la más adecuada para procesar alimentaciones con altos contenidos de azufre teniendo como fuentes al petróleo residual y compuestos con alto peso molecular, los cuales no pueden ser tratados mediante reformado de gas. La reacción básica de oxidación parcial de hidrocarburos pesados es la siguiente:



La gran desventaja de este proceso es el alto contenido de emisiones de monóxido de carbono (CO) que emite junto con el CO<sub>2</sub>. (Sistema de energía del hidrógeno Fernández, C.,2010).

En la figura 2 se muestra un diagrama de flujos del proceso de oxidación parcial de hidrocarburos:

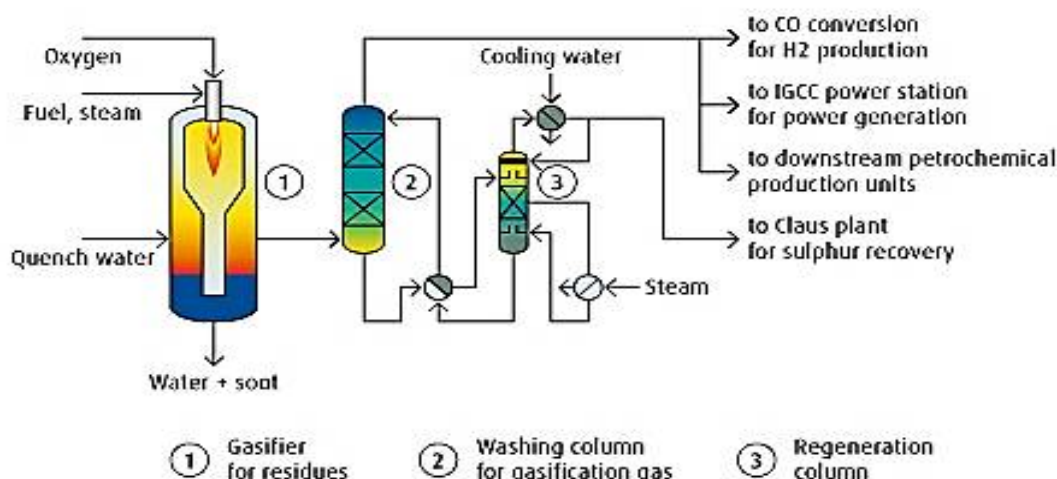
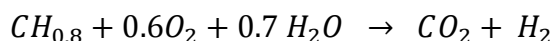


Figura 02. Proceso de oxidación parcial de hidrocarburos

Fuente: abellolinde.com

## a.2 Gasificación de carbón

Este proceso es muy similar al de oxidación parcial de hidrocarburos pesados. La reacción básica es la siguiente:



Al igual que los procesos anteriores las emisiones de CO<sub>2</sub> son considerables. La producción de hidrogeno a partir de gasificación de carbón es llevada a cabo mediante 2 métodos:

- Proceso del gas de síntesis
- Proceso con secuestro de CO<sub>2</sub>

Cuando el CO<sub>2</sub> reacciona con vapor a 450 PSI. y 1073 - 1173 °K los productos gaseosos son CO, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, además de una pequeña cantidad de metano. El metano llega a ser el producto mayoritario cuando la presión es incrementada por sobre las 1000 psi. El dióxido de carbono es removido de la corriente de gases mediante un lavado con monometanoamina o hidróxido de potasio. El producto final contiene tan solo entre un 97-98% de pureza.

En la figura 3 se muestra un diagrama de flujos del proceso de gasificación de carbón.

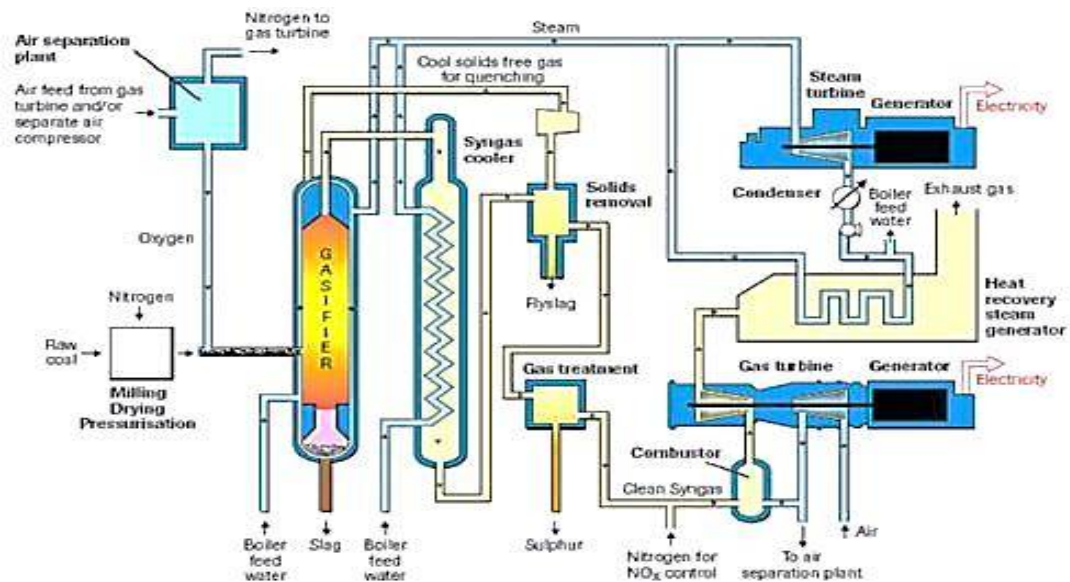


Figura 03. Esquema del Proceso IGCC (gasificación del carbón)  
Fuente; Roads2HyCom

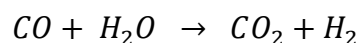
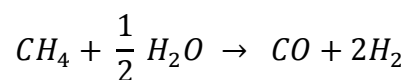
## b. Producción biotecnológica de hidrógeno

Existe diversos tipos de producción biotecnológica de hidrógeno, a continuación, se hace un breve resumen de éstos:

### b.1 Gasificación de biomasa

La biomasa es una sustancia de los seres vivos la cual está en su totalidad de los animales o plantas. A la misma vez la constituyen elementos de la silvicultura, agricultura, excremento de animales, etc. Este proceso análogo a la gasificación de carbón, se realiza cuando la humedad de ésta es menor al 20%. Básicamente la única diferencia está dada por la materia prima. Mediante la gasificación de biomasa se obtiene una corriente gaseosa de CO y H<sub>2</sub> que debe ser tratado en un reactor tubular (Shiff reactor) similar al del proceso de reformado de gas natural. (Producción de H<sub>2</sub> con captura de CO<sub>2</sub> por reformado de CH<sub>4</sub> integrado con un sistema Chemical-Looping Combustion Pans M., España 2013).

Las reacciones involucradas en este proceso son las siguientes:



## **b.2 Fermentación anaeróbica de biomasa**

La fermentación anaeróbica de biomasa se realiza cuando la humedad de ésta supera el 30%. El gas generado por bacterias que digieren la materia orgánica en ausencia de oxígeno está compuesto principalmente por metano, Este gas, producido a través de dichas bacterias puede ser transformado a hidrógeno mediante algún proceso de reformado de gas o bien vía oxidación parcial de hidrocarburos.

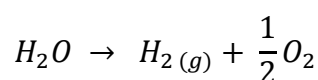
## **b.3 Fotoproducción de hidrógeno**

Existen diversos métodos de producción de hidrógeno mediante fotoproducción, los cuales se basan en la absorción de luz solar para producir energía en electricidad o bien almacenarla a través de un proceso endergónico

Dentro de esta categoría existen los siguientes procesos:

### ***Procesos fotoquímicos***

Se basan en una reacción de hidrólisis:



El agua pura es absorbida en el rango infrarrojo. Donde la energía de los fotones es insuficiente para producir la hidrólisis. Por lo cual se agrega alguna molécula o semiconductor capaz de absorber en otra región del espectro electromagnético para llevar a cabo la reacción.

### ***Procesos fotobiológicos***

Consiste en producir hidrógeno mediante algas o microorganismo que sean capaz de sintetizarlo, para esto es necesario inducir ciertas condiciones en el ambiente del microorganismo que permitan activar la vía metabólica de producción de hidrógeno. Como ejemplo las algas verdes son capaces de producirlo después de haber sido sometidas a condiciones de anaerobiosis y oscuridad, donde se induce la síntesis mediante activación de la hidrogenasa.

## **3.2.Almacenamiento de Hidrogeno**

En la actualidad, existen diversos métodos para almacenar hidrógeno según Enric Junyent Guinart de la Facultad Náutica de Barcelona nos dice que es una forma muy efectiva. A continuación, se expondrán algunos de estos métodos

#### **a. Sistema de almacenamiento de hidrógeno a alta presión:**

En este tipo de almacenamiento, el gas se comprime a altas presiones, en un rango que oscila entre los 200 y los 700 bar. Como es de imaginar, los tanques capaces de aguantar dichas presiones son muy costosos, debido a la gruesa pared de contención, la cual añade peso muerto y en caso de sistemas no estacionarios puede no ser la solución más rentable.

Este tipo de tanques, se han usado en la industria naval en el transporte de gas metano a alta presión y temperatura ambiente con gran éxito. El problema, es que el hidrógeno tiene una tasa de permeabilidad mucho más elevada que el metano, y se escapa a través de las paredes de los tanques, reduciendo gradualmente la presión en el interior del tanque y pudiendo debilitar las paredes de contención (Facultad Nautica de Barcelona, Enric Junyent Guinart, 2011)

#### **b. Sistema de almacenamiento de hidrógeno líquido a temperatura criogénica:**

Este sistema consiste en conseguir bajar la temperatura del hidrógeno en forma gaseosa hasta los 20 °K aproximadamente, momento en el cual se produce la condensación del gas a una presión de una atmósfera. La mínima temperatura necesaria para conseguir licuar el hidrógeno es de 33 °K, pero se necesita una presión mínima de 13 bar, lo cual puede encarecer el diseño de la instalación.

La contención del producto a estas temperaturas tan extremadamente bajas, se consigue gracias a unos recipientes aislados por vacío, llamados frascos Dewar, o bien mediante tanques de doble capa, los cuales mantienen otro fluido refrigerante a temperatura criogénica en la capa externa como puede ser nitrógeno líquido, para reducir así el intercambio de calor con el exterior. También es posible que, para aumentar el rendimiento del almacenamiento, se mezclen las dos capas, encontrando así el hidrógeno líquido en la parte interior del tanque, a continuación, un espacio para un fluido refrigerante a temperatura criogénica para mantener a una temperatura adecuada el hidrógeno, y a continuación, un espacio en el cual se cree el vacío, el cual reduce al mínimo la transmisión de calor por convección y conducción. El tanque, por la parte exterior puede estar aislado con material reflectante, normalmente plástico aluminado Mylar para eliminar así el intercambio de calor por radiación entre el tanque y el medio. Otra alternativa más barata al plástico Mylar es

la perlita (silicona coloidal) situada entre las paredes del tanque. (Facultad Nautica de Barcelona, Enric Junyent Guinart, 2011)

### c. Mediante hidruros metálicos:

El almacenamiento mediante hidruros se divide en tres tipos: iónico, metálico o covalentes. El principio de funcionamiento es el siguiente. Inicialmente, el metal se encuentra libre de hidrógeno. A continuación, se empieza a inyectar hidrógeno a cierta temperatura y éste se disuelve en la fase metálica, en ese momento aumenta la presión del compuesto. Conforme aumenta la presión, los incrementos de hidrógeno en la mezcla son cada vez menores, hasta que puede considerarse lleno. En la descarga, la presión disminuye, y se debe suministrar calor al hidruro para mantener las condiciones de reversibilidad. Aun así, es posible que se produzca un poco de histéresis. (Facultad Nautica de Barcelona, Enric Junyent Guinart, 2011).

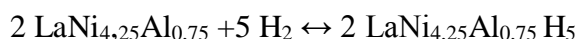
A continuación, se muestra una tabla con los diferentes hidruros y su capacidad de captación de moles de hidrógeno:

Tabla 3  
Almacenamiento mediante hidruros

HIDRURO	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO	CALOR DE FORMACIÓN (KCAL/MOL)
FeTiH	0.096	13
LaNiH	0.089	7.4
MgNiH	0.081	6.7

Fuente: [upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13884/Hidr%20geno%20PFC.pdf?sequence=1](http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13884/Hidr%20geno%20PFC.pdf?sequence=1)

Para entender mejor la reacción que se produce se muestra el ejemplo del  $\text{LaNi}_{4,25}\text{Al}_{0,75}$ :



Cada litro de  $\text{LaNi}_{4,25}\text{Al}_{0,75}$  puede absorber hasta 18 moles de hidrógeno. El hidrógeno, es absorbido y liberado del hidruro variando la presión, la temperatura o ambas. A continuación, se muestran los diversos tipos de hidruros metálicos más usados:

- Hidruros metálicos con base de zirconio con titanio, vanadio y níquel
- Hidruros activados de magnesio
- Hidruros metálicos compuestos “alanatos”

#### d. Hidruros químicos

Los hidruros químicos son compuestos los cuales al mezclarse con el agua reaccionan y liberan hidrógeno. En esa reacción, el hidruro se convierte en hidróxido. El proceso de carga en el cual al hidróxido se le carga con hidrógeno se le denomina reciclado. A continuación, se muestran diversos tipos de hidruros químicos que se suelen usar para almacenar hidrógeno y su densidad gravimétrica correspondiente:

Tabla 4  
Reacción en hidruros químicos

REACCIONES	DENSIDAD GRAVIMÉTRICA
$\text{CaH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 2\text{H}_2$	9.6 %
$\text{MgH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg(OH)}_2 + 2\text{H}_2$	15.3%
$\text{LiH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LiOH} + \text{H}_2$	25.2 %
$\text{LiBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LiOH} + \text{H}_3\text{BO}_3 + 4\text{H}_2$	37 %
$\text{NaBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{H}_3\text{BO}_3 + 4\text{H}_2$	21.3 %

Fuente: [upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13884/Hidr%20geno%20PFC.pdf?sequence=1](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13884/Hidr%20geno%20PFC.pdf?sequence=1)

El hidróxido de litio hidratado se descompone cuando es calentado a una temperatura superior a la de evaporación del agua. El hecho de que se evapore a baja temperatura lo convierte en el mejor hidruro para ser usado en el almacenamiento de hidrógeno. A temperatura ambiente se encuentra en forma sólida. Si se expone al aire libre, tiende a absorber vapor de agua, y libera calor e hidrógeno. Para evitar que se libere el hidrógeno y este pueda causar una deflagración, se mezcla el hidruro de litio con aceites minerales, el cual crea una capa protectora alrededor de la partícula de hidruro de litio, la cual no permite que absorba la humedad ambiente y permite el manejo del hidruro de litio con toda seguridad. A esta mezcla se la denomina “Slurry”. Cabe destacar que el hidruro de litio es una alternativa real al almacenamiento de hidrógeno a alta presión o bien licuado. Todo el proceso se realiza a presión y temperatura ambiente, lo cual abarata los sistemas de manipulación necesarios para su uso. Cabe destacar que su densidad energética gravimétrica es más de dos veces la del hidrógeno licuado. (Hidrógeno. Estudio de sus propiedades y diseño de una planta de licuado, Junyent, E. 2011).

#### e. Almacenamiento subterráneo de hidrógeno gaseoso:

Sin duda alguna este es un tipo de almacenamiento puntual, que se podrá utilizar dependiendo de la morfología del terreno en donde se quiera almacenar. El almacenamiento es similar al almacenamiento de gas natural en cavidades subterráneas. Este tipo de almacenamiento, permitiría disponer de una gran cantidad de producto almacenada para hacer frente a una situación de gran demanda de hidrógeno. Un sistema de almacenamiento parecido pero de helio fue creado en Tejas, EE.UU. con éxito. Para este tipo de almacenamiento, se pueden usar cuevas creadas por el hombre, minas abandonadas, acuíferos vacíos, etc. También se puede inyectar hidrógeno gaseoso en un suelo de roca porosa. Dicha roca debe tener por la parte superior una capa de cierre impermeable, la cual impida al hidrógeno escapar filtrándose lentamente a la atmósfera. En Tees Valley, Reino Unido, existe una colina de sal que se usa como almacén subterráneo de hidrógeno para la industria. Dicha mina almacena un millón de kilos de hidrógeno, los cuales se distribuyen mediante un gasoducto de más de 30 km. (Evaluación técnico económica de una planta de producción de hidrógeno mediante electrólisis de agua utilizando energía eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia, Pineda, D.; 2009)

## 4. ANHÍDRIDO CARBÓNICO – CO<sub>2</sub>

El dióxido de carbono, conocido generalmente como CO<sub>2</sub>, es un gas diatómico, también denominado óxido de carbono (IV), gas carbónico o anhídrido carbónico (los dos últimos cada vez más en desuso), es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono.

### a.-Características

#### ➤ Propiedades físicas

- Peso molecular	44 gr
- Estado de la materia	gas incoloro
- Punto de fusión	194.7 K (-78°C)
- Punto de ebullición	216 K (-57°C)
- Densidad	1.842 Kg/m <sup>3</sup> ; 0.001842 g/cm <sup>3</sup>
- Viscosidad	0.07 Cp a -78°C



- Propiedades químicas
  - Acidez 6.35 y 10.33 pK<sub>a</sub>
  - Solubilidad en agua 1,45 Kg/m<sup>3</sup>
- Termoquímicas
  - Entalpía de formación -393.52 kJ/mol
  - Entropía de formación 213.79 J·mol<sup>-1</sup>·K

Además, es uno de los gases de efecto invernadero, que contribuye a que la Tierra tenga una temperatura habitable, siempre y cuando se mantenga dentro de un rango determinado. Sin dióxido de carbono, la Tierra sería un bloque de hielo. Por otro lado, un exceso de dióxido de carbono acentúa el fenómeno conocido como efecto invernadero, reduciendo la emisión de calor al espacio y provocando un mayor calentamiento del planeta.

En los últimos años la cantidad de Dióxido de carbono ha aumentado mucho y eso contribuye según el consenso científico, al calentamiento global del clima planetario. La concentración existente en la atmósfera es muy superior a la necesaria: “sobra” CO<sub>2</sub>, la influencia humana ha alterado el ciclo biológico, al quemar combustibles (aumentando la concentración de CO<sub>2</sub>) y deforestando (disminuyendo la capacidad de absorber CO<sub>2</sub>).

En el Perú el alcohol producido a nivel industrial es obtenido por vía fermentativa, a partir de las mieles agotadas (melaza y miel B) obtenidas como subproducto de la producción de azúcar; al acondicionar estas mieles y fermentarlas se obtiene como producto principal etanol y como subproducto CO<sub>2</sub>, el cual se elimina al medio ambiente, desperdiciando así una inmejorable oportunidad de reducir costos de producción al darle un valor agregado a este valioso gas.

CO<sub>2</sub> emitido por las principales plantas alcoholeras del Perú:

Tabla 5

Estimado de emisiones de CO<sub>2</sub> de las plantas alcoholeras de Perú

DESTILERÍA	TIPO DE ALCOHOL	PRODUCCIÓN ALCOHOL (L/d)	EMISIÓN DE CO <sub>2</sub> (TN/d)
MAPLE	RECTIFICADO	380 000	288
CAÑA BRAVA	ABSOLUTO	300 000	227
CARTAVIO	RECTIFICADO	150 000	111
CASA GRANDE	RECTIFICADO	110 000	81
DUSAC	EXTRANEUTRO	20 000	15
LAREDO	EXTRANEUTRO	20 000	15
PARAMONGA	RECTIFICADO	15 000	11
POMALCA	RECTIFICADO	20 000	15
PUCALA	RECTIFICADO	20 000	15
SAN JACINTO	RECTIFICADO	20 000	15
SAN JUAN	RECTIFICADO	20 000	15
TUMAN	RECTIFICADO	20 000	15
NAYLAMP	RECTIFICADO	15 000	15

Fuente: Elaboración propia

La tecnología utilizada para el proceso será similar a la tecnología Buse- Alemania, las variantes se realizan básicamente con el fin de optimizar costos.

El gas proveniente de la fermentación a 30°C y 2 KPa de presión es dirigido mediante un sistema de control de presión y flujo a un balón de almacenamiento. Posteriormente es enviado hacia el primer scrubber (lavador de gases) en el cual se le pone en contacto con agua blanda que ingresa por el tope del Absorbedor a 30°C para maximizar el contacto y la eficiencia se hace que el agua ingresa a una presión superior que la del gas, cercana a la presión atmosférica de igual modo se emplea un exceso de agua de 2.5 m<sup>3</sup>/h, produciendo así a eliminar las impurezas volátiles, principalmente el Etanol, posteriormente el gas parcialmente purificado hace su ingreso al segundo scrubber donde al entrar en contacto con una solución de etilenglicol de alta pureza (99%) a 5°C y a 3 bar de presión se elimina por los fondos parte del agua que contiene la corriente gaseosa de CO<sub>2</sub>, luego el gas ingresa al tercer y último scrubber donde al igual que en el caso anterior utilizando una solución de etilenglicol que al entrar en contacto con el gas a contracorriente se elimina casi la totalidad del agua contenida en la corriente

gaseosa. Después de la unidad de absorción el CO<sub>2</sub> es sometido a dos compresiones sucesivas que tienen como finalidad incrementar la presión de la mezcla gaseosa de 0.6 bar a 25 bar, para facilitar la licuación del CO<sub>2</sub>, posterior a la compresión la corriente gaseosa es sometida a un enfriamiento en tres etapas utilizando para esto tres cooler en los cuales se verifica el decremento desde 415°C hasta la temperatura de -100°C temperatura a la cual se verifica la licuefacción del gas en cuestión que en seguida ingresa a un tanque flash donde se separa en CO<sub>2</sub> líquido y trazas de CO<sub>2</sub> gaseoso, el CO<sub>2</sub> en estado líquido se almacena y la corriente de CO<sub>2</sub> gaseoso se elimina como efluente al igual que las corrientes de los fondos de los scrubbers.

#### **4.1. Usos y aplicaciones del CO<sub>2</sub> en las diferentes industrias**

- Químicos. El Dióxido de carbono es utilizado en química para el control de la temperatura en reactores. El CO<sub>2</sub> También se utiliza en neutralización de efluentes alcalinos. El Dióxido de Carbono se utiliza en condiciones supercríticas para purificaciones o para operaciones de teñido de polímeros, fibras animales o vegetales.
- Farmacéutica. El Dióxido de carbono es utilizado en inertización, síntesis química, extracción con fluidos supercríticos, neutralización (pH) de aguas residuales o de proceso y transporte a baja temperatura (-78°C ó -108°F).
- Alimentos y bebidas. El CO<sub>2</sub> es utilizado en el sector alimenticio en uno de sus principales dominios:
  - La carbonatación de bebidas gaseosas, como las sodas, el agua mineral o la cerveza.
  - En el acondicionamiento de productos alimenticios, sus propiedades de inertización y bacteriológicas se combinan bien con las del nitrógeno y aumenta la duración de los alimentos.
  - Como fluido criogénico en las operaciones de enfriamiento o de congelación o como nieve carbónica para la regulación de temperaturas durante la distribución de productos alimenticios.
  - La cafeína se remueve del café por el CO<sub>2</sub> supercrítico.
- Medicinal. El CO<sub>2</sub> produce una atmósfera similar a las condiciones fisiológicas durante la manipulación de órganos artificiales.

- El dióxido de carbono es utilizado mezclado con el aire o el oxígeno como estimulante para mejorar la aireación del sistema respiratorio. Sirve, además, en la dilatación quirúrgica para la realización de laparoscopia abdominal.
- Industria de los metales. El Dióxido de Carbono se utiliza normalmente para la protección del medioambiente: Se emplea para eliminar los humos rojos durante las cargas de chatarra y carbón, para la reducción de la nitruración durante la colada en los Hornos Eléctricos de Arco, y para remover la mezcla a nivel del suelo. En la metalurgia de no férreos, el dióxido de carbono sirve para suprimir los humos durante la transferencia de mata (producción de Cu/Ni) o lingotes de metales preciosos (producción de Zn/Pb). Pueden utilizarse pequeñas cantidades de CO<sub>2</sub> en los procesos de reciclado de las aguas provenientes de drenado de minas. Los láseres de CO<sub>2</sub> se alimentan con dióxido de carbono de pureza especial.
  - Laboratorios & análisis. El CO<sub>2</sub> Supercrítico es la fase móvil en aplicaciones cromatográficas y de extracción.
  - Pulpa y papel. El dióxido de carbono permite regular finamente el pH en la fabricación de pastas recicladas o químicas después de un blanqueamiento alcalino. El CO<sub>2</sub> puede usarse en la neutralización de "tall oil" y para la mejora del funcionamiento de las máquinas de papel.
  - Electrónica. El dióxido de carbono es empleado generalmente en el tratamiento de efluentes líquidos o durante el enfriamiento de los componentes en los ensayos climáticos de componentes electrónicos.

El dióxido de carbono puede servir para aumentar la conductividad del agua ultra pura o para limpiar los abrasivos de piezas como nieve carbónica y en el propio proceso de limpieza de las resinas fotosensibles al CO<sub>2</sub> supercrítico, a fin de evitar la utilización de solventes orgánicos.

- Ambiental. La inyección de dióxido de carbono permite manejar el pH de los efluentes líquidos. El CO<sub>2</sub> es una excelente alternativa para el control del pH del ácido sulfúrico.
- Otras industrias:
  - Utilizado en control de pH y neutralización.
  - Utilizado en limpieza industrial (CLEANBLAST), en extintores (nieve carbónica).

## 4.2. Tipos de Captura de CO<sub>2</sub>

### a. Precombustión.

La primera fase en este proceso (gasificación o reformado de gas) implica la conversión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos en una mezcla de hidrógeno y dióxido de carbono. Ambas tecnologías se encuentran dentro del Estado del Arte actual, a escala de refinería o industria química.

Este tipo de captura está relacionado con la producción de hidrógeno ya que una vez lograda la mezcla H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, es posible aplicar procesos químicos o físicos de absorción de CO<sub>2</sub>, con el fin de seleccionar el segundo de los gases, con el cual se puede utilizar en diferentes procesos entre ellos tenemos:

- La Producción de energía eléctrica
- La síntesis de amoníaco.
- La producción de fertilizantes.
- Los hidroprocesamientos en las refinerías de petróleo.

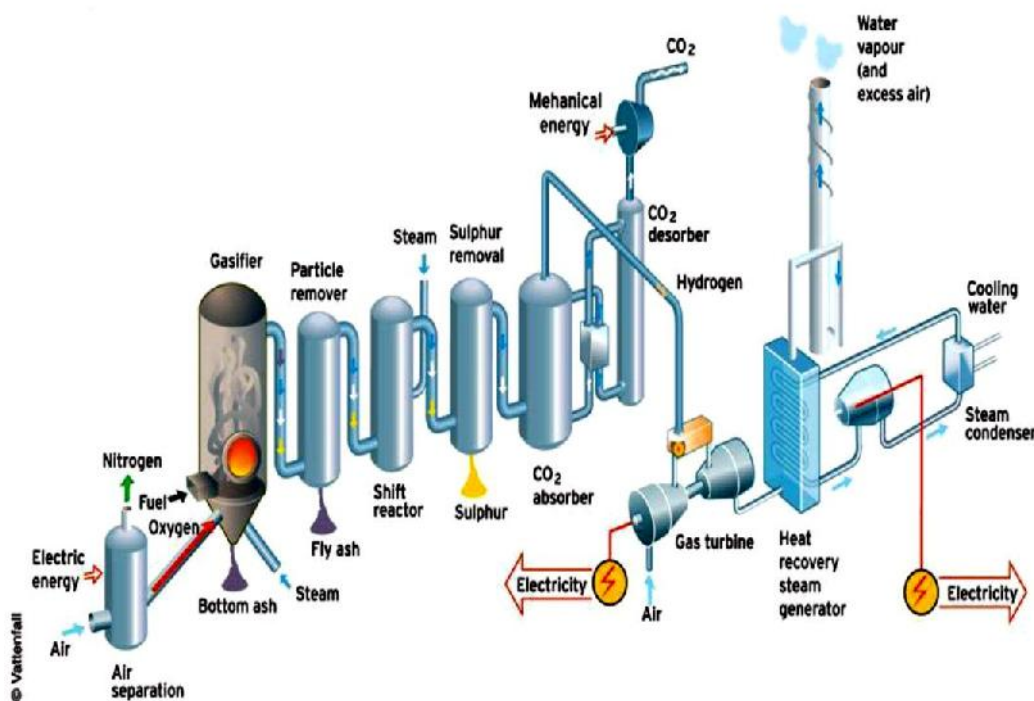


Figura 04: Diseño planta con tecnología de captura en pre combustión

Después de separar los gases, para la captura del CO<sub>2</sub> se utilizan métodos que son similares a los del sistema de captura en postcombustión:

- Adsorción a cambio de presión (PSA), se utilizan presiones por encima de la atmosférica (incluso altas presiones) para adsorber componentes de la mezcla gaseosa, aprovechando que la interacción adsorbato-adsorbente es más fuerte al aumentar la presión, y se reduce la presión para liberar los componentes adsorbidos. Esta se adapta para aplicaciones puras de hidrógeno, pero con las composiciones de gas sintético obtenidas usualmente, las pérdidas de hidrógeno serían inaceptables.
- Separación Criogénica, se condensa el CO<sub>2</sub> para separarlo del gas de síntesis, mediante temperaturas criogénicas para producir CO<sub>2</sub> líquido, listo para almacenamiento. Este sistema no es rentable pues este método requiere de grandes cantidades de energía.
- Absorción química, usando una solución con monodietanolmelamina (MDEA) y la dietanolamina (DEA) formarán soluciones alcalinas más fuertes, por lo que reducen en mayor grado el contenido de los gases ácidos, esta es la tecnología más usada en la actualidad para remover CO<sub>2</sub>.
- Absorción física en este proceso no hay reacción química entre los gases y la disolución, depende únicamente de la solubilidad del gas y por lo tanto de la presión parcial del mismo, se suele emplear en este proceso alta presión usando Selexol o Rectisol (metanol frío) es muy adaptable para productos de gasificación.

## **b. Post-combustión**

En principio, los sistemas de captura en postcombustión pueden ser aplicados para cualquier tipo de combustible, sin embargo las impurezas del combustible son muy importantes para el diseño y cálculo de costes de una planta completa. Los gases de combustión procedentes del carbón no sólo contienen CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> Y H<sub>2</sub>O, sino también incorporan contaminantes tales como SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>, partículas, HCL, HF, mercurio y otros metales u oligoelementos orgánicos y contaminantes inorgánicos. Esto obliga a instalar previo al sistema de captura de CO<sub>2</sub> sistemas de eliminación de partículas o unidades de desulfuración (FGD). Para su captura posterior, entre los procesos más viables se encuentran el ciclo de Calcinación – Carbonatación y la absorción química con aminas.

- **Absorción química** Es la mejor opción aplicable a postcombustión. La absorción química ofrece una captura con alta eficiencia y selectividad y el consumo de energías más bajo en comparación con otras tecnologías de captura. Se utilizan compuestos químicos (aminas y nuevos absorbentes en investigación), los radicales libres de la amina hacen que el CO<sub>2</sub> se combine con ella dando un compuesto que necesita muy poca energía para descomponerse y regenerar la amina.

En la tabla se muestran solventes usados comúnmente para llevar a cabo esta tarea. Y las etapas del proceso se describen básicamente en el esquema de la figura 4.

Tabla 6  
Solventes más usados para la Post Combustión

<b>Tipo de solvente</b>	<b>Ejemplo</b>
Aminas primarias	Monoetanolamina (MEA) Diglicolamina (DGA)
Aminas secundarias	Dietanolamina (DEA) Diisopropanolamina (DIPA)
Aminas terciarias	Metildietanolamina (MDEA) Trietanolamina (TEA)
Soluciones de sal alcalina	Carbonato de potasio

1. En la primera etapa se alimenta el gas que contiene el CO<sub>2</sub> y se pone en contacto con un absorbente líquido capaz de capturar el CO<sub>2</sub>. Se obtienen 2 salidas el gas sin CO<sub>2</sub> y el absorbente cargado con CO<sub>2</sub>.
2. El absorbente cargado con CO<sub>2</sub> se transporta a otra torre donde se regenera mediante cambios de temperatura (PSA) o presión (TSA) y libera el CO<sub>2</sub>.
3. En esta etapa de reflujo el absorbente regenerado se envía de nuevo al proceso de captura de CO<sub>2</sub> para que se pueda volver a repetir el proceso.
4. De acuerdo a la cantidad de absorbente utilizado, se retroalimenta más absorbente al proceso.

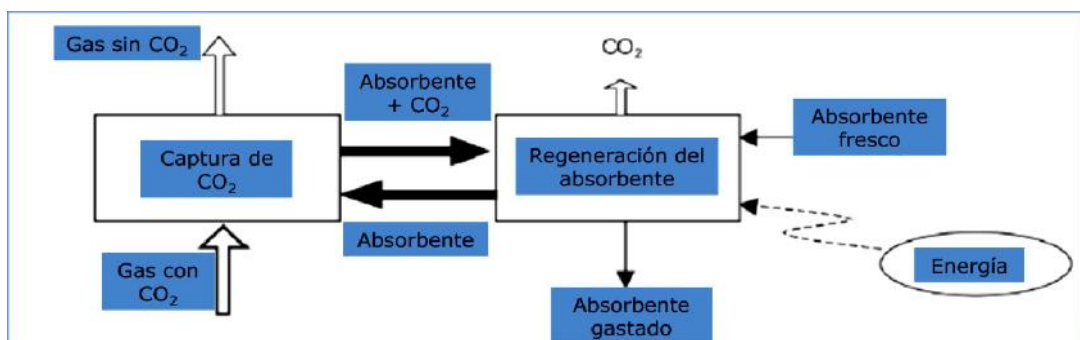


Figura 05. Etapas del proceso de absorción química.

Fuente: [hudsonick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/co2capture/Informe%20captura%20y%20secuestro%20de%20CO2.pdf](http://hudsonick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/co2capture/Informe%20captura%20y%20secuestro%20de%20CO2.pdf)

#### ➤ Ciclo de calcinación/carbonatación

Este ciclo de carbonatación/calcinación, se utiliza para separar el CO<sub>2</sub> a alta temperatura utilizando las reacciones reversibles:  $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$ .

El óxido de calcio (CO) absorbe el CO<sub>2</sub> en un reactor de carbonatación (en generalmente un reactor de lecho fluidizado) y la posterior calcinación del CaCO<sub>3</sub> en una atmósfera rica en O<sub>2</sub> libera CO<sub>2</sub> para su posterior purificación y almacenamiento.

#### ➤ Adsorción física

El dióxido de carbono puede recuperarse del gas de combustión con una variedad de sorbentes no reactivos incluyendo materiales carbonosos y materiales cristalinos conocidos como zeolitas. Alto porosidades dotan de carbón activado y carbón con capacidad de captura de CO<sub>2</sub> de 10-15% por peso. Sin embargo, sus selectividades CO<sub>2</sub> / N<sub>2</sub> (aproximadamente 10) son relativamente bajas. Porque esta desventaja, los costes de captura proyectados incluyendo el de compresión son tales que los sistemas basados en carbono sólo son prácticos cuando la pureza de CO<sub>2</sub> requerida es como mucho 90% .Los materiales zeolíticos, por otro lado, ofrecen CO<sub>2</sub> / N<sub>2</sub> selectividades 5-10 veces mayores que las de los materiales carbonosos. Sin embargo, su CO<sub>2</sub> las capacidades son 2-3 veces más bajas. Además, el rendimiento de la zeolita se deteriora cuando hay vapor de agua. Para ser competitivos con disolventes líquidos, los sorbentes sólidos deben ser menos sensibles al vapor y ofrecer capacidades y selectividades sustancialmente mayores para el CO<sub>2</sub> que las actualmente disponibles.



## ➤ Membranas

La utilización de membranas se ve afectada por el alto coste de compresión necesario para obtener una alta presión en la alimentación del proceso. Por ejemplo un sistema de separación por membranas opera a unos 30 bares (3000kPa). También influye negativamente la presencia de contaminantes como  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  o  $\text{HCL}$ . Actualmente no existen aplicaciones comerciales para la recuperación del  $\text{CO}_2$  de los gases de combustión, aunque el proceso ha sido utilizado en muchos proyectos de mejora de la recuperación del petróleo para reciclar el  $\text{CO}_2$  del gas asociado. En la práctica, la mayoría de las aplicaciones de membranas se dan en pequeñas plantas sobre plataformas móviles donde el  $\text{CO}_2$  con cierta impureza es aceptable para aplicaciones que pueden obtener ventajas de su tamaño compacto y su bajo peso. También existen plantas que utilizan sistemas híbridos: Membrana- Aminas y Membrana-separación criogénica que también tendrían interés por su tamaño compacto y su bajo peso. Las membranas se pueden clasificar en orgánicas e inorgánicas, destacando que las membranas orgánicas no son resistentes a altas temperaturas como las inorgánicas.

Las membranas orgánicas utilizadas comercialmente son las poliméricas, las cuales se utilizan para los siguientes procesos.

- Separación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  a alta presión del dióxido de carbono.
- Separación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$ , Tanto la presión del flujo de gas como la selectividad de la membrana deben ser bajas.

En las membranas inorgánicas encontramos más opciones en el tipo de membrana como se detalla a continuación.

- Membranas metálicas, utilizadas en la captura en pre combustión, separando  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$  mediante compuestos con aleaciones Pd.
- Membranas microporosas, también utilizadas en la captura en pre combustión separando  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ .
- Membranas transportadoras de iones, las cuales pueden ser usadas tanto en captura en pre combustión como captura en oxi-combustión. Para el primer caso se utilizan membranas conductoras de protones y para el segundo membranas conductoras de oxígeno.

- **Destilación criogénica** La separación criogénica consiste en que el  $\text{CO}_2$  se separa físicamente de la corriente de gas condensándolo a bajas temperaturas para producir  $\text{CO}_2$  líquido, listo para su almacenamiento. Esto se lleva a cabo en una serie de etapas de compresión, enfriamiento y expansión, en las cuales los componentes del gas se pueden separar en una posterior columna de destilación.

La principal ventaja de este proceso es que permite obtener directamente  $\text{CO}_2$  líquido facilitando considerablemente el transporte (barco) uno de los principales problemas que tienen las diversas etapas de captura y almacenamiento de  $\text{CO}_2$ . Por el contrario, una de las desventajas más importantes que presenta esta tecnología es la gran cantidad de energía requerida para llevar a cabo el proceso. Además, otra de las desventajas sería la necesidad de retirar algunos de los componentes de las corrientes, como el agua, previamente a su enfriamiento, con el fin de evitar bloqueos en el sistema.

Por las desventajas mostradas, esta tecnología, aunque se plantea como procedimiento postcombustión, se utiliza sobre todo para separar las impurezas de una corriente de  $\text{CO}_2$  que ya se ha separado en una primera etapa y que posee alta pureza, normalmente valores superiores al 90%. Este es el caso de las corrientes obtenidas mediante la tecnología de captura denominada proceso de oxidación, donde se pueden obtener concentraciones de  $\text{CO}_2$  finales entre el 75-90%. Este procedimiento de separación criogénica no suele usarse para corrientes más diluidas.

### **c. Oxidación.**

Usan oxígeno en lugar de aire para la combustión del combustible primario con objeto de producir un gas de combustión compuesto principalmente por  $\text{H}_2\text{O}$  (v) y  $\text{CO}_2$ . Esto da origen a un gas de combustión con altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  (más del 80% en volumen). Entonces, el  $\text{H}_2\text{O}$  (v) es sustraído mediante el enfriamiento y la compresión del flujo de gas. La combustión de oxígeno-gas requiere separar inicialmente el oxígeno del aire, adquiriendo así, el oxígeno un grado de pureza del 95 al 99 % en la mayor parte de los modelos. Podría necesitarse un tratamiento ulterior del gas de combustión para extraer los contaminantes atmosféricos y los gases no condensados (como el nitrógeno) del gas de combustión antes de transportar el  $\text{CO}_2$  a su lugar de almacenamiento.

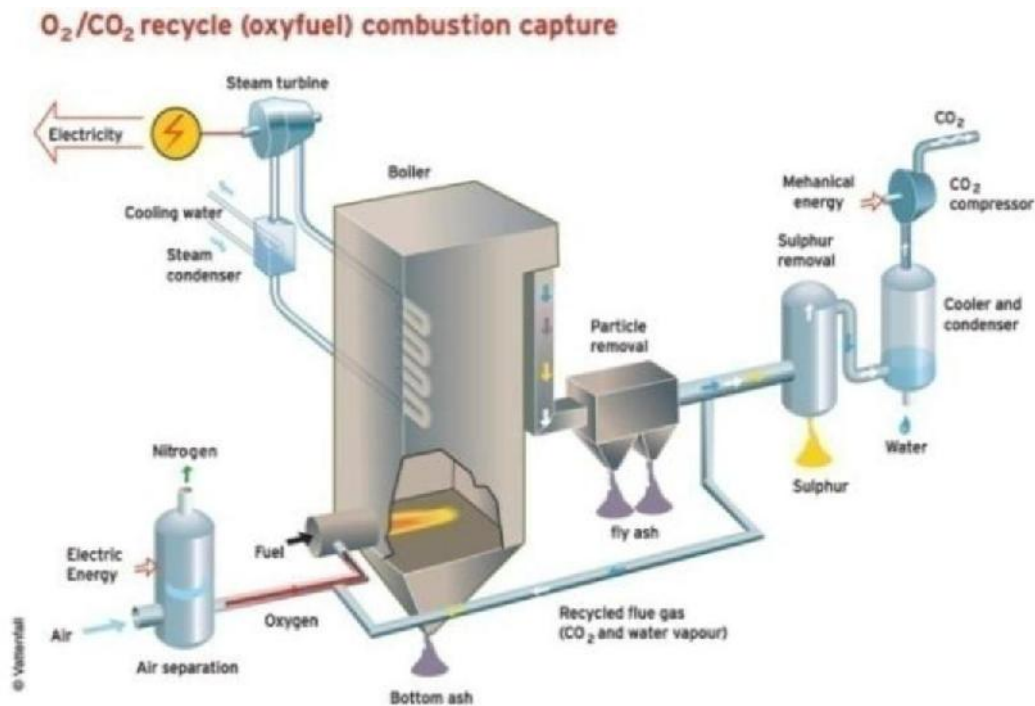


Figura 06. Operación de la oxi-combustión

Fuente: [hudsonick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/co2capture/Informe%20captura%20y%20secuestro%20de%20CO2.pdf](http://hudsonick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/co2capture/Informe%20captura%20y%20secuestro%20de%20CO2.pdf)

### 4.3. Tipos de almacenamiento de CO<sub>2</sub>

#### a. Almacenamiento Geológico

Existen tres tipos de formaciones geológicas para el almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>: yacimientos de petróleo de gas, formaciones salinas profundas y capas de carbón inexplorables. Las formaciones rocosas porosas que retienen o han retenido fluidos anteriormente (como gas natural, petróleo o salmuera) son candidatos potenciales para el almacenamiento de CO<sub>2</sub>. La opción de almacenar el CO<sub>2</sub> en capas de carbón y mejorar la producción de metano está aún en la fase de demostración. Las principales formaciones geológicas consideradas:

- Yacimientos/reservas de hidrocarburos: petróleo o gas natural: Uno de los depósitos geológicos utilizables para el almacenamiento de CO<sub>2</sub> son las reservas de petróleo y gas natural que se encuentran en la fase final de su producción. Este tipo de yacimientos son conocidos por haber tenido una alta efectividad en su cierre, el cual ha retenido hidrocarburos durante largos periodos de tiempo. Otra ventaja adicional es la fuerte investigación realizada para conocer y delimitar la reserva durante las fases previas a su explotación.

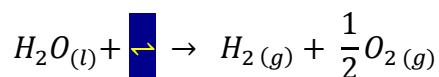
- **Acuíferos salinos profundos:** Estas formaciones se definen como unidades geológicas que no tienen ningún potencial de ser recursos de agua potable. Las principales propiedades de la formación son su alta porosidad y permeabilidad, además de contener un fluido salino entre los poros de los granos que componen la roca. Estos acuíferos usualmente se encuentran en profundidades superiores a aquellos acuíferos no salinos, útiles para el consumo. La alta concentración de sales y la gran profundidad a la que se encuentran, hacen inviable la extracción de agua contenida ni técnica ni económicamente.
- **Capas de carbón no explotables:** Se sabe que el CO<sub>2</sub> puede ser adsorbido por el carbón; de hecho, en la última del pasado siglo XX, varios proyectos en EE.UU utilizaron este gas para mejorar la producción de metano procedente de capas de carbón no explotables, desplazando el metano y facilitando la recuperación de éste. Además el CO<sub>2</sub> presenta una mayor afinidad de adsorción que el metano en el carbón, siendo retenido de forma segura, formando parte de la matriz o estructura del carbón. Esto implica que las capas de carbón pueden almacenar el dióxido de carbono y producir un combustible: metano. Además y dado que el CO<sub>2</sub> se adsorbe mejor en la superficie de carbón que el metano.

Otras técnicas de almacenamiento de CO<sub>2</sub> menos comunes

- **Biológica de almacenamiento o confinamiento natural:** Hace referencia al proceso biológico en el que los ecosistemas marinos y terrestres son capaces de absorber CO<sub>2</sub> de la atmósfera. De esta forma no es necesario disponer de ningún equipo que capture, ni ningún medio de transporte que aisle y desplace al CO<sub>2</sub> hasta un posible sumidero. Siempre ha existido este proceso mediante el cual se ha venido regulando la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera terrestre. Se trata de hacer un uso más eficaz de los bosques en los que almacenar CO<sub>2</sub> atmosférico a través de la fotosíntesis. Este método es aplicable a la limitación de las emisiones de CO<sub>2</sub> (transporte, vivienda, etc.)
- **Almacenamiento en océanos:** Opción de almacenamiento de CO<sub>2</sub> consistente en inyectar el CO<sub>2</sub> captado directamente en los fondos oceánicos (a más de 1000 m de profundidad). Ello puede lograrse mediante el transporte de CO<sub>2</sub> por gasoductos o buques a un lugar de almacenamiento oceánico, donde se inyecta en la columna de agua del océano o en los fondos marinos. Posteriormente, el CO<sub>2</sub> disuelto y disperso se convertiría en parte del ciclo global del carbono.

## 5. ELECTRÓLISIS

La historia de la electrolisis comienza tempranamente durante la primera revolución industrial cuando, en el año 1800, Nicholson y Carlisle descubren el proceso de separación electrolítica de la molécula de agua. Durante el año 1902 ya existían más de 400 plantas industriales de electrólisis en operación con una capacidad de 10.000 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>/h. En el año 1942 entra en operación el primer electrolizador industrial presurizado desarrollado por Zdansky y Lonza. La historia continua en la actualidad con la creación de los electrolizadores de membranas de intercambio, útiles tanto para los procesos de electrólisis de agua como también para celdas de combustión. Otros avances en esta materia son los electrolizadores de óxido sólido y la reconstrucción y optimización de los electrolizadores alcalinos. A pesar de que la separación electrolítica de agua fue descubierta en ambiente ácido, en plantas industriales se prefiere trabajar en medios alcalinos, esto permite controlar la corrosión además que se utilizan materiales más baratos respecto al electrólisis en ambiente ácido. La descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno es alcanzada mediante la circulación de corriente eléctrica a través de los electrodos separados por un electrolito con buena conductividad iónica. La reacción total para la separación del agua es la siguiente:

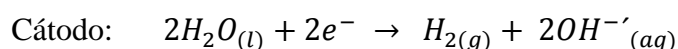
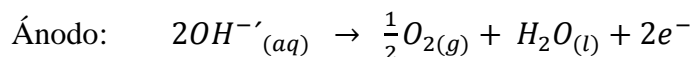


Para que esta reacción ocurra, debe ser aplicado sobre los electrodos un cierto voltaje, el cual puede ser determinado mediante la energía libre de Gibbs para la ruptura de la molécula de agua. Los tres tipos de electrolizadores que son ampliamente estudiados y desarrollados son de electrólisis alcalina, de dispositivo de electrolito de membrana polimérica y de óxido sólido. (Evaluación técnico económica de una planta de producción de hidrógeno mediante electrólisis de agua utilizando energía eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia, Pineda, D., 2009)

## 5.1. Tipos de electrólisis

### a. Electrólisis alcalina

En la electrólisis alcalina el electrolito es generalmente hidróxido de potasio (KOH) en una solución acuosa al 20-30%, en donde los iones  $K^+$  e hidroxilo ( $OH^-$ ) son causantes de las corrientes iónicas. Las reacciones anódicas y catódicas son las siguientes:



En una solución alcalina, los electrodos deben ser resistentes a la corrosión y deben tener excelente conductividad eléctrica además de propiedades catalíticas. Por otra parte, el diafragma debe tener una baja resistencia eléctrica. Todas estas propiedades pueden ser alcanzadas utilizando ánodos de Níquel (Ni), Cobalto (Co) o Hierro (Fe) y cátodos de Níquel con platino promovido por carbón activado (Ni, C-Pt). El diafragma comúnmente es de óxido de Níquel (NiO). Las condiciones de operación típicas de este tipo de electrolizadores varían generalmente entre los 70-100 °C. y 1-30 bar. respectivamente. Físicamente un electrolizador consiste en varias celdas ordenadas en serie. (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).

Existen dos diseños distintos para este tipo de electrolizadores:

- Electrolizador monopolar
- Electrolizador bipolar

### b. Diseño monopolar o electrolizadores de célula

Los electrodos, tanto negativo y positivo, están conectados eléctricamente en paralelo, mientras que, en el diseño bipolar, los electrodos están conectados en serie tanto eléctrica como geométricamente. Una ventaja de los electrolizadores bipolares es que estos tienen un diseño más compacto, por lo que son convenientes en instalaciones industriales de gran envergadura. Otra ventaja de este diseño son los perfiles de corriente más pequeños en líneas de conducción y electrodos, dando a este diseño una resistencia menor en el electrolito, permitiendo una eficiencia mayor que en electrolizadores monopolares. Otro aspecto que diferencia ambos diseños son las presiones de operación, para procesos a presión atmosférica el diseño debe ser monopolar, mientras que el diseño bipolar permite trabajar a altas presiones, esta

condición permite también un incremento de eficiencia ya que ésta depende de las presiones de operación. Una desventaja del diseño a altas presiones (que permite el diseño compacto) es la presencia de corrientes parásitas en los ductos de conducción de gases, por lo tanto, se requiere de un diseño más avanzado en el sistema de control de este equipo de manera de asegurar una operación segura. En los electrolizadores bipolares, el estanque contenedor de las celdas electrolíticas es encerrado por una cubierta de manera que el agua de proceso se encuentra rodeando las celdas, de este modo, el agua es bombeada a presión dentro del electrolizador. Se debe hacer hincapié en la condición de que estos electrolizadores deben ser alimentados con agua pura de manera de evitar la acumulación de sales en el dispositivo. (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).

### **c. Electrólisis de óxido sólido**

Los sistemas de óxido sólido fueron diseñados para operar a altas temperaturas. En un diseño temprano, estos fueron electrodos tubulares dentro de los cuales fluía la corriente de agua. La ventaja de este tipo de sistema es la habilidad de sustituir parte de la energía eléctrica requerida para separar agua en energía térmica. En estos dispositivos, varias celdas circulares (tipo anillos) son conectadas una tras otra de manera de formar un tubo. El vapor de agua es alimentado al tubo y es reducido en el cátodo construido de acero y níquel (parte interior del tubo) formando hidrógeno, el cual es retirado por el extremo contrario al cual ingresa el agua. Los iones de oxígeno migran a través del conductor de óxido sólido construido de ytrio estabilizado en óxido de zirconio y es oxidado en la parte exterior del tubo. Es conveniente notar que los iones de oxígeno migran hacia el exterior a través de las paredes del dispositivo las cuales son permeables a este ión. El factor que determina la temperatura a la cual opera este tipo de electrolizador es la conductividad iónica del óxido sólido, por lo cual la mayor parte de las investigaciones están orientadas a disminuir las presiones de operación mediante el estudio del material con el cual se construye el dispositivo. (Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis, Velásquez, J., y Quiceno, J., 2013)

## **6. ENERGÍA SOLAR:**

La energía solar es aquella que se produce en el núcleo del Sol por procesos de fisión nuclear y alcanza a nuestro planeta Tierra con la forma de radiación electromagnética. Por otra parte, en las últimas décadas este término ha sido utilizado para referirse a una joven e innovadora forma de obtener energía eléctrica por parte del Sol.

Es bien sabido que el calentamiento global se produce a causa de las actividades del ser humano, y la actividad que lidera este problema surge durante la Revolución Industrial, cuando se implementan máquinas que funcionan gracias a la quema de combustible (máquinas de vapor). Hoy en día no diferimos mucho nuestras técnicas de obtención de energía eléctrica, pues aún se emplean combustibles fósiles en las denominadas Centrales Termoeléctricas; al ser quemados estos liberan energía térmica y producen emisiones altamente tóxicas y contaminantes. Cabe destacar que los combustibles fósiles son finitos, se estima que se agoten en la próxima centuria, sus métodos de localización y extracción son difíciles y costosos de emplazar.

Es por esta razón que los principales promotores de las “energías limpias” han invertido gran cantidad de recursos en la investigación, desarrollo e implementación de alternativas a las Plantas Termoeléctricas, entre las propuestas que se encuentran, tenemos como una de las más importantes la cual es la energía solar. (Características de la energía solar, Octavio, Blogger 2006)

### **6.1.Características:**

- Energía con fuente ilimitada, el Sol.
- Sin partes móviles.
- Sin ciclos termodinámicos.
- Sin reacciones químicas.
- Muy fiable. Mantenimiento muy bajo.
- La única energía renovable que puede instalarse de forma masiva en núcleos urbanos.
- No necesita grandes infraestructuras.

Datos tomados de: Las grandes ventajas de una Instalación solar fotovoltaica en una vivienda familiar, 4 octubre del 2011.



## **6.2. Tipología De La Energía Solar**

A partir de inicios del año 1900 comienzan las investigaciones para abastecer la demanda eléctrica de la población, con bajos daños para el ambiente y con una posibilidad de sustentación a largo plazo, es decir, se busca una fuente energética capaz de renovarse, de origen natural e inagotable. En la última década es cuando se producen avances considerables en el campo del aprovechamiento de la energía solar. Es así como La energía solar se ha establecido como una de las alternativas más prometedoras a la tradicional combustión fósil. La tecnología puede utilizar 2 tipos de energía básicos, en función de la manera en que se obtiene, transforma y distribuye: energía solar activa o energía solar pasiva. Las técnicas solares pasivas incluyen la selección de materiales con una masa térmica favorable o propiedades de dispersión de la luz, la orientación hacia el sol de las construcciones y el diseño de espacios que hacen circular el aire de forma natural. Por otra parte, las técnicas solares activas usan paneles fotovoltaicos y colectores térmicos solares para aprovechar la energía. Los módulos fotovoltaicos solares convierten directamente la luz solar en electricidad, y los colectores térmicos producen vapor a partir de la radiación solar, que después se usa para girar una turbina que genera la electricidad. (Características de la energía solar, Octavio, Blogger 2006)

## **6.3. Tecnologías Que Usan Energía Solar**

Haciendo uso de la técnica, el hombre emplea diversas tecnologías para obtener energía solar y producir energía eléctrica. Las más usadas son 2: las celdas, que son dispositivos que convierten la energía solar en energía eléctrica, instalados en calculadoras y hasta señales de tránsito; y los paneles solares, forman parte del sistema fotovoltaico. Por medio de placas que contienen células de material fotovoltaico, el cual absorbe fotones y emite electrones (corriente eléctrica) gracias al efecto fotoeléctrico. Cuya función es generar electricidad y calentar el agua. Estos últimos son a menudo instalados en los techos de las construcciones. (Energía solar, by bioenciclopedia, recursos naturales, enero 2014)

## **6.4. Beneficios De La Energía Solar:**

- Renovable
- Inagotable

- No contaminante
- Evita el calentamiento global
- Reduce el uso de combustibles fósiles
- Reduce las importaciones energéticas
- Genera riqueza y empleo local
- Contribuye al desarrollo sostenible
- Es modular y muy versátil, adaptable a diferentes situaciones
- Permite aplicaciones para generación eléctrica a gran escala y también para pequeños núcleos aislados de la red

### **6.5.Aplicaciones De La Energía Solar**

La energía solar tiene múltiples aplicaciones en la vida práctica, y de hecho, todas las energías renovables, con excepción de la geotérmica y la mareomotriz, obtienen su energía de la radiación solar. En los hogares, se utiliza primordialmente para calentar, enfriar e iluminar las habitaciones. La agricultura fue una de las primeras actividades que el ser humano practicó con ayuda de la energía del sol, porque, evidentemente, necesitaba de dicha estrella para hacer crecer las plantas. En la actualidad, la agricultura está en busca de una optimización de la captura de energía para hacer más productivas las cosechas, y utiliza técnicas que incluyen ciclos cronometrados de siembra, plantación en filas escalonadas, paneles solares y los famosos invernaderos. Éstos convierten la luz en calor y así se pueden cosechar plantas durante todo el año. La industria del transporte también hace uso de la energía solar, y en años más recientes, su objetivo es la producción y comercialización de vehículos que no necesiten de gasolina para funcionar, sino sólo radiación del sol. Algunos autos utilizan paneles solares como energía auxiliar para mantener fresco su interior o hacer trabajar el aire acondicionado. En la arquitectura, la energía del sol ha tenido un papel importante desde hace mucho tiempo atrás. Por ejemplo, las civilizaciones griega y china orientaban sus edificios hacia el sur para conseguir calor y energía. La planificación urbana prima los espacios bien iluminados que mantienen una temperatura agradable y poco a poco se han integrado una especie de paquetes de diseño solar que constituyen tecnologías solares activas y pasivas.

La cocina es otro rubro que puede hacer uso del sol, ya que no es necesario el fuego para preparar los alimentos. Quienes cocinan sin fuego, tienen 3 opciones: los fogones o estufas de caja, los fogones de paneles y las estufas reflectoras. Cada una alcanza

temperaturas de 315° centígrados o más y necesita luz solar directa para cocer los alimentos, por lo que deben colocarse de modo adecuado. (Energía solar, by bioenciclopedia, recursos naturales, enero 2014)

### **6.6.Ventajas De La Energía Solar**

El uso de la energía solar es inagotable, básicamente. Siendo una fuente siempre disponible, que no depende de ninguna otra para generarse. Es también fuente de energía que no contamina es decir no produce gases de efecto invernadero y no contribuye al cambio climático. Los lugares más alejados en los cuales no pueden acceder a la electricidad tienen la opción de generarla mediante las celdas solares y de esta manera, no necesitan depender de la red hidroeléctrica, al menos hasta que sea instalada.

Además, el costo a largo plazo de la energía solar es muy rentable en comparación con otras fuentes tradicionales, por ejemplo, el de la gasolina que echa a andar los vehículos.

### **6.7.Desventajas De La Energía Solar**

La energía solar tiene muy pocas desventajas, pero como principal inicio al acceso de estas se puede mencionar el costo inicial de los paneles solares o la posible contaminación a partir de la fabricación, el transporte o instalación de las tecnologías utilizadas para generar la energía. Una última desventaja se basa en la disponibilidad de la luz, ya que esta energía sólo puede utilizarse durante el día y es difícil almacenarla debido al costoso del equipo para la transformación y almacenamiento del mismo.

### **6.8.La energía solar hoy en día:**

Este innovador medio de obtención de energía ha visto muchos avances en la actualidad, por ejemplo, muchas industrias emplean grandes cantidades de paneles solares para su alimentación eléctrica, así como comunidades enteras de viviendas en países del primer y tercer mundo. Por otra parte, expertos están trabajando en nuevas planchas de un material llamado grafeno, que se incorporan en los paneles solares, las cuales permitirían la producción de electricidad incluso en días lluviosos sin la presencia de sol, tan sólo con el impacto de las gotas de agua sobre la superficie del panel. (Características de la energía solar, Octavio, Blogger 2006)

### **6.9.Futuro De La Energía Solar:**

La aplicación de las tecnologías para obtener energía solar está encauzada a diversificar las fuentes de energía, ahorrar dinero, mejorar la eficiencia y reducir los niveles de contaminación. La utilidad de la energía solar se extrapola hacia ámbitos que, aunque hoy pueden no ser conocidos o productivos, o que pueden ser caros (como en el caso de los vehículos solares), significan una posibilidad que mejoraría el medio ambiente y la calidad de vida humana. (Energía solar, by bioenciclopedia, recursos naturales, enero 2014)

## **7. ENERGÍA ELÉCTRICA VÍA HIDROGENO**

El hidrógeno contiene más energía que otros combustibles comunes por peso, pero al ser el elemento más ligero y estar en estado gaseoso a temperatura y presión ambientales hace que contenga menos energía por volumen que cualquiera de los otros combustibles. Así mismo, aunque sea el elemento más abundante, en nuestro planeta no se encuentra nunca en estado gaseoso. El motivo es que es más ligero que el aire, por lo que si se libera se eleva en la atmosfera, por lo que para obtenerlo necesitamos algún proceso que lo separe de otros elementos. El hecho de que el hidrógeno sea tan ligero, que a temperatura ambiente se encuentre en estado gaseoso y que no se encuentre disponible de forma natural en la tierra condiciona completamente su utilización como combustible y hace que aún no se haya consolidado definitivamente como una alternativa viable al petróleo. (El hidrógeno como fuente de energía, queinventenellos.com; marzo 2010).

## **8. PILA DE COMBUSTIBLE**

Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos en los que la energía de una reacción química se convierte directamente en electricidad, con una alta eficiencia. Las pilas de combustible no disponen de partes móviles internas. La pila de combustible no se acaba ni necesita ser recargada; funciona mientras el combustible y el oxidante le sean suministrados desde fuera de la pila. Las pilas de combustible combinan electroquímicamente un combustible (típicamente hidrógeno) y un oxidante sin que haya combustión, de este modo se compensan las ineficiencias y contaminación de las formas de conversión de la energía tradicionales. Las pilas de combustible producen electricidad a partir de la oxidación controlada del hidrógeno. La energía química se

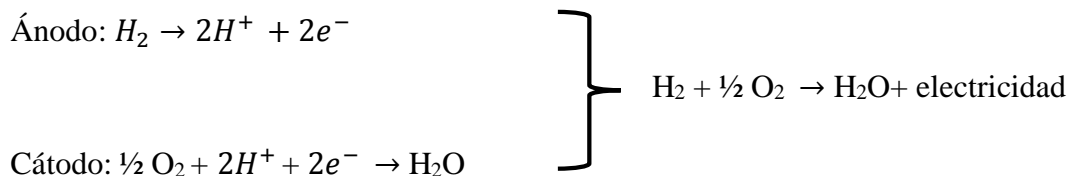
convierte dentro de la pila de combustible directamente en energía eléctrica y calor cuando el combustible hidrógeno se combina con el oxígeno del aire. El único subproducto de la pila de combustible es agua. Si se utiliza hidrógeno puro no se generan productos contaminantes. Los productos contaminantes se pueden producir a la hora de generar el hidrógeno.

Las pilas de combustible son mucho más eficientes que las fuentes de energía tradicional por que convierten la energía química del combustible directamente en electricidad. Por esto la pila de combustible es mucho más limpia que cualquier combustible de hidrocarburos. (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).

### 8.1. Funcionamiento de pila de combustible

El concepto de funcionamiento de una pila de este tipo, como tal, resulta bastante simple. El elemento básico de una pila es una celda Electroquímica formada por dos electrodos (ánodo y cátodo), y un electrolito que los pone en contacto. Las reacciones que producen la electricidad tienen lugar en estos electrodos. Cada pila de combustible también tiene un electrolito, que transporta las partículas cargadas eléctricamente de un electrodo al otro, y funciona como catalizador, acelerando y controlando las reacciones que tienen lugar en los electrodos. (Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico, Mayandia, A., 2009).

El sistema opera con dos tipos de gases, combustible y oxidante, que pasan a través de las superficies del ánodo y cátodo opuestas al electrolito, respectivamente, y generan energía eléctrica por oxidación electroquímica del combustible, generalmente hidrógeno, y la reducción electroquímica del oxidante, normalmente oxígeno. Se transforma entonces la energía química, almacenada en el enlace H-H de la molécula  $H_2$ , en energía eléctrica y vapor de agua. (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).



Existen varios tipos de pilas de combustible, y cada una opera de una forma un poco diferente a las demás. Pero en términos generales, los átomos de hidrógeno entran en la pila de combustible por el ánodo donde por medio de una reacción química se les extraen sus electrones. Ahora los átomos de hidrógeno están ionizados, y transportan una carga eléctrica positiva. Los electrones cargados negativamente generan la corriente a través de las conexiones eléctricas y realizan el trabajo para el que se haya dispuesto la pila de combustible. El oxígeno entra en la pila de combustible por el cátodo y, en algunos tipos de pilas de combustible, allí se combina con los electrones que regresan del circuito eléctrico y los iones de hidrógeno que han viajado desde el ánodo a través del electrolito. En otros tipos de pilas de combustible, el oxígeno coge los electrones del cátodo y entonces viaja a través del electrolito hasta el ánodo, donde se combina con los iones de hidrógeno. En las pilas de combustible el electrolito juega un papel clave. Sólo debe dejar que pasen los iones apropiados del cátodo al ánodo. Si electrones libres u otro tipo de sustancias pudiesen pasar a través del electrolito, entorpecerían la reacción química. El electrolito puede estar compuesto de distintos materiales. El tipo de material del que está compuesto el electrolito determina el tipo de pila, que describiremos más adelante. (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).

## **8.2. Tipos de pilas de combustible**

Cada tipo de pila de combustible trabaja en unas condiciones de operación distintas de las demás, pero la diferencia más notable es su temperatura de funcionamiento. Los tipos de pilas más comunes actualmente son las que se muestran a continuación. La principal diferencia entre ellas, además de la temperatura de funcionamiento, es la forma en que se produce la reacción electroquímica que les permite generar potencia, lo cual implica diferencias en la potencia generada

### **a. Pilas de combustible alcalinas (AFC)**

Este tipo de pilas han sido utilizadas por la NASA en misiones espaciales, ya que pueden generar potencia de manera fiable con una eficiencia que ronda el 70%. Su temperatura de operación es de unos 250°C., y el electrolito está compuesto de una matriz empapada de una disolución acuosa de hidróxido de potasio, de ahí la denominación “Alcalina”. Estas pilas de combustible utilizan una solución de hidróxido de potasio en agua como electrolito y pueden usar una gran variedad de

metales no preciosos como catalizadores en el ánodo y el cátodo. Las pilas AFC de altas temperaturas pueden funcionar a temperaturas entre 100°C y 250°C. No obstante, diseños más modernos de estas pilas funcionan a temperaturas más bajas, entre 23°C y 70°C aproximadamente. Las pilas AFC son de alto rendimiento debido a la velocidad a la que tienen lugar las reacciones que se producen en ellas. También son muy eficientes, alcanzando un 60% rendimiento en aplicaciones espaciales. (Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico, Mayandia, A., 2009).

Su desventaja reside en su sensibilidad a la contaminación por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). De hecho, incluso una pequeña cantidad de CO<sub>2</sub> en el aire puede afectar el funcionamiento de la pila, haciendo necesario purificar tanto el hidrógeno como el oxígeno utilizados. Este proceso de purificación incrementa el coste de la pila, y además duran menos debido a la susceptibilidad que presentan a este tipo de contaminación. En ambientes como el espacio o el fondo del mar, esta desventaja no tiene lugar. Sin embargo, para competir en mercados más generales, estas pilas de combustible tendrán que hacerse más rentables. Las pilas AFC han demostrado ser suficientemente estables durante más de 8.000 horas de funcionamiento. Para ser viables desde el punto de vista económico en aplicaciones útiles a gran escala, tienen que superar las 40.000 horas. Posiblemente, éste es el obstáculo más significativo para la comercialización de esta tecnología. (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).

#### **b. Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC)**

existen principalmente dos empresas en Estados Unidos que se dedican a la comercialización de Pilas de Combustible de Carbonatos Fundidos: Fuel cell Energy y MC Power Corporation. Se trata de una tecnología muy prometedora y muestra de ello es el esfuerzo que se está realizando a través del programa americano SECA (Solid State Energy Conversión Alliance). Este programa involucra dentro de un mismo proyecto tanto a universidades como a empresas dedicadas al desarrollo de sistemas de energía. (Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico, Mayandia, A., 2009).

Las pilas MCFC son pilas de combustible de alta temperatura que utilizan un electrolito compuesto de una mezcla de sales de carbonato fundidas dispersas en una matriz cerámica porosa y químicamente inerte de óxido de litio-aluminio. Dado que operan a temperaturas extremadamente altas de entre 600 y 650°C, se pueden utilizar en el ánodo y el cátodo metales que no sean nobles como catalizadores, lo que reduce los costes. Las pilas MCFC pueden tener un rendimiento de aproximadamente el 60%, considerablemente más alto que las plantas de pilas de ácido fosfórico que sólo obtienen entre un 37 y un 42% de rendimiento. Las altas temperaturas de operación las convierten en unas buenas candidatas para aplicaciones en ciclos combinados, en los que el calor de escape se utiliza para generar electricidad de forma adicional. Cuando el calor de escape se utiliza en la cogeneración, la eficiencia térmica total puede alcanzar el 85%. Las pilas MCFC no necesitan un reformador externo para convertir en hidrógeno combustibles de energía más densa. Debido a las altas temperaturas a las que operan, estos combustibles se convierten en hidrógeno dentro de la propia pila de combustible mediante un proceso que se denomina conversión interna, lo que también reduce costes. Las pilas de carbonato fundido no son propensas a la contaminación por monóxido o dióxido de carbono (pueden incluso usar óxidos de carbono como combustible), permitiendo que se puedan usar en ellas como combustible gases fabricados del carbón. Aunque son más resistentes a las impurezas que otros tipos de pilas, los científicos están buscando formas de hacer la pila MCFC suficientemente resistente a las impurezas procedentes del carbón, como pueden ser el sulfuro y las partículas. La desventaja más importante de la tecnología existente de MCFC es la duración. Las altas temperaturas a las que operan estas pilas y el electrolito corrosivo que se utiliza en ellas, hacen que sus componentes se deterioren, reduciendo la duración de la pila. (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).

**c. Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)**

La pila de Ácido Fosfórico se encuentra dentro del grupo de generadores electroquímicos disponibles en el mercado. Existen varios cientos de sistemas de este tipo que se han fabricado, probado, comercializado e instalado a lo largo del mundo, y se utilizan para generación estacionaria de potencia. La mayoría de las



centrales eléctricas que las utilizan generan potencias de entre 50 y 200 kW., pero también existen estaciones que operan con potencias de entre 1MW y 5MW. (Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico, Mayandia, A., 2009).

La tecnología de las pilas de ácido fosfórico es la más madura de las que se utilizan hoy en día. Las pilas PAFC utilizan un electrolito de ácido fosfórico concentrado al 100% ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) retenido de una matriz de carburo de silicio y opera a unas temperaturas que se encuentran entre 150 y 220°C. El ácido fosfórico concentrado es un ácido relativamente estable, que permite operar a estas temperaturas. A temperaturas menores, el envenenamiento del electro-catalizador del ánodo (usualmente platino) con CO y la pobre conducción iónica en el electrolito empieza a ser problemáticos. Los electrodos consisten típicamente en platino y carbono. La pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC) es considerada como la primera generación de pilas de combustible modernas. Es uno de los tipos de pilas de combustible más desarrollados y el más usado en la actualidad (existen más de 200 unidades en uso actualmente). (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).

#### **d. Pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC)**

Las pilas de membrana polimérica (PEM), también llamadas pilas de combustible de membrana de intercambio de protones, proporcionan una densidad energética elevada y tienen la ventaja de ser ligeras y tener un tamaño pequeño, si se las compara con otras pilas. Las pilas PEM usan como electrolito un polímero sólido y electrodos porosos de carbono que contienen un catalizador de platino. Necesitan hidrógeno y oxígeno y agua, y no requieren el uso de fluidos corrosivos como otras pilas de combustible. Normalmente usan hidrógeno puro como combustible almacenado en depósitos o convertidores incorporados. Las pilas de membrana de electrolito polímero operan a relativamente bajas temperaturas, (80°C). Esto permite que arranquen rápidamente al necesitar menos tiempo de calentamiento. Esto representa una ventaja, ya que supone menor desgaste entre los componentes del sistema, y por tanto aumenta la duración del mismo. Estas pilas operan con un catalizador de platino, lo que encarece mucho el sistema. Además, el catalizador de platino es extremadamente sensible a la contaminación

por CO, por lo que es necesario utilizar un reactor adicional para reducir el nivel de CO en el gas combustible. Este problema se agudiza cuando el hidrógeno empleado proviene de un combustible de alcohol o de hidrocarburo. Actualmente, se están estudiando reemplazar estos catalizadores por los de platino/rutenio, que presentan más resistencia a la contaminación por CO. Las pilas PEM se usan fundamentalmente para aplicaciones en el transporte e instalaciones estacionarias. Debido a su rapidez para el arranque, baja sensibilidad a la orientación, y su relación favorable entre peso y energía producida, las pilas de combustible PEM son especialmente adecuadas para su uso en vehículos de pasajeros, como por ejemplo coches y autobuses. Un obstáculo importante para el uso de estas pilas en vehículos es el almacenamiento del hidrógeno. La mayoría de los vehículos que funcionan con hidrógeno deben almacenarlo en el propio vehículo en forma de gas comprimido dentro de depósitos presurizados. Debido a la baja densidad energética del hidrógeno, es difícil almacenar suficiente hidrógeno a bordo para conseguir que los vehículos tengan la misma autonomía que los que usan gasolina (entre 200 y 250 Km.). Combustibles líquidos de alta densidad tales como metanol, etanol, gas natural, gas de petróleo licuado y gasolina, pueden usarse como combustible, pero entonces los vehículos deben de contar con un procesador de combustible a bordo para convertir el metanol en hidrógeno. Esto incrementa los costes y las necesidades de mantenimiento. Aunque el procesador también desprende dióxido de carbono (un gas invernadero), la cantidad desprendida es menor que la de los motores convencionales de gasolina. (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).

**e. Pila de combustible de óxido sólido (SOFC)**

Esta tecnología de pilas de combustible parece ser bastante prometedora para aplicaciones industriales y de generación de potencia a gran escala. Varias empresas dedicadas a la investigación y desarrollo de estos equipos, ven también la posibilidad de utilizarlas en aplicaciones de automoción, así como en unidades auxiliares de generación de potencia o APU (Auxiliary Power Units). (Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico, Mayandia, A., 2009).

Las pilas de combustible SOFC usan como electrolito un componente de cerámica sólido y no poroso. Al ser el electrolito sólido, las pilas no se tienen que construir con una configuración laminar, como ocurre con las otras pilas. Se espera que las pilas SOFC tengan un rendimiento en la conversión de combustible en electricidad de entre el 50-60%. En aplicaciones cuya finalidad es captar y utilizar el calor que desprende el sistema (cogeneración), el rendimiento total del combustible puede llegar hasta el 80-85%. Las pilas de óxido sólido operan a temperaturas muy elevadas (alrededor de los 1000° C). Las elevadas temperaturas hacen que no sea necesario utilizar metales nobles como catalizadores, reduciendo el coste. También permite a la pila SOFC convertir los combustibles internamente, lo que supone la posibilidad de usar diferentes combustibles y reduce el coste asociado que supone añadir un convertidor al sistema. Estas pilas también son las más resistentes al sulfuro. Además, no se contaminan con monóxido de carbono (CO), que puede incluso ser utilizado como combustible. Esto permite el uso en estas pilas de gases procedentes del carbón. Las elevadas temperaturas tienen desventajas: su arranque es lento y necesitan abundante protección para evitar que el calor se escape y para proteger al personal que trabaja con ellas, lo que puede ser aceptable para algún tipo de aplicaciones, pero no para el transporte y para algunos aparatos portátiles. Las altas temperaturas afectan también a la duración de los materiales que se utilizan. El desarrollo de materiales a bajo precio y de larga duración a las temperaturas a las que funciona la pila, es la clave del reto tecnológico al que se somete esta tecnología. Los científicos están estudiando en la actualidad el potencial para desarrollar pilas SOFC que funcionen a 800 °C o menos, que tengan menos problemas de duración y que cuesten menos. Las pilas SOFC a temperaturas más bajas producen menos electricidad, y no se han encontrado materiales para estas pilas que funcionen a este rango de temperaturas. (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).

**f. Pilas de combustible de conversión directa de metanol (DMFC)**

Las pilas que funcionan directamente con metanol han generado un enorme interés en aplicaciones portátiles. El hecho de disponer de un depósito que contenga un combustible líquido, similar al de los vehículos autopropulsados, ofrece la posibilidad de rellenarlo cada vez que sea necesario. Además, se podría decir que

es más seguro que un depósito lleno de hidrógeno para usar como combustible, ya que el metanol no es tan volátil como éste último. Por otra parte, la disponibilidad del metanol es enorme en comparación con el hidrógeno, ya que, además, puede obtenerse sin demasiadas dificultades del reformado de la gasolina o de la biomasa. (Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico, Mayandia, A., 2009).

La pila de conversión directa de metanol es similar a las pilas PEMFC en que utiliza una membrana polimérica como electrolito. De todas formas, un catalizador en el ánodo de la DMFC extrae hidrógeno del metanol líquido, eliminando la necesidad de un reformador del combustible. Mientras que representan una muy atractiva solución a los problemas de almacenamiento y transporte de hidrógeno, el principal problema a la hora de las aplicaciones comerciales de este tipo de pilas de combustible estriba en su relativamente bajo rendimiento frente a las pilas PEMFC que utilizan hidrógeno como combustible. La tecnología de la pila de combustible de metanol directo es relativamente nueva si se compara con la de otras pilas de combustible que funcionan con hidrógeno, y su investigación y desarrollo va 3 ó 4 años por detrás de las otras pilas de combustible. (Producción de hidrógeno, León, I. 2010).

### 8.3. Relación pila, electrolito, ventaja y desventaja

Tabla 7

Relación pila, electrolito, ventajas y desventajas

TIPO	ELECTROLITO	TEMPERATURA DE OPERACIÓN °C	USOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Membrana polimérica (PEMFC)	Polímero sólido	60-100	Generación estacionaria. Portátiles. Vehículos.	Electrolito sólido reduce corrosión y mantenimiento. Baja temperatura. Arranque rápido.	Catalizadores costosos. Sensible a impurezas en H <sub>2</sub> u otro combustible.
Alcalina (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio	90-100	Espacio. Militar.	Reacción catódica más rápida en electrolito alcalino. Mayor eficiencia.	Sensible a impurezas.
Ácido fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico líquido	175-200	Generación estacionaria. Portátiles.	85% eficiencia en cogeneración de electricidad y calor. Acepta H <sub>2</sub> impuro.	Catalizadores de Pt. Baja corriente y potencia. Gran peso y volumen.
Carbonatos fundidos (MFCF)	Solución líquida de litio, sodio y potasio	600-1000	Generación estacionaria.	Ventajas por alta temperatura: mayor eficiencia, catalizadores más baratos.	Corrosión debido a altas temperatura. Baja vida útil.
Óxidos sólidos (SOFC)	Óxido de Zr sólido con adiciones de Itrio	600-1000	Generación estacionaria.	Ventajas por alta temperatura. Ventajas electrolito sólido.	Corrosión debido a altas temperatura. Baja vida útil.

Fuente: <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/42a6b2ae8936a.pdf>

#### **8.4. Beneficios de las pilas de combustible**

Los beneficios de la utilización de las pilas de combustible para la generación de energía a partir del hidrógeno son múltiples, entre ellos los más importantes son los siguientes:

➤ **Beneficios medioambientales:**

Este beneficio se refiere a que las pilas no emiten o casi no emiten productos contaminantes y no tiene unas emisiones acústicas.

➤ **Altos niveles de eficiencia**

Dependiendo del tipo de pila de combustible y del diseño del sistema, los niveles de eficiencia de combustible a electricidad se encuentran entre el 30 y el 60 por ciento (LHV- poder calorífico).

➤ **Fiabilidad:**

La pila de combustible tiene la capacidad de cumplir una determinada función bajo ciertas condiciones durante el tiempo

➤ **Calidad de la energía**

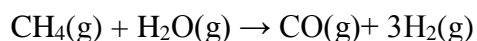
La salida la energía eléctrica de las pilas de combustible puede ser configurada para ser controlada por ordenador y suministrada.

### **9. GAS DE SÍNTESIS:**

Gas de síntesis se refiere generalmente a una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno. La proporción de hidrógeno al monóxido de carbono varía según el tipo de alimentación, el método de producción y el uso final del gas.

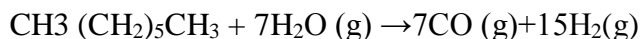
#### **9.1.Obtención**

- Reformación de gas natural o de hidrocarburos livianos en presencia de vapor de agua. (El más barato y sencillo).
- Oxidación parcial de hidrocarburos en presencia de oxígeno puro con o sin vapor de agua (se puede usar una gran cantidad de compuesto como materia prima).
- Gasificación de coque o carbón.
- Reformación de gas natural: Una ruta importante para la producción de gas de síntesis es el vapor reformado de gas natural sobre un catalizador de níquel promovido en unos 800 ° C:

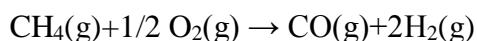


Esta ruta se utiliza cuando el gas natural es abundante y barato, como es en Arabia Saudita y los Estados Unidos.

- Reformación de naftas: es una mezcla de hidrocarburos desde aproximadamente C5-C10, la reacción de reformado de vapor puede representarse:



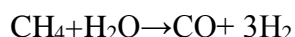
Cuando el peso molecular del hidrocarburo aumenta (menor relación H/C de alimentación), la relación entre producto  $\text{H}_2/\text{CO}$  disminuye. La relación entre producto  $\text{H}_2/\text{CO}$  es aproximadamente 3 para metano, 2.5 para etano, 2.1 para heptano y menos de 2 por hidrocarburos más pesados. Oxidación no catalítica parcial de hidrocarburos se utiliza también para producir gas de síntesis, pero la proporción de  $\text{H}_2/\text{CO}$  es inferior a la de reformado con vapor:



Cuando residuos son parcialmente oxidados por el oxígeno y el vapor a 1400–1450 ° C y 55–60 atmósferas, el gas se compone de partes iguales de hidrógeno y monóxido de carbono.

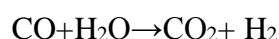
## 9.2. Usos del gas de síntesis

El nombre gas de síntesis proviene de su uso como intermediario en la creación de gas natural sintético y para la producción de amoníaco o metanol. El gas de síntesis también se utiliza como producto intermedio en la producción de petróleo sintético, para su uso como combustible o lubricante a través de la síntesis de Fischer-Tropsch, y previamente al proceso Mobil para convertir metanol en gasolina. El gas de síntesis está compuesto principalmente de hidrógeno, monóxido de carbono, y muy a menudo, algo de dióxido de carbono. Posee menos de la mitad de densidad de energía que el gas natural. Se ha empleado y aún se usa como combustible o como producto intermedio para la producción de otros productos químicos. Cuando este gas se utiliza como producto intermedio para la síntesis industrial de hidrógeno a gran escala (utilizado principalmente en la producción de amoníaco), también se produce a partir de gas natural (a través de la reacción de reformado con vapor de agua) como sigue.



La reacción es una reacción de equilibrio y por lo tanto no todo el metano logra reformarse a hidrógeno.

Por otro lado, también se presenta la reacción secundaria de conversión (reacción de shift, en inglés), la cual ayuda a convertir parte del vapor en hidrógeno al reaccionar con el monóxido de carbono. Esta también es una reacción de equilibrio y tanto el CO como el CO<sub>2</sub> se encuentran presentes en la mezcla resultante:



La primera reacción es endotérmica (consume calor para llevarse a cabo) y la segunda reacción es exotérmica (libera calor al ocurrir).

El hidrógeno debe separarse del CO<sub>2</sub> para poder usarlo. Esto se realiza principalmente por adsorción por oscilación de presión (PSA), limpieza de las aminas producidas y el empleo de reactores de membrana.

El gas de síntesis producido en las grandes instalaciones para la gasificación de residuos puede ser utilizado para generar electricidad.

Los procesos de gasificación de carbón se utilizaron durante muchos años para la fabricación de gas de alumbrado (gas de hulla) que alimentaba el alumbrado de gas de las ciudades y en cierta medida, la calefacción, antes de que la iluminación eléctrica y la infraestructura para el gas natural estuvieran disponibles. ([www.gecrio.com/syngas-colaboracion-con-utad-portugal/](http://www.gecrio.com/syngas-colaboracion-con-utad-portugal/), Planta piloto SYNGAS.UTAD)



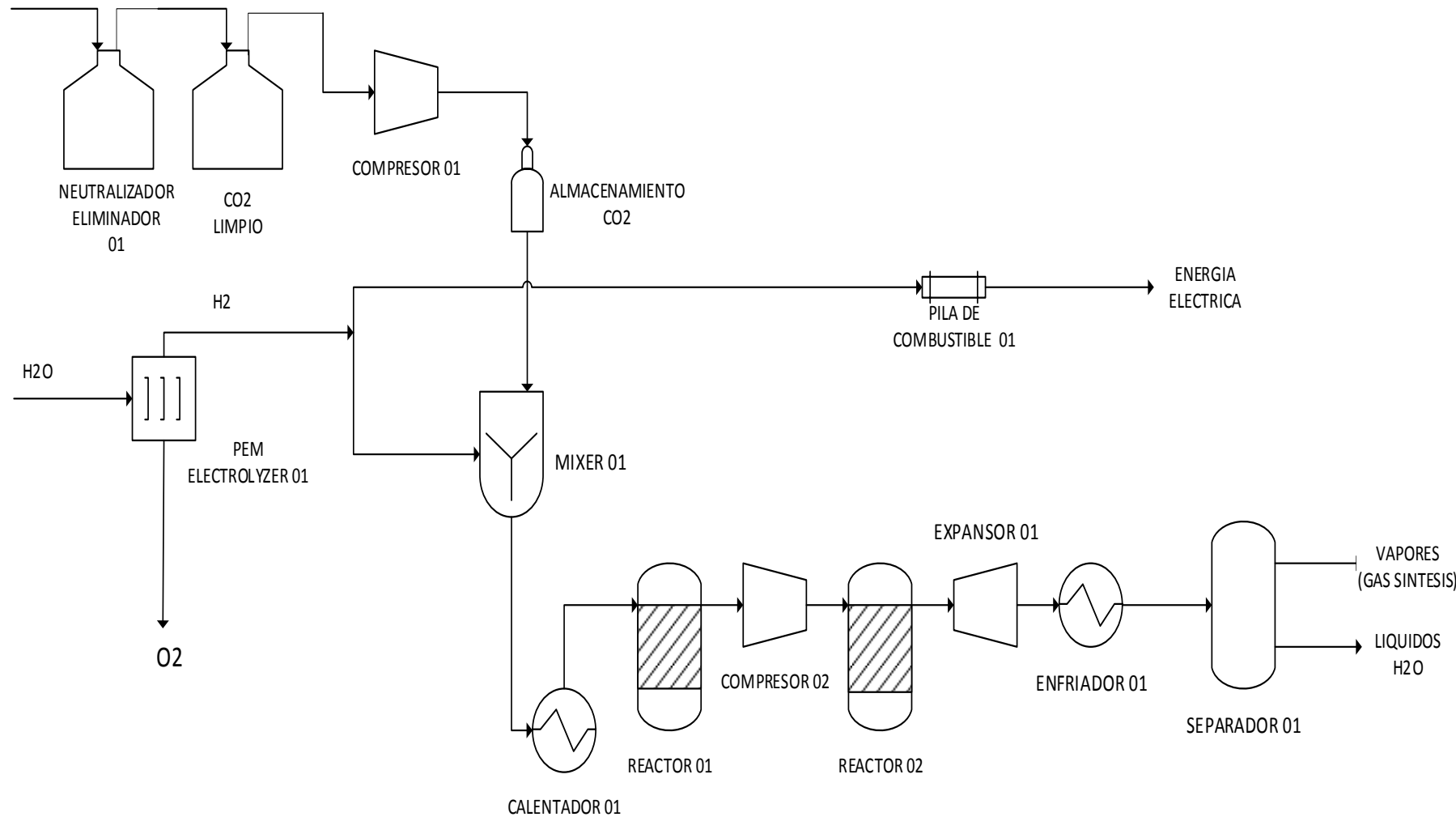
---

**CAPÍTULO III**  
**METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

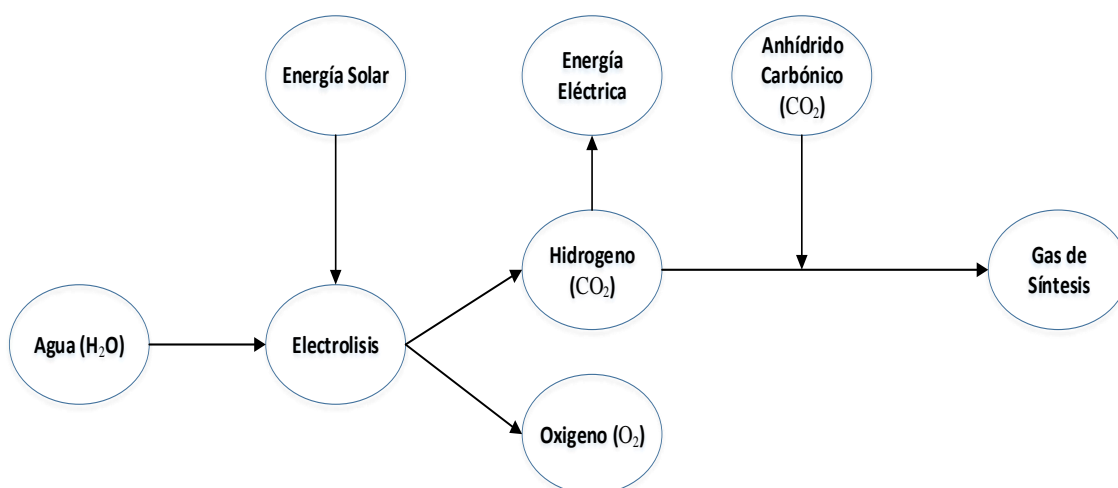
---

DIAGRAMA DE PROCESO

CO2 FERMENTACION



## DIAGRAMA FLUJO



El agua se lleva a un proceso de electrolisis mediante el uso de energía solar para la producción de hidrogeno y oxígeno; este hidrogeno mediante la pila de combustible produce energía eléctrica, además este mismo al unirse con el CO<sub>2</sub> recuperado de la fermentación de la destilería NAYLAMP produce el gas de síntesis.

### Contrastación de hipótesis:

Para la contratación de la hipótesis se realizó el mismo proceso metodológico pero esta vez sin el uso de la pila de combustible y para la producción de gas de síntesis no se realizó con las condiciones presión y temperatura adecuadas.

## 1. Metodología Experimental

### 1.1.Diseño, construcción y proceso de neutralizador eliminador de CO<sub>2</sub>

Permanganato de Potasio (KMnO<sub>4</sub>) al 1% p/v para 2,5 L de solución.

$$\% \frac{P}{V} = \frac{\text{Gr de KMnO}_4}{\text{ml de solución}} \times 100$$

$$1\% \frac{\text{gr}}{\text{ml}} = \frac{x}{2500 \text{ ml}} \times 100$$

$$x = \frac{\frac{1 \text{ gr}}{\text{ml}} \times 2500}{100 \text{ ml}}$$

$$X = 25 \text{ gr}$$

Se utiliza 25 gr de  $\text{KMnO}_4$  Para lograr una concentración de 1% P/V, con este Permanganato de Potasio se procederá a neutralizar el  $\text{CO}_2$ .

### **2.1. Experimentación de permanganato de potasio:**

- a. Se pesan 25 gr de permanganato de potasio en la balanza analítica para los 2,5 litros de solución que se preparará (ver figura 28- Anexo)
- b. Al vaso de precipitado con los 25 gr de  $\text{KMnO}_4$  se le agrega agua destilada hasta la altura de 175 ml para poder disolver las partículas las cuales aún no estas disueltas en su totalidad. (ver figura 29- Anexo)
- c. Se vierte en una fiola una porción de la disolución de Permanganato ( $\text{KMnO}_4$ ), se le agrega agua destilada, se homogeniza hasta disolver las partículas restantes luego se enraza a 1L; luego se preparó otra fiola de 1L y finalmente el  $\frac{1}{2}$  L restante hasta completar los 2,5L que necesitábamos. (ver figura 30- Anexo)

5.- Ahora se vierten todas las fiolas preparadas al recipiente de 3L y de esa manera se obtiene la solución de permanganato ( $\text{KMnO}_4$ ) al 1% p/v para 2,5 L de solución. (ver figura 31- Anexo)

### **2.2. Diseño, construcción y proceso de neutralizador de $\text{CO}_2$**

#### **2.2.1. Diseño y construcción**

El diseño del Neutralizador eliminador está comprendido por varios tipos de tubo de PVC ( $\frac{1}{2}$ ", 1", 3" 4") en la cuales están incluidas las reducciones y niples, válvulas globo, mangueras ( $\frac{1}{2}$ ", 3"), un compresor y un extintor con manómetro. Este equipo ayuda a la recuperación del  $\text{CO}_2$  cómo para la obtención de este mismo gas limpio ( $\text{CO}_2$ ) mediante el uso de la solución de Permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) 1% P/V obtenida.

- Se mide un tubo de  $\frac{1}{2}$ " de 60 cm de largo, al cual se le hará perforaciones con un taladro de broca de 4mm a la mitad del tubo, es decir en el espacio 30 cm para el paso de  $\text{CO}_2$ , y los cm restantes se dejarán intactos. (ver figura 32- Anexo)
- Se cortan dos tubos de 4" uno de 70 cm y el otro de 1m; en el primer tubo de 4" ingresará el tubo  $\frac{1}{2}$ " mostrado anteriormente y la solución de Permanganato de Potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) al 1% P/V, el segundo tubo servirá como un pre almacenamiento antes de alimentar al compresor de  $\text{CO}_2$  limpio ya que puede arrastrar Permanganato de Potasio del primer tubo al paso del  $\text{CO}_2$ . (ver figura 33- Anexo)

- Para cerrar los tubos gruesos de 4'' utilizamos tapas de 4'' (sólo para la parte inferior), en ambos tubos. (ver figura 34- Anexo)
- A las tapas de 4'' de la parte superior de los tubos gruesos de 4'' se les hacen 3 perforaciones de 1/2'' dónde se coloca niples y uniones mixtas que sirven para las entradas y salidas del CO<sub>2</sub>. (ver figura 35- Anexo)
- Para asegurar que el CO<sub>2</sub> que se va a recuperar no tenga alguna fuga se coloca empaquetaduras tanto por la parte inferior como superior de cada perforación, luego introducimos niples de 1/2'' a la tapa de media para la colocación de uniones mixtas de 1/2'' se hace en ambas tapas de 4''. (ver figura 36- Anexo)
- Se coloca teflón en cada niple para evitar fugas luego se enrosca las uniones universales mixtas de 1/2'' en cada una de tapas de 4''). (ver figura 37- Anexo)
- Solo a 3 uniones universales mixtas de las tapas de 4'' se coloca un tubo de 1/2'' de 10 cm de largo, luego se enrosca un codo de 1/2'' a cada tubo los cuáles se unen mediante otro tubo de 1/2'' de 5 cm de longitud para hacer la conexión entre las 2 tapas (para evitar fuga se coloca teflón). (ver figura 38- Anexo)

Quedando 02 uniones universales mixtas libres las cuales se utilizan para que una de ellas sea usada para la alimentación de CO<sub>2</sub> en él se colocan continuamente un tubo de 1/2'' de 10cm continuado con un codo de 1/2'', el otro extremo del codo se adiciona un tubo de 1/2'' de 3cm seguido de una reducción de tubo de 1'' a 1/2'', para luego colocar una conexión de reducción de tubo de 3'' a 1'' la cual estará unida a una manguera de 1m de largo por dónde pasará directamente el gas desde el fermentador. (ver figura 39- Anexo)

- En la otra unión universal mixta libre se coloca un tubo de 1/2'' de 3cm en la cual irá pegada una T; en cada salida va unido dos tubos de 1/2'' de 3cm continuamente a cada salida se coloca una válvula de globo, y una de estas regula el paso de CO<sub>2</sub> limpio al extintor mientras la otra nos ayuda con el desfogue de CO<sub>2</sub> en caso que el tubo se llene de este gas. (ver figura 40- Anexo)
- Se une el tubo de 60 cm de 1/2'' al tubo de alimentación de CO<sub>2</sub> con el propósito de limpiar este gas a través de la solución de Permanganato (KMnO<sub>4</sub>), (1=entrada de permanganato de potasio, 2= entrada de CO<sub>2</sub>, 3=paso de CO<sub>2</sub> limpio, 4= salida de CO<sub>2</sub> a extintor, 5= desfogue de CO<sub>2</sub>). (ver figura 41- Anexo)

- Se conecta la manguera al tubo de reducción de 3'' a 1'' y se asegura mediante abrazaderas de 3''. (ver figura 42- Anexo)
- Finalmente, el equipo nos queda listo para la captura del CO<sub>2</sub>. (ver figura 43- Anexo)

### **2.2.2. Proceso de recuperación de CO<sub>2</sub>**

#### **a. Recuperación de CO<sub>2</sub>:**

Al tener el equipo listo se procede a recuperar el CO<sub>2</sub>

- Primero se hermetiza el Tanque 01 de fermentación de la destilería NAYLAMP para hacer paso a la recuperación de CO<sub>2</sub>; de esta manera evitamos alguna fuga. (ver figura 44 - Anexo)
- Antes de comenzar la recuperación de CO<sub>2</sub> se agrega los 2,5L de solución de Permanganato (KMnO<sub>4</sub>) al tubo grueso dónde también se encuentra la alimentación de CO<sub>2</sub> (ver figura 45- Anexo)
- Para unir la manguera de 3'' a la brida de dónde se obtiene el CO<sub>2</sub> del fermentador se coloca 02 abrazaderas de 3''. (ver figura 46- Anexo)
- Primero se comprueba que el CO<sub>2</sub> está pasando por el equipo. Para ello se abre la válvula de desfogue. (ver figura 47- Anexo)
- Se conecta la manguera de ½'' desde la salida del CO<sub>2</sub> limpio al compresor y se le coloca abrazaderas de ½'' para asegurar y evitar fugas. (ver figura 48- Anexo)
- Finalmente se conecta otra manguera de ½'' desde la salida del compresor al extintor para el almacenamiento del gas y posterior uso de este. (También se le coloca abrazaderas de ½ para evitar fugas). (ver figura 49- Anexo)

- Una vez instalado el equipo, se procede a recuperar el CO<sub>2</sub> (ver figura 50 - Anexo)
- Y se controla el almacenamiento de CO<sub>2</sub> mediante el manómetro que cuenta el extintor para evitar accidentes. (ver figura 51 - Anexo)

### **3.1.Diseño y construcción de celda electrolítica**

#### **3.1.1. Diseño de la celda electrolítica:**

Para llevar a cabo el proceso de electrólisis se procede a diseñar una celda electrolítica en ella se obtendrá oxígeno e hidrógeno, este último se alimentará al equipo PEM FUEL CELL ELECTROLYZER dónde se producirá energía.

- Se hacen 2 pequeños orificios en la parte inferior del recipiente, en el cual se enroscar los pernos de 1 ½'' que servirán como electrodos. (ver figura 52 - Anexo)
- Se introducen 2 pernos de 1 ½'' en cada uno de los orificios con ayuda de un desarmador, en un perno de 1 ½'' un cable de color rojo y en el otro perno un cable de color negro cada uno con un terminal de crimpado, y en la parte interior con unos tarugos de 1cm de longitud para que tenga firmeza entre el perno, recipiente y tarugo. (ver figura 53 - Anexo)
- Se coloca la tapa del recipiente y se hace orificios grandes con el fin de que puedan ingresar dos jeringas las que facilitan medir la cantidad de O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> que se acumulará en ellas producto de la electrólisis. (ver figura 54 - Anexo)
- Se coloca una manguera en cada orificio de las jeringas por dónde saldrá el O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. (ver figura 55 - Anexo)

### **3.2.Realizar el proceso de electrolisis para la obtención del hidrógeno.**

Se lleva a cabo por dos métodos de producción los cuales se plantean a continuación:

#### **3.2.1. Con la celda electrolítica**

- Para trabajar con la celda electrolítica se conecta esta al panel solar, cada uno identificado con sus respectivos colores de cables, a la vez se mide el voltaje para saber con cuanto de voltaje comenzará a trabajar el equipo. (ver figura 56 - Anexo).

- Se vierte 250 ml de solución salina, en el cual el NaCl funcionara con electrolito para acelerar el proceso de producción de hidrogeno. (ver figura 57 - Anexo).
- Para saber la producción de hidrogeno se procede a succionar con el otro extremo de la jeringa la cantidad obtenida por electrolisis. Verificándose que la relación de ambos es de 2 a 1. (ver figura 58 - Anexo).
- Se sabe que el hidrogeno en grandes cantidades es explosivo al exponer al fuego por ello con una pequeña cantidad de hidrogeno obtenido en celda electrolítica se expuso a una vela encendida causando una pequeñísima explosión de los cuales fuimos testigos y de esta manera se comprobó la presencia de este gas. (ver figura 59 - Anexo).

### **3.2.2. Con el PEM ELECTROLYZER**

- Para comenzar a trabajar con el PEM ELECTROLYZER, se inyecta por el lado del oxígeno 0.6ml de agua destilada el cual producirá 300ml de Hidrogeno. (ver figura 59 - Anexo).
- según las especificaciones del equipo este puede trabajar con corriente de entrada de 3 voltios el cual trabajará con el panel solar el cual al ser expuesto al sol nos proporciona el voltaje requerido. (ver figura 60 - Anexo).
- Realizada la conexión del panel con el PEM, este inicia su proceso producción de Hidrogeno y Oxigeno el cual nos da una relación de 2 a1 como se observa en la imagen. (ver figura 61 - Anexo).
- Una vez obtenido el hidrogeno se procede a comprobar su presencia mediante el método realizado anteriormente en la celda electrolítica. (ver figura 62 - Anexo).

## **4.1.Convertir la energía química de la electrólisis del agua en energía eléctrica utilizando el hidrógeno y una pila de combustible.**

Como se sabe la pila de combustible ubicada dentro del PEM REVERSIBLE FUEL CELL transforma los electrones obtenidos en la electrolisis del agua en energía eléctrica. A continuación, se explica la manera de utilizar el equipo y la obtención del hidrogeno para la producción de energía eléctrica.

- Se llena el PEM REVERSIBLE FUEL CELL con 0.6 ml de agua destilada por la parte inferior del oxígeno. (ver figura 63 - Anexo).
- Colocación de PEM REVERSIBLE FUEL CELL al pequeño carro prediseñado. (ver figura 64 - Anexo).



- Conexión de las mangueras de las jeringas al PEM REVERSIBLE FUEL CELL donde se almacenarán el hidrogeno e hidrogeno producido. (ver figura 65 - Anexo).
- Conexión del panel solar a PEM REVERSIBLE FUEL CELL para que se lleve a cabo el proceso. (ver figura 66 - Anexo).
- Para que empiece a trabajar el equipo el panel solar debe proporcionar un voltaje de 3voltios y de esta manera se llevara el proceso. (ver figura 67 - Anexo).
- Iniciado el proceso se puede observar la producción de hidrogeno y oxigeno que se comprueba mediante la acumulación de dichos gases en las jeringas. (ver figura 68 - Anexo).
- Una vez producido el hidrogeno y oxigeno se conecta los cables del carro al PEM REVERSIBLE FUEL CELL con el objetico que energía química se convierta en energía eléctrica. (ver figura 69 - Anexo).

#### 4.2. Obtener gas de síntesis ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) a partir de hidrogeno que sale de la pila de combustible con $\text{CO}_2$ .

Para la obtención de gas de síntesis se optó por simular el proceso en el simulador Aspen Hysys V8.0 (debido a las condiciones elevadas de temperatura y presión), el cual nos permitió demostrar que, si se puede obtener gas de síntesis, mediante el hidrogeno producido por el PEM ELECTROLYZER mezclado con el  $\text{CO}_2$  recuperado de la fermentación; se les considera a estos componentes puros para llevar a cabo la simulación del gas de síntesis.

- Se inicia agregando los componentes que son: Hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), Monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), Agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y Metano ( $\text{CH}_4$ ).

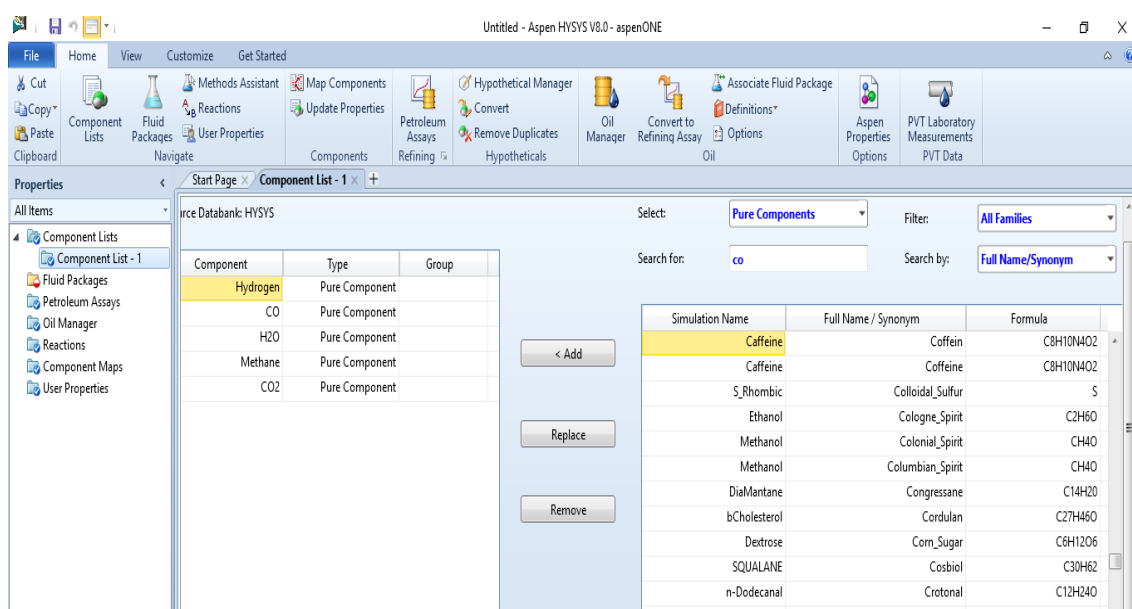


Figura 07: Componentes de simulación

➤ Se agrega el paquete fluidos Peng Robinson

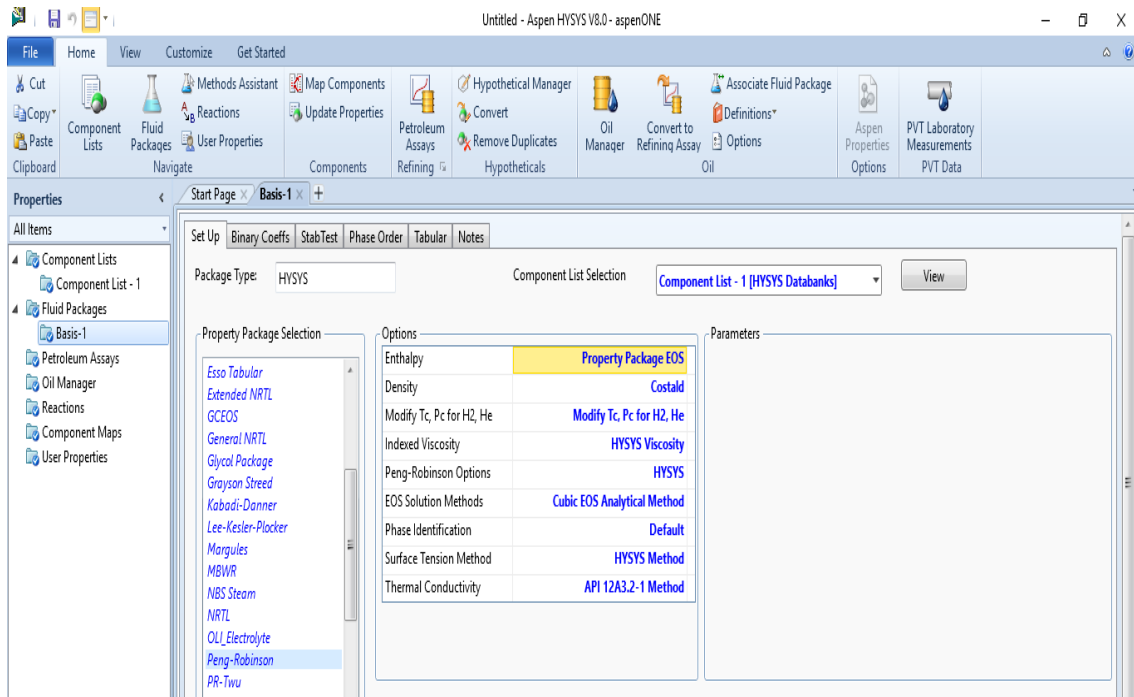


Figura 08: Paquete de fluidos a componentes

➤ Se agrega la primera reacción de equilibrio, la cual se asocia posteriormente al paquete de fluidos agregado anteriormente.

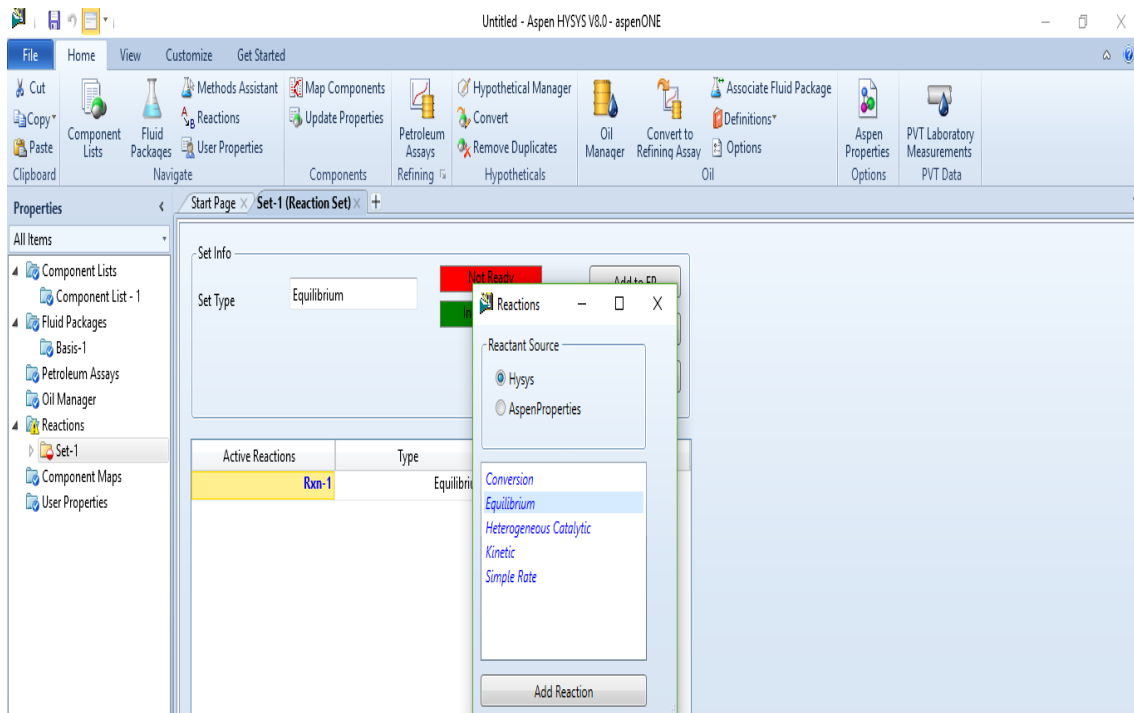


Figura 09: Reacción para primer reactor (ERV-100)

- Se agregan los componentes de la primera reacción con sus respectivos coeficientes estequiométricos. (reactantes (-) y productos (+))

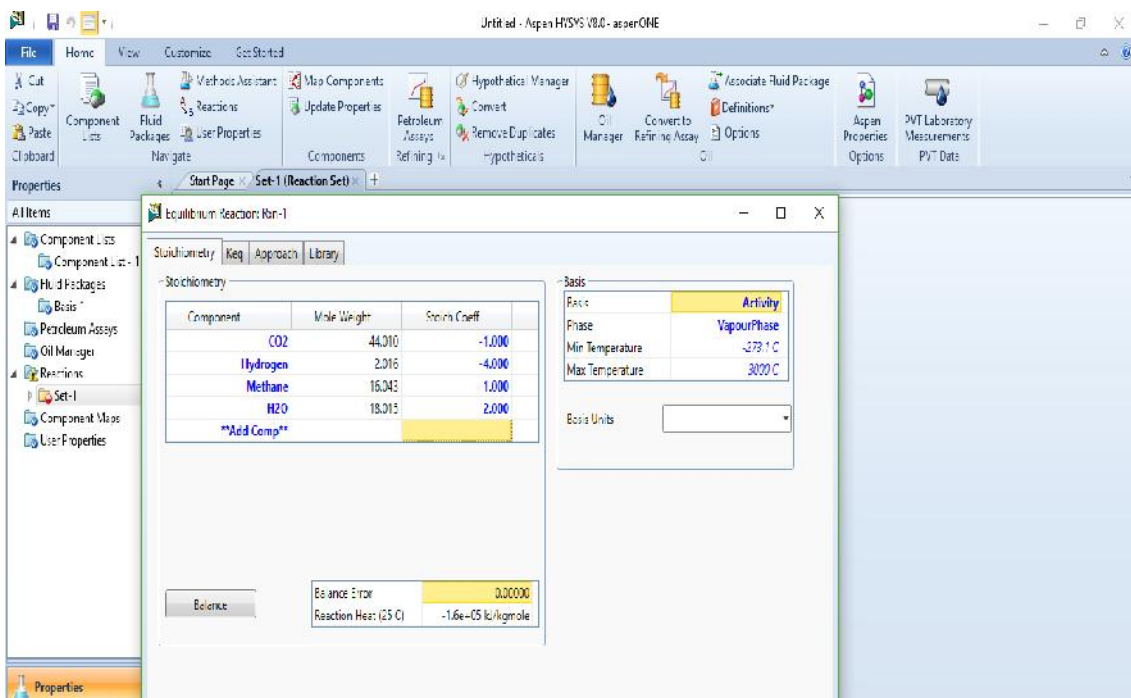
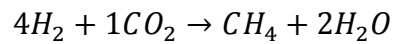


Figura 10: Balance estequiométrico de reacción

- Una vez realizados los pasos anteriores, el simulador nos confirma que la reacción es correcta.

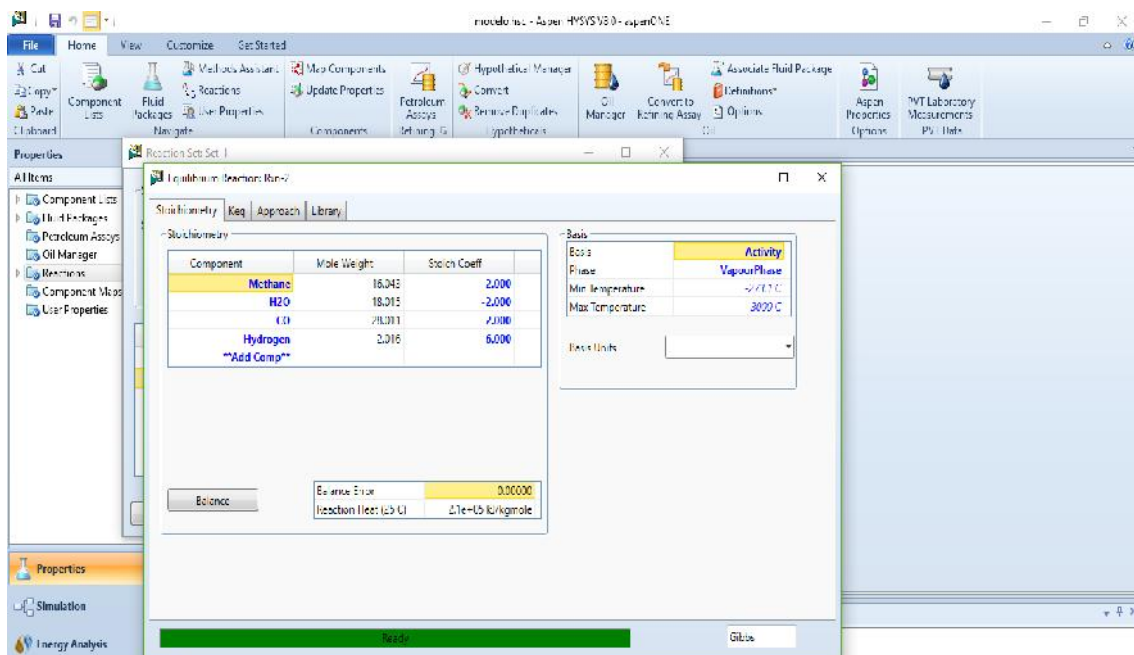


Figura 11: Confirmación lista para primer reactor

- Lo mismo se realiza con la segunda reacción de equilibrio, se agregan los componentes: CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, H<sub>2</sub>

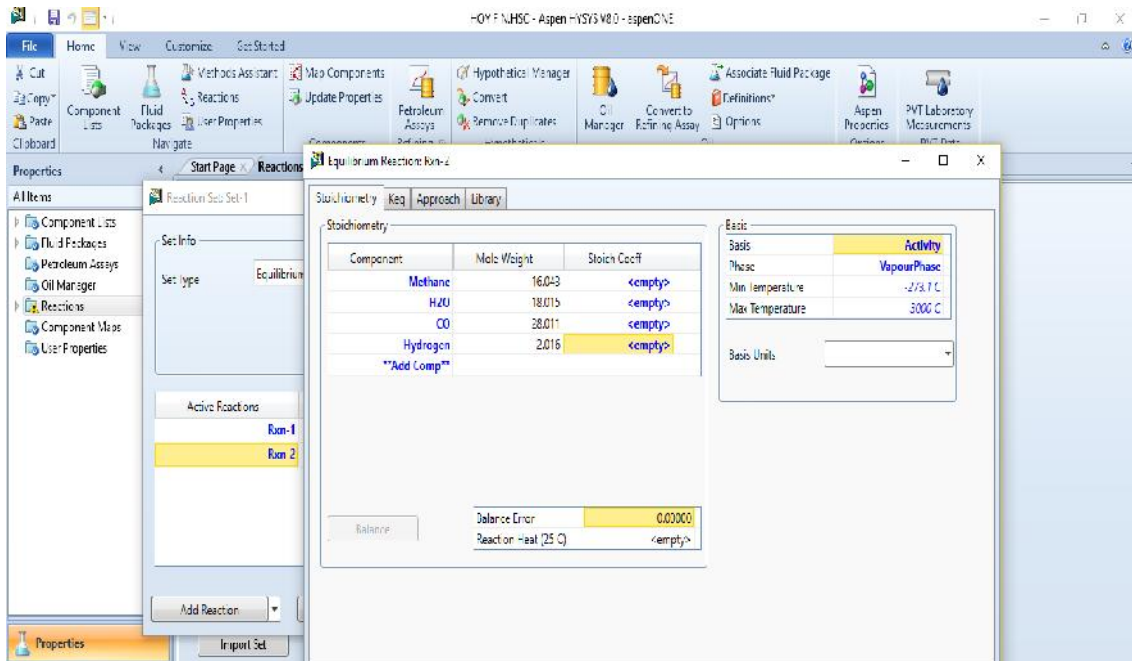


Figura 11: Reacción para segundo reactor

- Se coloca los coeficientes estequiométricos de cada componente según balance:

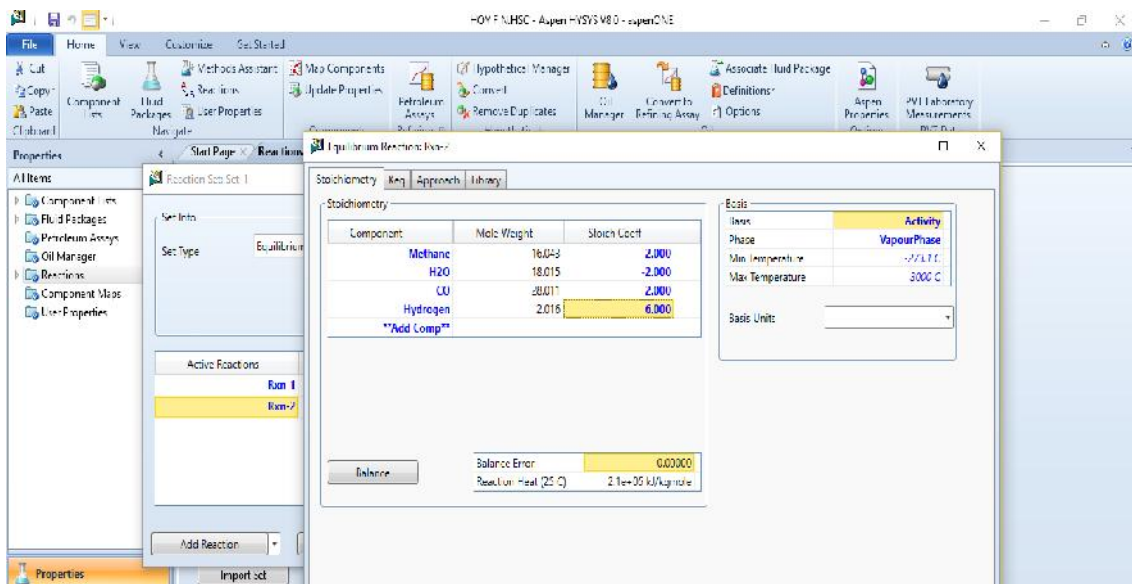
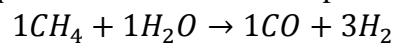


Figura 12: Balance estequiométrico de segunda reacción

- Agregados los pasos anteriores, el simulador nos confirma que la reacción es correcta.

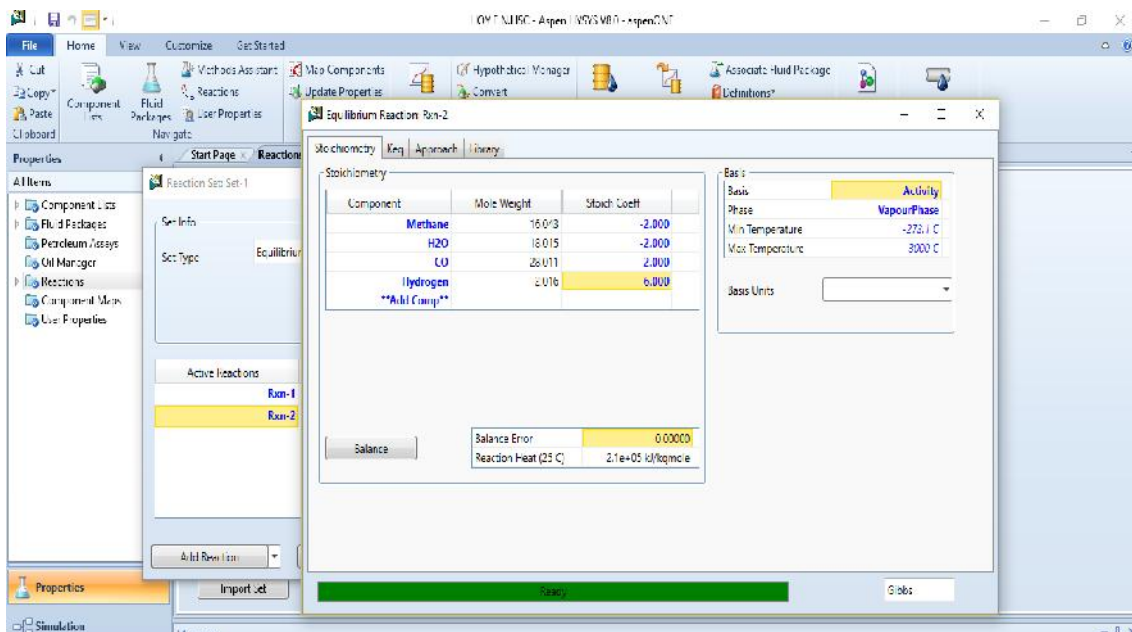


Figura 13: Confirmación de balance para el segundo reactor

- Se ingresa las 2 líneas de alimentación a las condiciones dadas en la figura.

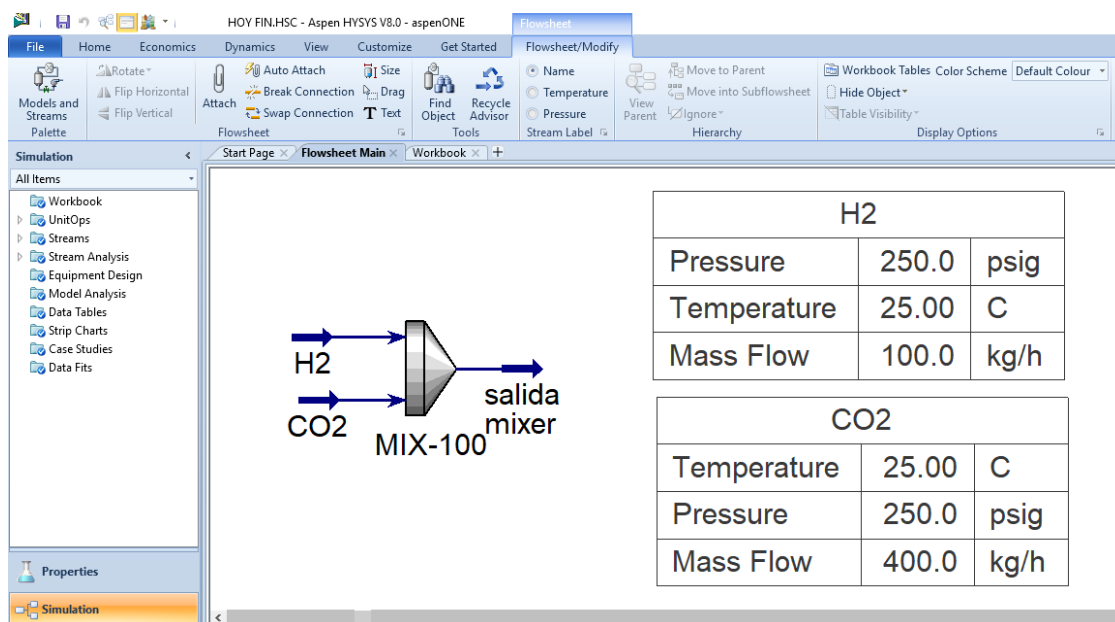


Figura 14: Componentes con sus respectivas condiciones de almacenamiento

- Primero se procede a colocar un mixer(mezclador) donde se realizará la mezcla de estos 2 gases

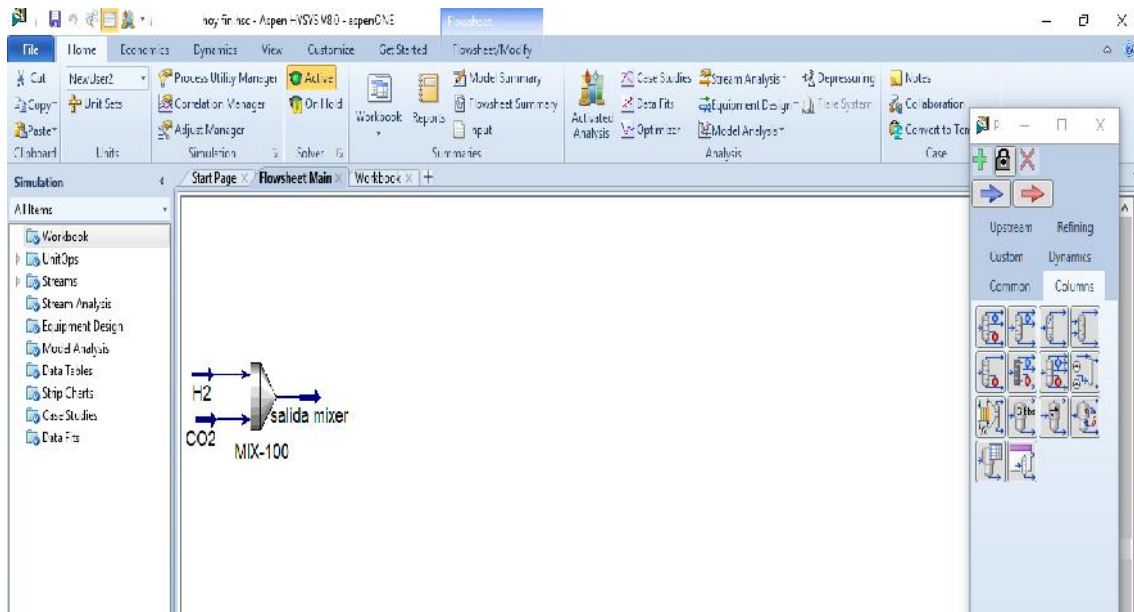


Figura 15: Conexión de mixer para mezcla de componentes

- El producto de esta mezcla se alimenta a un intercambiador de calor(calentador) el cual nos permitirá aumentar la temperatura hasta llegar a la temperatura optima la cual nos permitirá llevar a cabo la primera reacción de equilibrio

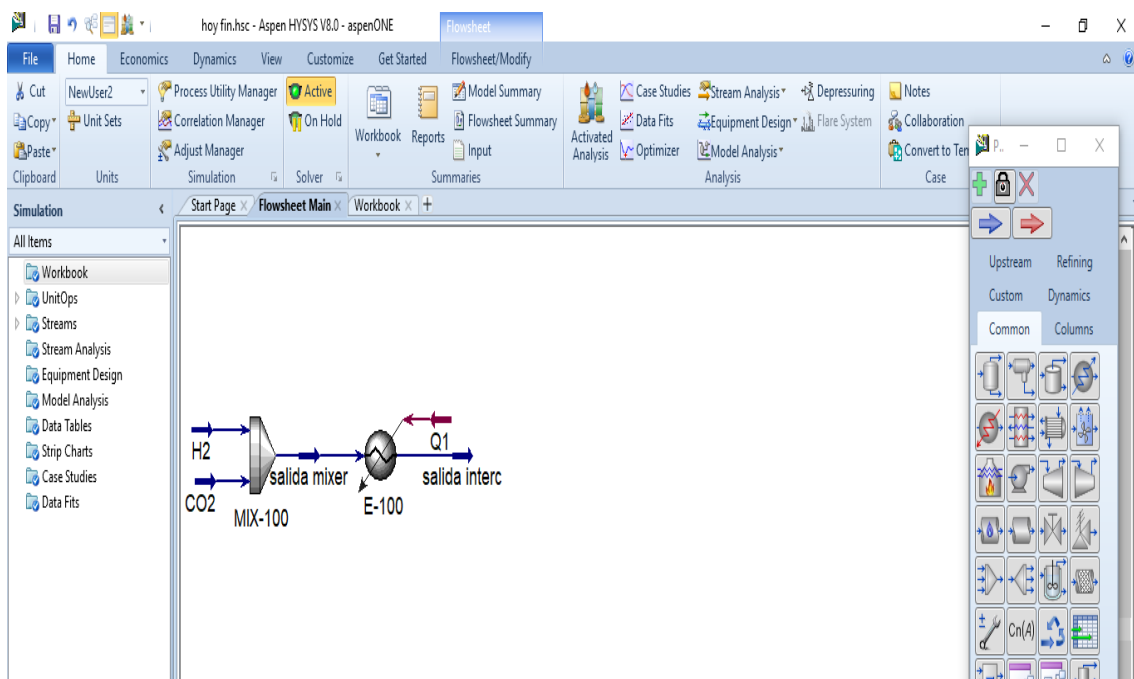


Figura 16: Conexión de intercambiador de calor



- Se conecta la corriente del intercambiador(E-100) a un reactor de equilibrio donde se llevará a cabo la reacción

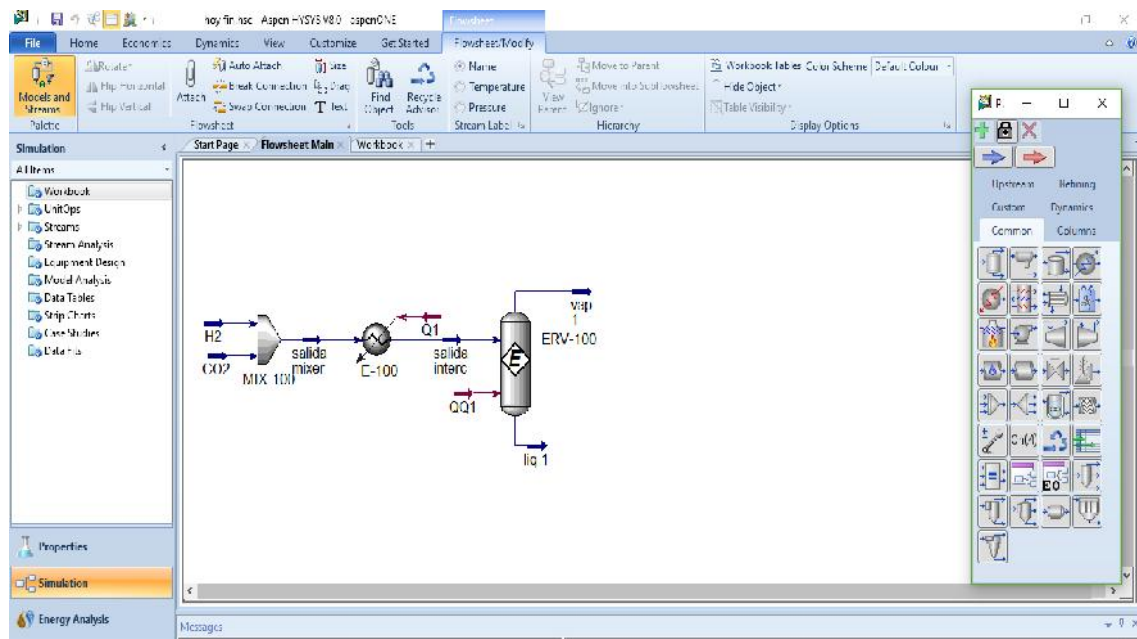


Figura 17: Conexión de a reactor de equilibrio ERV-100

- Al dar las condiciones al reactor se agrega la primera reacción al reactor de equilibrio(ERV-100)

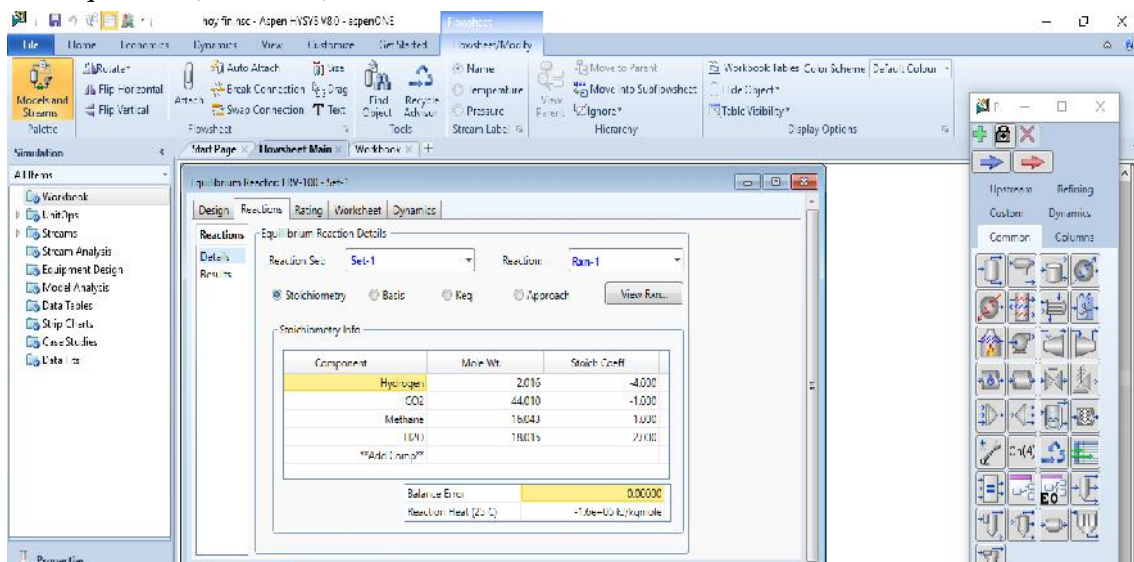


Figura 18: Adición de primera reacción para reactor

- 
- The screenshot displays the Aspen Plus V8.0.1 software interface. The main window shows a process flow diagram (PFD) for a distillation column. The process starts with two input streams, H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>, entering a mixer labeled MIX-100. The output of the mixer is a stream labeled 'solids mixer' that enters a distillation column labeled E-100. The column has two product streams: 'solids interc' (top product) and 'liq 1' (bottom product). A reboiler labeled K-100 is connected to the bottom of the column, and a condenser labeled C-100 is connected to the top. The reboiler has a heating stream labeled 'vap 1' and a cooling stream labeled 'liq 1'. The condenser has a cooling stream labeled 'C1' and a heating stream labeled 'Q1'. The software interface includes a 'Flowsheet' tab, a 'Simulation' toolbar, and a 'Properties' pane on the left. The 'Properties' pane shows the 'Simulation' section with various options like 'Unit Ops', 'Streams', 'Stream Analysis', 'Equipment Design', 'Model Analysis', 'Data Tables', 'Strip Charts', 'Case Studies', and 'Data Files'. The 'Simulation' section is currently selected, showing options for 'Unit Ops', 'Streams', 'Stream Analysis', 'Equipment Design', 'Model Analysis', 'Data Tables', 'Strip Charts', 'Case Studies', and 'Data Files'. The 'Simulation' section is currently selected, showing options for 'Unit Ops', 'Streams', 'Stream Analysis', 'Equipment Design', 'Model Analysis', 'Data Tables', 'Strip Charts', 'Case Studies', and 'Data Files'.

- La corriente de salida del compresor(K-100) se alimenta al segundo reactor donde se llevará a cabo la segunda reacción de equilibrio

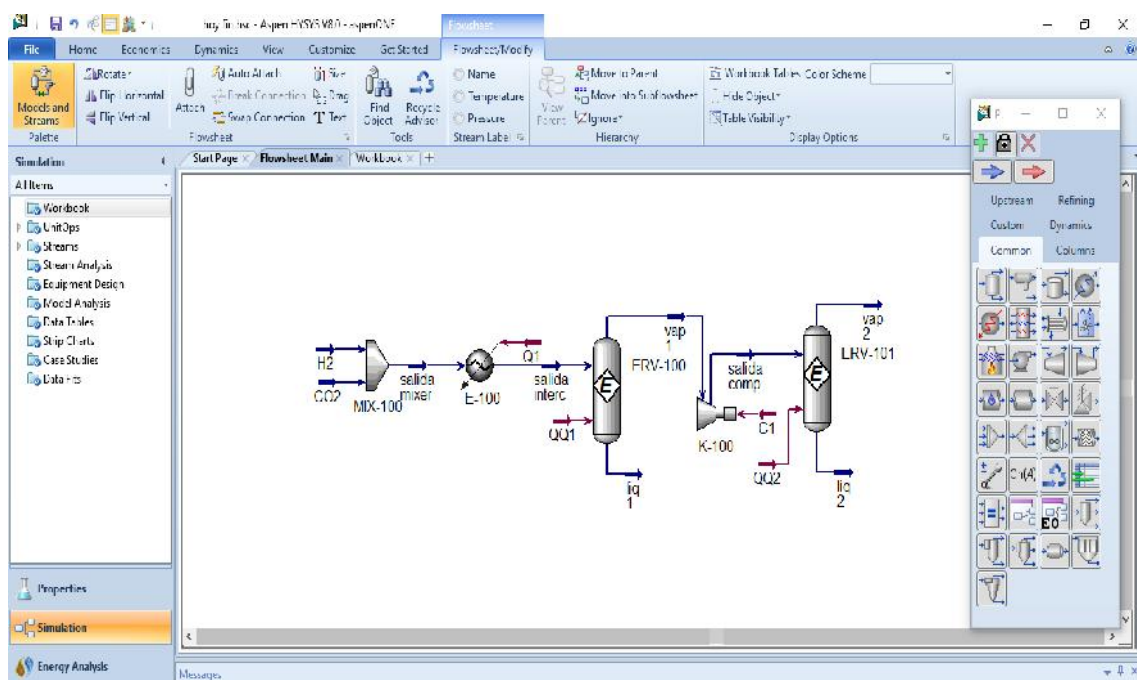


Figura 20: Conexión a segundo reactor



- Se adiciona la segunda reacción de equilibrio al segundo reactor

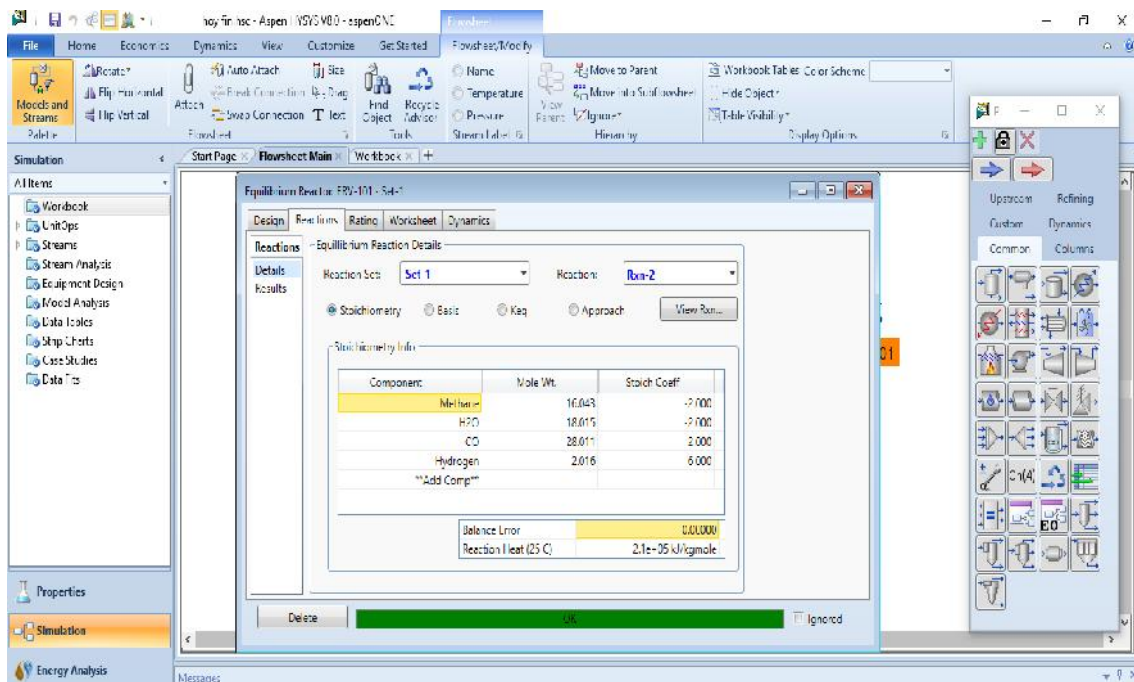


Figura 21: Adición de segunda reacción a reactor

- Al igual que en el primer reactor de equilibrio no se obtiene corriente líquida al tratarse de vapores, la corriente que sale por el tope del reactor se alimenta a un expensor (K-101) para obtener condiciones de presión necesaria.

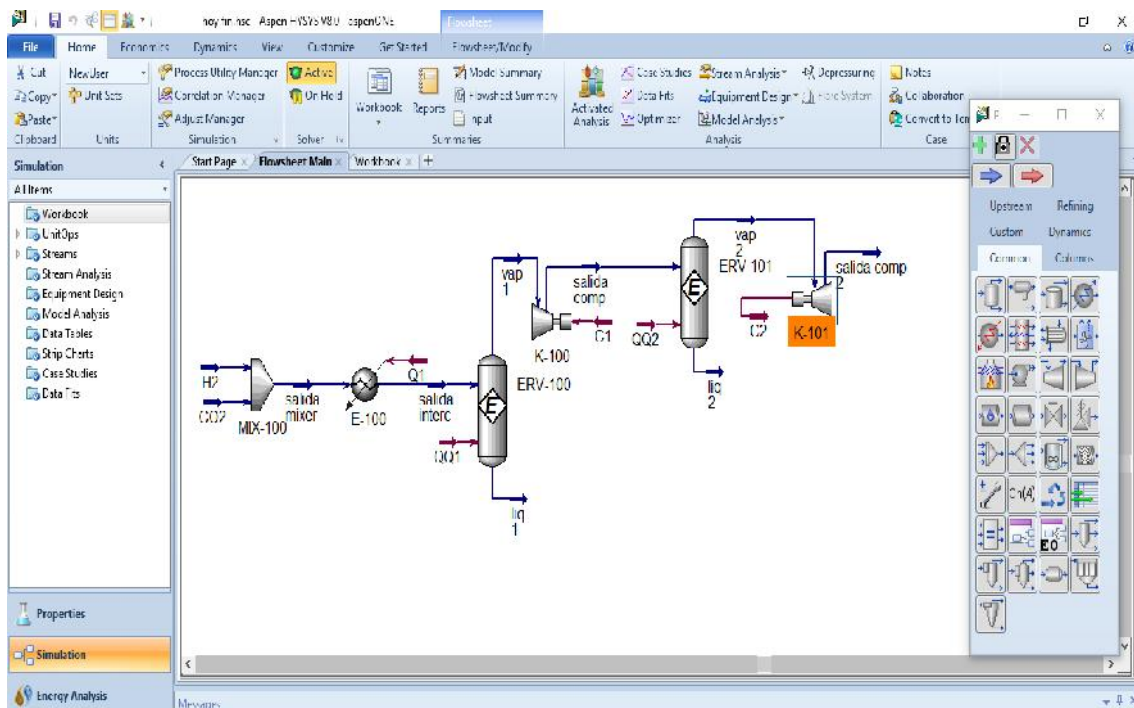
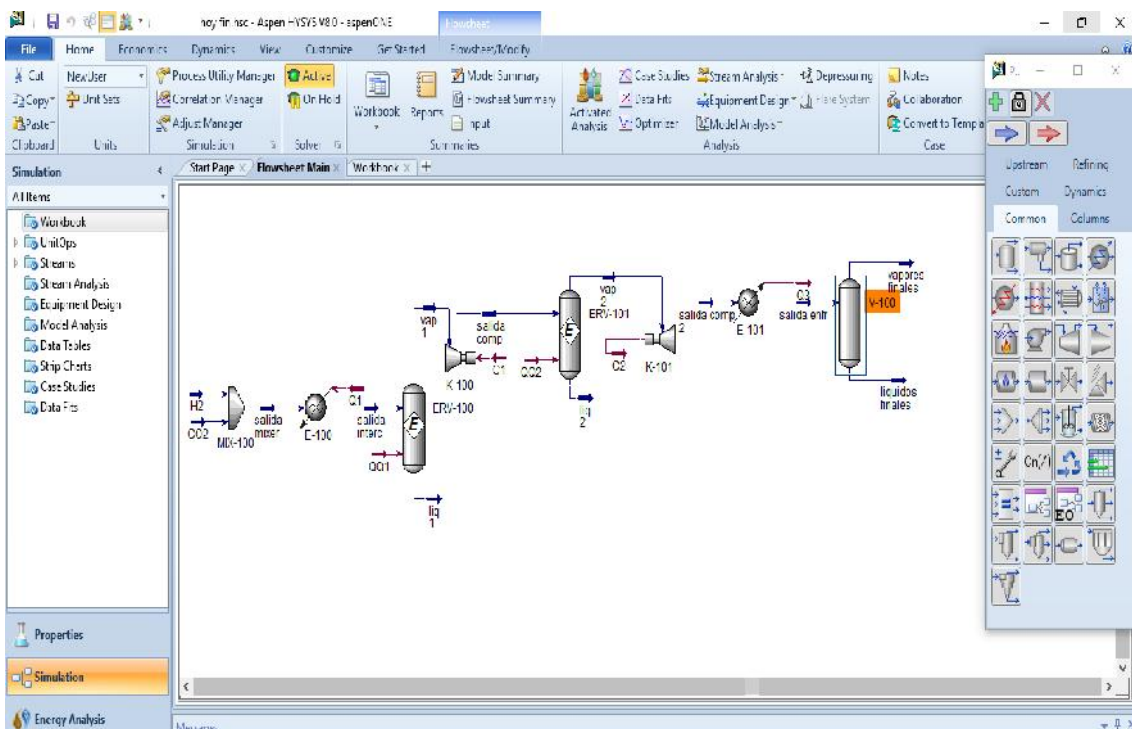


Figura 22: Conexión a expensor

- 
- The screenshot displays the Aspen Plus V8.0.1 software interface. The main window shows a process flow diagram (PFD) for a chemical plant. The diagram includes several units: a Mixer (MX-100), a Compressor (C-100), a Heat Exchanger (E-100), and a Distillation Column (D-100). The flow is as follows: Feed 1 (VOP) enters the Mixer (MX-100), which outputs a stream (salida mixer) to the Compressor (C-100). The Compressor (C-100) outputs a stream (salida comp) to the Heat Exchanger (E-100). The Heat Exchanger (E-100) has two streams: one (salida entra) entering the Distillation Column (D-100) and another (salida comp) exiting. The Distillation Column (D-100) has two outputs: a top product (salida enr) and a bottom product (salida enr). The interface also shows a simulation control panel on the right with buttons for 'Upstream', 'Refining', 'Custom', 'Dynamics', 'Common', and 'Collaborate'. The left sidebar contains a file explorer with folders for 'Workbook', 'Unit Ops', 'Streams', 'Stream Analysis', 'Equipment Design', 'Word Analysis', 'Data Tables', 'Setup Tools', 'Case Studies', and 'Data File'. The top menu bar includes 'File', 'Home', 'Equipment', 'Dynamics', 'View', 'Customize', 'Get Started', and 'Forward/Modify'.

- La corriente de salida de cooler (E-101) se alimenta a un separador flash(V-100), con el objetivo de poder separar el agua líquida de la corriente de vapores.



---

76

- Al analizar la corriente de vapores se observa las composiciones de H<sub>2</sub> y CO los cuales forman el llamado gas de síntesis

Material Stream: vapores finales

Worksheet Attachments Dynamics

**Worksheet**

	Mole Fractions	Vapour Phase	Aqueous Phase
Hydrogen	0.7493	0.7493	0.0000
CO	0.2254	0.2254	0.0000
H2O	0.0069	0.0069	0.9999
Methane	0.0001	0.0001	0.0000
CO2	0.0182	0.0182	0.0001

Conditions Properties Composition Oil & Gas Feed Petroleum Assay K Value User Variables Notes Cost Parameters Normalized Yields

Total 1.00000

Edit... View Properties... Basis...

OK

Figura 25: Composición del gas de síntesis

- Condiciones de presión y temperatura para el largo de todo el proceso

Export Import

Start Page x Flowsheet Main x Workbook x +

Material Streams Compositions Energy Streams Unit Ops

Name	H2	CO2	salida mixer	salida interc	vap 1	liq 1	salida comp
Vapour Fraction	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.0000	1.000
Temperature [C]	25.00	25.00	21.61	320.0	800.0	800.0	1056
Pressure [psig]	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	573.1
Molar Flow [kgmole/h]	16.92	4.229	21.15	21.15	17.90	0.0000	17.90
Mass Flow [kg/h]	34.11	186.1	220.2	220.2	220.2	0.0000	220.2
Liquid Volume Flow [m3/h]	0.4882	0.2255	0.7137	0.7137	0.5379	0.0000	0.5379
Heat Flow [kJ/h]	-22.42	-1.669e+006	-1.669e+006	-1.469e+006	-1.376e+006	-0.0000	-1.190e+006

Name	liq 2	vap 2	salida comp 2	salida enfr	vapores finales	liquidos finales
Vapour Fraction	0.0000	1.000	1.000	0.8205	1.000	0.0000
Temperature [C]	1500	1500	1164	40.00	40.00	40.00
Pressure [psig]	573.1	573.1	150.0	150.0	150.0	150.0
Molar Flow [kgmole/h]	0.0000	21.14	21.14	21.14	17.35	3.796
Mass Flow [kg/h]	0.0000	220.2	220.2	220.2	151.8	68.39
Liquid Volume Flow [m3/h]	0.0000	0.5998	0.5998	0.5998	0.5313	6.853e-002
Heat Flow [kJ/h]	-0.0000	-4.610e+005	-7.198e+005	-1.661e+006	-5.788e+005	-1.082e+006

Figura 26: Condiciones de Presión y Temperatura

## **2. Variables**

### **Variables independientes**

- $\text{H}_2\text{O}$
- Energía solar
- $\text{CO}_2$  de la fermentación alcohólica.

### **Variable dependiente**

- $\text{H}_2$
- Energía eléctrica
- Gas de síntesis

---

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

---

## Resultados:

- Mediante el equipo diseñado se logró recuperar el  $\text{CO}_2$  de la destilería NAYLAMP, esta captura al pasar por el equipo es neutralizado ya que en el interior de este se encuentra permanganato de potasio, para que así el  $\text{CO}_2$  obtenido no ingrese con trazas de otros componentes de la fermentación alcohólica
- Por cada 0.6 ml de agua destilada que se inyecta en el PEM REVERSIBLE FUEL CELL se obtiene según estequiometria 300 ml de hidrogeno. El cual al medir con un multímetro o multitester arroja un valor de 1.47 voltios a 1A siendo energía limpia sin combustión ni contaminantes. (ver APENDICE 01)
- Según estequiometria para la producción del gas de síntesis a partir de 20ml de  $\text{H}_2$  se necesita 5.4ml de  $\text{CO}_2$  para producir Metano (5.5 ml) y Agua(0.0081ml) (ver APENDICE 02)
- El metano y el agua obtenido en la primera reacción pasa a una segunda, siendo el reactivo limitante el metano para que reaccione este se necesita 0.00405ml de agua al reaccionar me producirá 5.5 ml de CO y 15 ml de hidrogeno lo cual conforma el gas de síntesis. (ver APENDICE 03)
- La intensidad de corriente necesaria para producir 300 ml de  $\text{H}_2$  es de 0.97A (ver APENDICE 04)
- El tiempo para producir los 300ml de  $\text{H}_2$  es de 42.86 minutos. (ver APENDICE 04)
- El caudal de hidrogeno requerido para generar 1 amperio de corriente en una celda de combustible es 0.037605kg de  $\text{H}_2/\text{h-kA}$  (ver APENDICE 05)
- Para la potencia de 210mW y un voltaje de 1.47v se necesita una intensidad de  $1.143 \times 10^{-3}$  kA con esta intensidad se calcula la cantidad de hidrogeno consumido dentro de la pila de combustible que expresado en ml será de 60 ml/h- $\text{H}_2$ , al consumirse esto en una hora los 300 ml producidos se consumirán en 5 horas (ver APENDICE 06).

- Se llevo a cabo el proceso de simulación en el ASPEN HYSYS V8.0 en el cual se obtuvo de composición de CO:0.1705 y de Hidrógeno : 0.8129 en fase gaseosa que nos indica la presencia casi total de gas de síntesis en la simulación.

-

---

**CAPÍTULO V**  
**DISCUSIÓN Y RECOMENDACIÓN**

---



#### Discusión:

- La diferencia entre el PEM ELECTROLYZER Y EL PEM REVERSIBLE FUEL CEL, es que el primero solo produce hidrogeno y el segundo se produce hidrogeno y energía debido a que este tiene pila de combustible.
- La diferencia de conectar los equipos a panel solar o corriente eléctrica es que en esta última se lleva proceso es muy acelerado no obteniendo resultados óptimos, como es la menor producción de hidrogeno siendo este no rentable
- Al utilizar el panel solar del cual tenemos energía limpia no habría gastos económicos elevados, siendo utilizado para llevar a cabo el trabajo del equipo para la producción de hidrogeno sin contaminar el medio ambiente.
- Si llevamos una mezcla de hidrógeno y CO<sub>2</sub> para producir gas de síntesis no se puede obtener este ya que a temperatura ambiental no se lleva cabo la reacción.

#### Recomendaciones:

- No conectar al PEM ELECTROLYZER a un voltaje mayor al de las especificaciones del equipo caso contrario el equipo quedara inservible.
- Manipulación de equipos con fragilidad
- Utilizar agua destilada en el PEM, ya que se puede acumular sólidos en las placas, reduciendo la intensidad eléctrica brindada al momento de realizar la electrolisis
- Las pruebas de fuego para comprobar la presencia de hidrogeno hacerlo en pequeñas cantidades ya que el hidrogeno es sumamente explosivo.
- Controlar la presión salida del fermentador al equipo mediante una válvula de desfogue ya que el tanque se encuentra a una gran presión.
- Por ser alumnos recién egresados no se puede llevar a cabo la producción de gas de síntesis a escala industrial debido a las condiciones de presión y temperatura, por lo que se optó a simular el proceso en el ASPEN HYSYS V 8.0.

---

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES**

---

### Conclusiones:

- Se diseñó el proceso de captura de CO<sub>2</sub> de la planta de alcohol NAYLAMP, el cual está diseñado de material de PVC, a este equipo se le agrego la solución de permanganato de potasio al 1%P/V para logra la neutralización de CO<sub>2</sub>.
- Se construyo la celda electrolítica a base de PVC entre estos está incluido un táper, jeringas, equipo de venoclisis (solo mangueras), crampin; este equipo se conectó a un panel solar y ayudó a generar energía limpia para la producción de Hidrogeno y Oxígeno.
- Se realizo la electrolisis para producir Hidrogeno y Oxigeno a través de la celda electrolítica y el PEM ELECTROLYZER, obteniendo una relación de 2 a 1 en ambos equipos, indicando que el trabajo de estos es efectivo y capaz de trabajar con energía limpia.
- Gracias a la pila de combustible se logró convertir la energía química de la electrolisis del agua en energía eléctrica utilizando el hidrogeno.
- Mediante la simulación del Aspen Hysys v8.0 se logró demostrar la producción de gas de síntesis mediante el hidrogeno obtenido del PEM y el CO<sub>2</sub> de la destilería NAYLAMP.
- Con esto se demuestra que el hidrogeno es un combustible que se obtiene de manera limpia sin generar emisiones

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguer, M., y Miranda A., 2007. EL HIDRÓGENO Fundamento de un futuro equilibrado. Recuperado de [www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479788094.pdf](http://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479788094.pdf)
- Angeles, p. (2017). hidrogeno. [online] hidrogeno. Available at: <http://energiasiq.wixsite.com/hidrogeno/ingenieria-del-hidrogeno> [Accessed 10 Aug. 2017].
- Bioelectrochemical Systems are integrated systems combining wastewater treatment with energy generation and resource recovery. Newcastle University. UK. Recuperado de: [www.staff.ncl.ac.uk/eileen.yu/Bioechamsys.html](http://www.staff.ncl.ac.uk/eileen.yu/Bioechamsys.html)
- Cabrera. O., (2012). Diseño de una planta para la recuperación y procesamiento de CO<sub>2</sub>, obtenido en destilerías de alcohol. Universidad Nacional de Trujillo- Facultad de Ingeniería Química. Perú. Recuperado de: [dspace.unitru.edu.pe/xmlui/handle/UNITRU/3363](http://dspace.unitru.edu.pe/xmlui/handle/UNITRU/3363)
- Faroldi, B. (2012). Desarrollo y optimización de catalizadores de Ru para la obtención de hidrógeno de alta pureza en reactores de membrana a partir de gas natural (tesis doctoral). Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica – Facultad de Ingeniería Química (UNL – CONICET). Argentina. Recuperado de: [bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/341](http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/341)
- Fuelcellstore.com. (2017). Horizon Mini PEM Reversible Fuel Cell. [online] Available at: <http://www.fuelcellstore.com/horizon-mini-reversible-fuel-cell> [Accessed 3 Nov. 2016].
- Fuelcellstore.com. (2017). Solar DIY Fan Kit. [online] Available at: <http://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-education-products/solar-diy-fan-kit> [Accessed 10 Aug. 2017].
- Gattrell, M., y Gupta N., (2006). Electrochemical reduction of CO<sub>2</sub> to hydrocarbons to store renewable electrical energy and upgrade biogas. National Research Council, Institute of Chemical Process and Environmental Technology, 1200 Montreal Road, Ottawa, Ont., Canada. Recuperado de: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406003037](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406003037)

- Gattrell, M., y Gupta N., (2006). A review of the aqueous electrochemical reduction of CO<sub>2</sub> to hydrocarbons at copper. National Research Council, Institute of Chemical Process and Environmental Technology, 1200 Montreal Road, Ottawa, Ont., Canada. Recuperado de:  
[www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022072806002853](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022072806002853)
  
- Hrudnick. sitios.ing.uc.cl. (2017). CCS Hernán Morales y Cristian Torres. [online] Available at:  
[http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/CO<sub>2</sub>capture/AlmacGeo.html](http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/CO2capture/AlmacGeo.html)  
[Accessed 10 Aug. 2017].
  
- Ibañez, J., Bilbao, M., Ergueta L. y Cagigal, V. (2006). Procedimiento para la obtención de hidrógeno a partir de gas natural. WO2006136632 A1. Patente.
  
- Magnus, R. (2008). Hydrogen production from fossil fuels with carbon dioxide capture, using chemical-looping technologies (tesis doctoral). Department of Energy and Environment Division of Energy Technology Chalmers University of Technology. Göteborg. Recuperado de  
[www.entek.chalmers.se/~anly/co2/82\\_Magnus\\_thesis\\_kappa.pdf](http://www.entek.chalmers.se/~anly/co2/82_Magnus_thesis_kappa.pdf)
  
- Morales, H.; Torres, C. (2008). Tecnologías de captura y secuestro de CO<sub>2</sub>. GUIA. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE.
  
- Pans, M., (2014). Producción de H<sub>2</sub> con captura de CO<sub>2</sub> por reformado de CH<sub>4</sub> integrado con un sistema Chemical-Looping Combustion. Tesis de la Universidad de Zaragoza, España. Recuperado de:  
[zaguan.unizar.es/record/13524/files/TESIS-2014-033.pdf](http://zaguan.unizar.es/record/13524/files/TESIS-2014-033.pdf)
  
- Pineda, D., (2009). Evaluación Técnico Económica de una Planta de Producción de Hidrógeno Mediante Electrólisis de Agua utilizando Energía Eléctrica Producida Con Celdas Fotovoltaicas de Alta Eficiencia (tesis de pregrado). Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Chile. Recuperado de:  
[repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/pineda\\_d/sources/pineda\\_d.pdf](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/pineda_d/sources/pineda_d.pdf)
  
- Pineda, E. D. (2009). EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE ELECTRÓLISIS DE AGUA UTILIZANDO ENERGÍA ELÉCTRICA PRODUCIDA CON

CELDA FOTOVOLTAICAS DE ALTA EFICIENCIA. Tesis. Universidad de Chile.

- Ramos, S. (2013). ELECTRODOS DE TECNOLOGÍA AVANZADA PARA SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA. Doctorado. Universidad Nacional de La Plata.
- Romero B., Danielski L., (2013). Recovery of carbon dioxide from sugarcane fermentation broth in the ethanol industry. National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels, Av. Rio Branco, 65 – CEP 20090-004, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. Recuperado de:  
[www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096030851200096X](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096030851200096X)
- Rosas, M. (2003). Estudio teórico y experimental sobre la producción de hidrógeno electrolítico a partir de energía solar fotovoltaica: diseño, operación y evaluación de una planta piloto de producción de hidrógeno electrolítico de 1,2 NM<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/h. Doctorado. Instituto nacional de técnica aeroespacial y escuela superior de ingenieros.
- Terrones, H., (2010). Integración de la Producción de Hidrógeno a partir del Gas Natural a la Matriz Energética Nacional (tesis de pregrado). Universidad nacional de ingeniería. Perú. Recuperado de:  
[cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/983/1/terriones\\_hh.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/983/1/terriones_hh.pdf)
- User, S. (2017). Producción H<sub>2</sub>. [online] Pilasde.com. Available at:  
<http://www.pilasde.com/tecnologia-del-hidrogeno/produccion-h2> [Accessed 10 Aug. 2017].
- Wri.org. (2017). Infographic: What Do Your Country's Emissions Look Like? | World Resources Institute. [online] Available at:  
<http://www.wri.org/blog/2015/06/infographic-what-do-your-countrys-emissions-look> [Accessed 10 Aug. 2012].
- Descripción y modelado de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico, Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior departamento de ingeniería eléctrica, Madrid, España

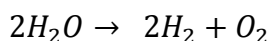
## APÉNDICE

### APENDICE 01

#### Producción de Hidrógeno por electrólisis:

Para producir energía mediante la electrólisis en el PEM ELECTROLYZER, necesitamos alimentar agua destilada al equipo a través de una jeringa y según lo calculado utilizamos 0.6 ml de agua destilada.

Durante la electrólisis tenemos la siguiente reacción:



Por cada 2 moles de  $H_2O$ , se producen 2 moles de  $H_2$  y 2 moles de  $O_2$ , entonces en gramos serían:

$$\frac{18 \text{ gr de } H_2O}{1 \text{ mol de } H_2O} * 2 \text{ moles de } H_2 = 36 \text{ gr de } H_2O$$

$$\frac{2 \text{ gr de } H_2}{1 \text{ mol de } H_2} * 2 \text{ moles de } H_2 = 4 \text{ gr de } H_2$$

$$\frac{16 \text{ gr de } O_2}{1 \text{ mol de } O_2} * 2 \text{ moles de } O_2 = 32 \text{ gr de } O_2$$

Con ello podemos calcular cuántos gr de  $H_2O$  se produce a partir de 0.6 gr de  $H_2O$

$$36 \text{ gr de } H_2O \rightarrow 4 \text{ gr de } H_2$$

$$0.6 \text{ gr de } H_2O \rightarrow X$$

$$X = \frac{0.6 * 4}{36} = \frac{0.24}{36} = 0.03 \text{ gr de } H_2$$

Necesitamos saber la cantidad de  $H_2$  producido en  $m^3$  para luego convertir a litros por ello trabajamos con la densidad del hidrógeno:

$$D = \frac{m}{v}$$

$$0.09 \frac{kg}{m^3} = \frac{0.03 \text{ gr de } H_2}{v}$$

$$v = \frac{0.00003 \text{ Kg de } H_2}{0.09 \text{ Kg/m}^3}$$

$$v = 0.0003 \text{ m}^3 \text{ de } H_2$$

Para calcular en L convertimos:

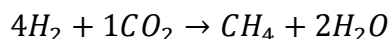
1 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> → 1000 L de H<sub>2</sub>

0.0003 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> → X

$$X = \frac{1000 * 0.0003}{1} = \frac{0.3 \text{ L}}{1} = 0.3 \text{ L de H}_2$$

## APENDICE 02

Producción de gas de síntesis:



8gr   44 gr   16 gr   36gr

Por cada 4 moles de H<sub>2</sub> y 1 mol de CO<sub>2</sub> se producen 1 mol de CH<sub>4</sub> y 1 mol de H<sub>2</sub>O lo que forma el gas de síntesis, entonces en gramos serían:

$$\frac{2 \text{ gr de H}_2}{1 \text{ mol de H}_2} * 4 \text{ moles de H}_2 = 8 \text{ gr de H}_2$$

$$\frac{44 \text{ gr de CO}_2}{1 \text{ mol de CO}_2} * 1 \text{ moles de CO}_2 = 44 \text{ gr de CO}_2$$

$$\frac{16 \text{ gr de CH}_4}{1 \text{ mol de CO}} * 1 \text{ moles de CO} = 16 \text{ gr de CO}$$

$$\frac{18 \text{ gr de H}_2O}{1 \text{ mol de H}_2O} * 2 \text{ moles de H}_2O = 36 \text{ gr de H}_2O$$

Utilizaremos 20 ml de H<sub>2</sub>, lo cual en gramos representa:

$$D = \frac{m}{v}$$

$$0.09 \frac{kg}{m^3} = \frac{m \text{ de H}_2}{0.00002 \text{ m}^3}$$

$$m = \frac{0.09 \frac{Kg}{m^3} * 0.00002 \text{ m}^3 \text{ de H}_2}{1}$$

$$m = 0.0000018 \text{ Kg de H}_2$$



- $20 \text{ ml de H}_2 * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0.00002 \text{ m}^3$
- $0.0000018 \text{ Kg} * \frac{1000 \text{ gr}}{1 \text{ Kg}} = 0.0018 \text{ gr}$

Con ello podemos calcular cuántos gramos de CO<sub>2</sub> se necesitan para producir gas de síntesis:

$$8 \text{ gr de H}_2 \rightarrow 44 \text{ gr de CO}_2$$

$$0.0018 \text{ gr de H}_2 \rightarrow X \text{ de CO}_2$$

$$8 * X = 0.0018 * 44$$

$$X = \frac{0.0018 * 44}{8}$$

$$X = 0.0099 \text{ gr de CO}_2$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

$$1.842 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{0.0000099 \text{ Kg de CO}_2}{V}$$

$$V = \frac{0.0000099 \text{ Kg de CO}_2}{1.842 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

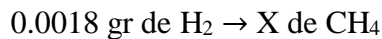
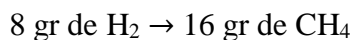
$$V = 0.0000054 \text{ m}^3 \text{ de CO}_2$$

- $0.0099 \text{ gr de CO}_2 * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de CO}_2} = 0.0000099 \text{ Kg de CO}_2$
- $0.0000054 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 5.4 \text{ ml de CO}_2$

### APENDICE 03

Entonces se necesita 5.4 ml de CO<sub>2</sub>

Para saber cuánto de CH<sub>4</sub> produzco, lo resuelvo en base a mi reactivo limitante que es el H<sub>2</sub>



$$8 * X = 0.0018 * 16$$

$$X = \frac{0.0018 * 16}{8}$$

$$X = 0.0036 \text{ gr de CH}_4$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

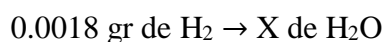
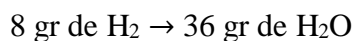
$$0.656 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{0.0000036 \text{ Kg de CH}_4}{V}$$

$$V = \frac{0.0000036 \text{ Kg de CH}_4}{0.656 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V = 0.0000055 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4$$

- $0.0036 \text{ gr de CH}_4 * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de CH}_4} = 0.0000036 \text{ Kg de CH}_4$
- $0.0000055 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 5.5 \text{ ml de CH}_4$

Para la producción de H<sub>2</sub>O también trabajaremos con el reactivo limitante que es el H<sub>2</sub>



$$8 * X = 0.0018 * 36$$

$$X = \frac{0.0018 * 36}{8}$$

$$X = 0.0081 \text{ gr de H}_2\text{O}$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{V}$$

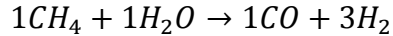
$$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{0.0000081 \text{ Kg de H}_2\text{O}}{V}$$

$$V = \frac{0.0000081 \text{ Kg de H}_2\text{O}}{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

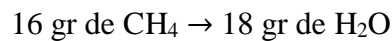
$$V = 0.000000081 \text{ m}^3 \text{ de H}_2\text{O}$$

- $0.0081 \text{ gr de H}_2\text{O} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de H}_2\text{O}} = 0.0000081 \text{ Kg de H}_2\text{O}$
- $0.000000081 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 0.0081 \text{ ml de H}_2\text{O}$

Segunda Reacción:



Para la producción de CO, trabajaremos con el reactivo limitante que es el CH<sub>4</sub>.



$$16 * X = 0.0036 * 18$$

$$X = \frac{0.0036 * 18}{16}$$

$$X = 0.00405 \text{ gr de H}_2\text{O}$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

$$1000 \frac{kg}{m^3} = \frac{0.00000405 \text{ Kg de } H_2O}{V}$$

$$V = \frac{0.00000405 \text{ Kg de } H_2O}{1000 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$V = 0.00000000405 \text{ m}^3 \text{ de } H_2O$$

- $0.00405 \text{ gr de } H_2O * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de } H_2O} = 0.00000405 \text{ Kg de } H_2O$
- $0.00000000405 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 0.00405 \text{ ml de } H_2O$

Para hallar la producción de CO, lo calculamos en base del reactivo limitante:

16 gr de CH<sub>4</sub> → 28 gr de CO

0.0036 gr de CH<sub>4</sub> → X de CO

$$16 * X = 0.0036 * 28$$

$$X = \frac{0.0036 * 28}{16}$$

$$X = 0.0063 \text{ gr de CO}$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

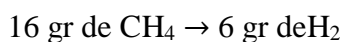
$$1.14 \frac{kg}{m^3} = \frac{0.0000063 \text{ Kg de CO}}{V}$$

$$V = \frac{0.0000063 \text{ Kg de CO}}{1.14 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$V = 0.0000055 \text{ m}^3 \text{ de CO}$$

- $0.0063 \text{ gr de CO} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de CO}} = 0.0000063 \text{ Kg de CO}$
- $0.0000055 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 5.5 \text{ ml de CO}$

Para hallar la producción de  $\text{H}_2$ , lo calculamos en base del reactivo limitante:



$$16 * X = 0.0036 * 6$$

$$X = \frac{0.0036 * 6}{16}$$

$$X = 0.00135 \text{ gr de H}_2$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

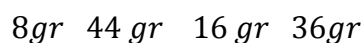
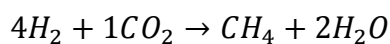
$$0.09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{0.00000135 \text{ Kg}}{V} \text{ H}_2$$

$$V = \frac{0.00000135 \text{ Kg de H}_2}{0.09 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V = 0.000015 \text{ m}^3 \text{ de H}_2$$

- $0.00135 \text{ gr de H}_2 * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de H}_2} = 0.00000135 \text{ Kg de H}_2$
- $0.000015 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 15 \text{ ml de H}_2$

Producción de gas de síntesis:



Por cada 4 moles de  $\text{H}_2$  y 1 mol de  $\text{CO}_2$  se producen 1 mol de  $\text{CH}_4$  y 1 mol de  $\text{H}_2\text{O}$  lo que forma el gas de síntesis, entonces en gramos serían:

$$\frac{2 \text{ gr de } H_2}{1 \text{ mol de } H_2} * 4 \text{ moles de } H_2 = 8 \text{ gr de } H_2$$

$$\frac{44 \text{ gr de } CO_2}{1 \text{ mol de } CO_2} * 1 \text{ moles de } CO_2 = 44 \text{ gr de } CO_2$$

$$\frac{16 \text{ gr de } CH_4}{1 \text{ mol de } CO} * 1 \text{ moles de } CO = 16 \text{ gr de } CO$$

$$\frac{18 \text{ H}_2 \text{ gr de O}}{1 \text{ mol de } H_2O} * 2 \text{ moles de } H_2O = 36 \text{ gr de } H_2O$$

Utilizaremos 20 ml de  $H_2$ , lo cual en gramos representa:

$$D = \frac{m}{v}$$

$$0.09 \frac{kg}{m^3} = \frac{m \text{ de } H_2}{0.00002 m^3}$$

$$m = \frac{0.09 \frac{Kg}{m^3} * 0.00002 m^3 \text{ de } H_2}{1}$$

$$m = 0.0000018 Kg \text{ de } H_2$$

- $20 \text{ ml de } H_2 * \frac{1 L}{1000 ml} * \frac{1 m^3}{1000 L} = 0.00002 m^3$
- $0.0000018 Kg * \frac{1000 gr}{1 Kg} = 0.0018 gr$

Con ello podemos calcular cuántos gramos de  $CO_2$  se necesitan para producir gas de síntesis:

$$8 \text{ gr de } H_2 \rightarrow 44 \text{ gr de } CO_2$$

$$0.0018 \text{ gr de } H_2 \rightarrow X \text{ de } CO_2$$

$$8 * X = 0.0018 * 44$$

$$X = \frac{0.0018 * 44}{8}$$

$$X = 0.0099 \text{ gr de } CO_2$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

$$1.842 \frac{kg}{m^3} = \frac{0.0000099 Kg \text{ de } CO_2}{V}$$

$$V = \frac{0.0000099 Kg \text{ de } CO_2}{1.842 \frac{Kg}{m^3}}$$

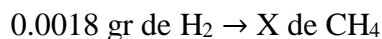
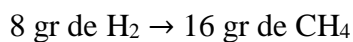
$$V = 0.0000054 m^3 \text{ de } CO_2$$

- $0.0099 \text{ gr de } CO_2 * \frac{1 Kg}{1000 gr \text{ de } CO_2} = 0.0000099 Kg \text{ de } CO_2$

- $0.0000054 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 5.4 \text{ ml de CO}_2$

Entonces necesito 5.4 ml de CO<sub>2</sub>

Para saber cuánto de CH<sub>4</sub> produzco, lo resuelvo en base a mi reactivo limitante que es el H<sub>2</sub>



$$8 * X = 0.0018 * 16$$

$$X = \frac{0.0018 * 16}{8}$$

$$X = 0.0036 \text{ gr de CH}_4$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

$$0.656 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{0.0000036 \text{ Kg de CH}_4}{V}$$

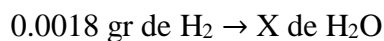
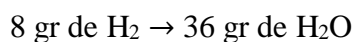
$$V = \frac{0.0000036 \text{ Kg de CH}_4}{0.656 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V = 0.0000055 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4$$

- $0.0036 \text{ gr de CH}_4 * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de CH}_4} = 0.0000036 \text{ Kg de CH}_4$

- $0.0000055 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 5.5 \text{ ml de CH}_4$

Para la producción de H<sub>2</sub>O también trabajaremos con el reactivo limitante que es el H<sub>2</sub>



$$8 * X = 0.0018 * 36$$

$$X = \frac{0.0018 * 36}{8}$$

$$X = 0.0081 \text{ gr de H}_2\text{O}$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

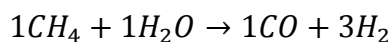
$$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{0.0000081 \text{ Kg de H}_2\text{O}}{V}$$

$$V = \frac{0.0000081 \text{ Kg de H}_2\text{O}}{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

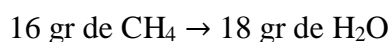
$$V = 0.000000081 \text{ m}^3 \text{ de H}_2\text{O}$$

- $0.0081 \text{ gr de H}_2\text{O} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de H}_2\text{O}} = 0.0000081 \text{ Kg de H}_2\text{O}$
- $0.000000081 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 0.0081 \text{ ml de H}_2\text{O}$

Segunda Reacción:



Para la producción de CO, trabajaremos con el reactivo limitante que es el CH<sub>4</sub>.



$$16 * X = 0.0036 * 18$$

$$X = \frac{0.0036 * 18}{16}$$

$$X = 0.00405 \text{ gr de H}_2\text{O}$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

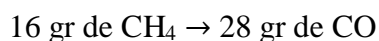
$$1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{0.00000405 \text{ Kg de H}_2\text{O}}{V}$$

$$V = \frac{0.00000405 \text{ Kg de H}_2\text{O}}{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V = 0.0000000405 \text{ m}^3 \text{ de H}_2\text{O}$$

- $0.00405 \text{ gr de H}_2\text{O} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de H}_2\text{O}} = 0.00000405 \text{ Kg de H}_2\text{O}$
- $0.0000000405 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 0.00405 \text{ ml de H}_2\text{O}$

Para hallar la producción de CO, lo calculamos en base del reactivo limitante:



$$16 * X = 0.0036 * 28$$

$$X = \frac{0.0036 * 28}{16}$$

$$X = 0.0063 \text{ gr de CO}$$



Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

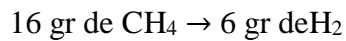
$$1.14 \frac{kg}{m^3} = \frac{0.0000063 \text{ Kg de CO}}{V}$$

$$V = \frac{0.0000063 \text{ Kg de CO}}{1.14 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$V = 0.0000055 \text{ m}^3 \text{ de CO}$$

- $0.0063 \text{ gr de CO} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de CO}} = 0.0000063 \text{ Kg de CO}$
- $0.0000055 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 5.5 \text{ ml de CO}$

Para hallar la producción de H<sub>2</sub>, lo calculamos en base del reactivo limitante:



$$16 * X = 0.0036 * 6$$

$$X = \frac{0.0036 * 6}{16}$$

$$X = 0.00135 \text{ gr de H}_2$$

Necesitamos saber esto cuánto representa en ml para ello trabajamos con la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

$$0.09 \frac{kg}{m^3} = \frac{0.00000135 \text{ Kg}}{V} \text{ H}_2$$

$$V = \frac{0.00000135 \text{ Kg de H}_2}{0.09 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$V = 0.000015 \text{ m}^3 \text{ de H}_2$$

- $0.00135 \text{ gr de H}_2 * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr de H}_2} = 0.00000135 \text{ Kg de H}_2$
- $0.000015 \text{ m}^3 * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 15 \text{ ml de H}_2$

## APENDICE 04

Intensidad necesaria para producir 0.3 L de H<sub>2</sub>:

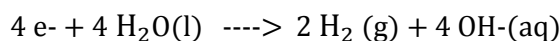
Para 1 mol de un gas a 1 atm y 25°C ocupa 24.4 L, nosotros producimos 0.3 L entonces:

24.4 L → 1 mol de H<sub>2</sub>

0.3 L → X

$$X = \frac{0.3 * 1}{24.4} = \frac{0.3}{24.4} = 0.012 \text{ moles de H}_2$$

Según la ecuación de la reacción media, haremos la estequiometria:



4 moles de e<sup>-</sup> → 2 moles de H<sub>2</sub>

X → 0.012 moles de H<sub>2</sub>

$$X = \frac{4 * 0.012}{2} = 0.024 \text{ moles de e}^-$$

Ahora se procede a convertir los moles de e<sup>-</sup> en carga de Coulomb:

$$0.024 \text{ moles de e}^- * \frac{6.022 * 10^{23} e^-}{1 g \text{ mol de e}^-} * \frac{1.602 * 10^{-19} C}{1 e^-} = 0.25 * 10^4 = 2300 C$$

Para hallar la intensidad de corriente tenemos:

$$I = \frac{q}{t}$$

Para el tiempo tenemos la siguiente relación:

1 m → 7 ml

x → 300 ml

$$X = \frac{1 * 300}{7} = 42.86 m * \frac{60s}{1 m} = 2571.43 s$$

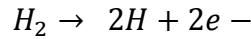
Se reemplaza en la fórmula anterior:

$$I = \frac{q}{t}$$

$$I = \frac{2500 C}{2571.43 s} = 0.89 A$$

## APENDICE 05

Calcular el caudal de H<sub>2</sub> requerido para generar 1 amp de corriente en una celda de combustible:



Los moles de H<sub>2</sub> liberados para generar un amperio pueden calcularse directamente:

$$n_{H_2} = 1.0 \text{ A} * \frac{1 \frac{\text{coulomb}}{\text{sec}}}{1 \text{ A}} * \frac{1 \text{ equivalence of } e^-}{96,487 \text{ coulombs}} * \frac{1 \text{ g mol H}_2}{2 \text{ equiv. of } e^-} * \frac{3600 \text{ sec}}{1 \text{ hr}} = \frac{0.018655 \text{ g mol H}_2}{\text{hr-A}}$$

$$m_{H_2} = \frac{0.018655 \text{ g mol H}_2}{\text{hr-A}} * \frac{2.0158 \text{ g}}{1 \text{ g mol H}_2} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} = 37.605 * 10^{-6} \frac{\text{Kg H}_2}{\text{hr-A}} = 0.037605 \frac{\text{Kg H}_2}{\text{hr-KA}}$$

Lo convertimos a libras:

$$0.037605 \frac{\text{Kg H}_2}{\text{hr-KA}} * \frac{2,20462 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} = 0.08291 \text{ lb de H}_2$$

Procedemos hallar la intensidad de corriente, y la cantidad de H<sub>2</sub> consumido para una potencia y voltaje según equipo.

P= 210 mW Y V= 1.47 V

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{210 \text{ mW}}{1,47 \text{ V}} * \frac{10^{-3} \text{ W}}{1 \text{ mW}} * \frac{1 \text{ VA}}{1 \text{ W}} * \frac{1 \text{ KA}}{1000 \text{ A}} = 143 * 10^{-6} \text{ KA}$$

La cantidad de hidrógeno consumido dentro de la pila de combustible es:

m H<sub>2</sub>O consumido:

$$143 * 10^{-6} \text{ KA} * \frac{0.08291 \text{ lb H}_2}{\text{hr-KA}} = 11,9 * 10^{-6} \text{ lb } \frac{\text{H}_2}{\text{Hr}} * \frac{0.453592 \text{ Kg}}{1 \text{ lb H}_2} = 5.4 * 10^{-6} \text{ Kg } \frac{\text{H}_2}{\text{Hr}}$$

Cómo necesitamos saber la cantidad en ml, utilizaremos la densidad:

$$D = \frac{m}{v}$$

$$0.09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{5.4 * 10^{-6} \text{ Kg } \frac{\text{H}_2}{\text{Hr}}}{v}$$

$$v = \frac{5.4 * 10^{-6} \text{ Kg } \frac{\text{H}_2}{\text{Hr}}}{0.09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$v = 60 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{Hr}} \text{ de H}_2$$

- $60 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{Hr}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 60 \frac{\text{ml}}{\text{Hr}} \text{ de H}_2$

Entonces si 60 ml se consumen por hora, nosotros al producir 300 ml se consumirán en:

60 ml de  $H_2 \rightarrow 1$  hora

300 ml de  $H_2 \rightarrow X$

$$X = \frac{300 * 1}{60} = \frac{300}{60} = 5 \text{ horas}$$

## APENDICE 06

Calcular el caudal de  $H_2$  requerido para generar 1 amp de corriente en una celda de combustible:



Los moles de  $H_2$  liberados para generar un amperio pueden calcularse directamente:

$$n_{H_2} = 1.0 \text{ A} * \frac{1 \frac{\text{coulomb}}{\text{sec}}}{1 \text{ A}} * \frac{1 \text{ equivalence of } e^-}{96,487 \text{ coulombs}} * \frac{1 \text{ g mol } H_2}{2 \text{ equiv. of } e^-} * \frac{3600 \text{ sec}}{1 \text{ hr}} = \frac{0.018655 \text{ g mol } H_2}{\text{hr-A}}$$

$$m_{H_2} = \frac{0.018655 \text{ g mol } H_2}{\text{hr-A}} * \frac{2.0158 \text{ g}}{1 \text{ g mol } H_2} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} = 37.605 * 10^{-6} \frac{\text{Kg } H_2}{\text{hr-A}} = 0.037605 \frac{\text{Kg } H_2}{\text{hr-KA}}$$

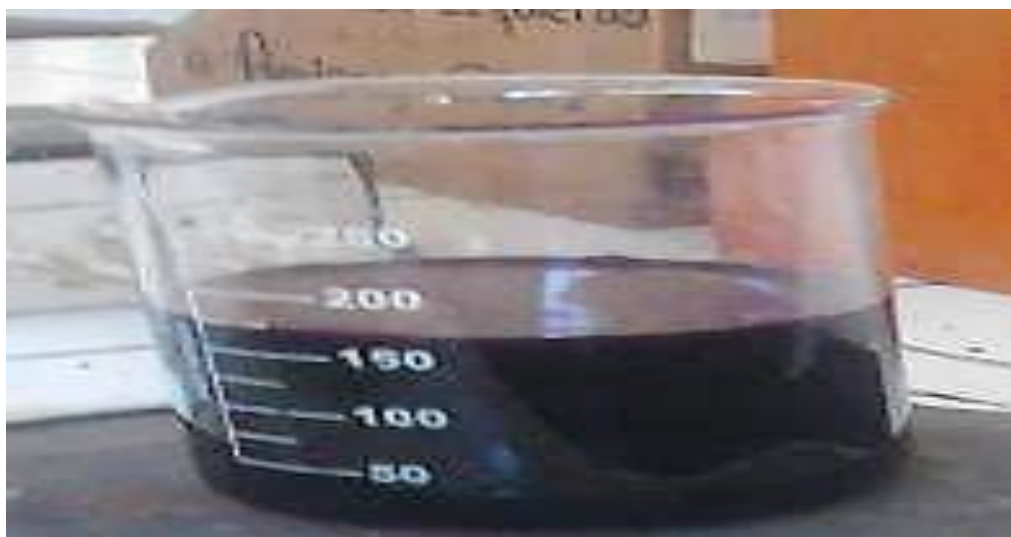
Lo convertimos a libras:

$$0.037605 \frac{\text{Kg } H_2}{\text{hr-KA}} * \frac{2,20462 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} = 0.08291 \text{ lb de } H_2$$

## ANEXOS



*Figura 27:* Pesado de permanganato de potasio



*Figura 27:* Disolución de permanganato de potasio en agua destilada



*Figura 29: Enrazado de fiolas*



*Figura 30: Almacenamiento de permanganato de potasio en una bolleta ambar*



*Figura 31: Orificios a tubo de ½"*



*Figura 32: Tubos de 4" de neutralización de CO<sub>2</sub>*





*Figura 33:* Sellado de tubos de 4'' con tapas (solo parte inferior)





*Figura 34: Orificios de  $\frac{1}{2}$ " a tapas de tubos de 4"*



*Figura 35: Conexión con niples de  $\frac{1}{2}$ "*



*Figura 36: Conexión de niples con uniones de 1/2"*



*Figura 37: Conexión de uniones con tubos de ½" de 10 cm*

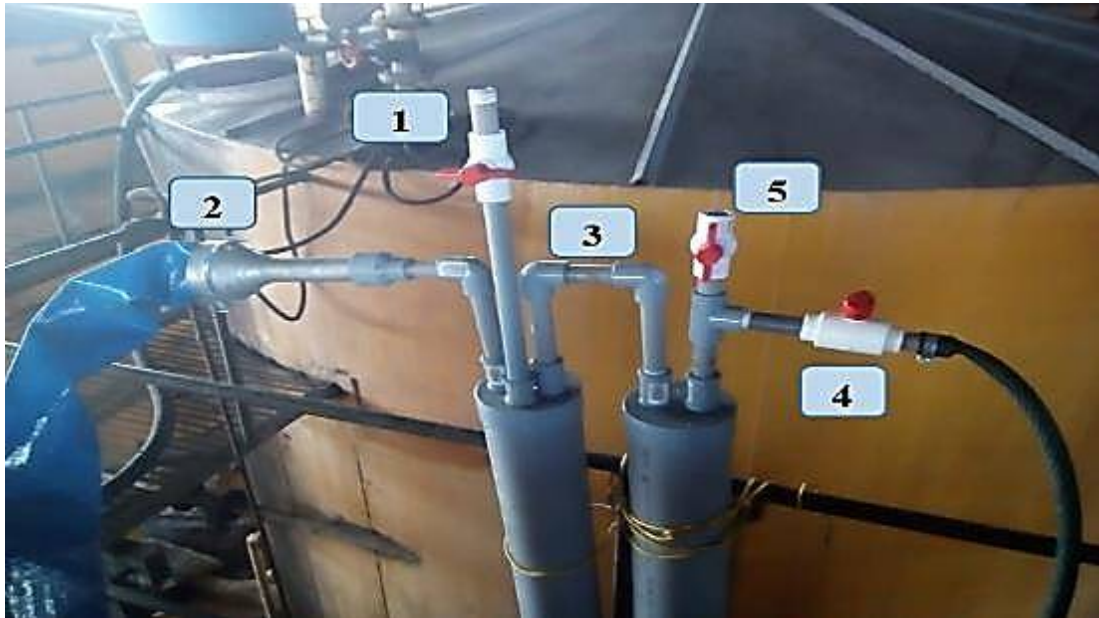


*Figura 38:* Union de codos 1/2" para conexión entre tapas





*Figura 39:* Conexión de tubos con llaves globos



*Figura 40:* Union al tubo de alimentacion de CO<sub>2</sub>



*Figura 41:* Colocación de abrazadera de cremallera



*Figura 42: Equipo terminado para llevar proceso*



*Figura 43: Hermetizado de Tanque de fermentación*





*Figura 44:* Vaciado de permanganato de potasio a tubo



*Figura 45:* Aseguramiento de brida con abrazadera





*Figura 46: Comprobación de CO<sub>2</sub> por válvula de desfogue*



*Figura 47: Conexión de salida de CO<sub>2</sub> limpio a compresor*



*Figura 48:* Conexión de compresor a tanque de almacenamiento



*Figura 49: Proceso de recuperación de CO<sub>2</sub>*



*Figura 50: Control de almacenamiento de CO<sub>2</sub>*



*Figura 51:* Orificios a recipiente de celda





*Figura 52:* Colocación de pernos y terminal crimpado



*Figura 53: Orificio a tapa del recipiente de electrolisis*



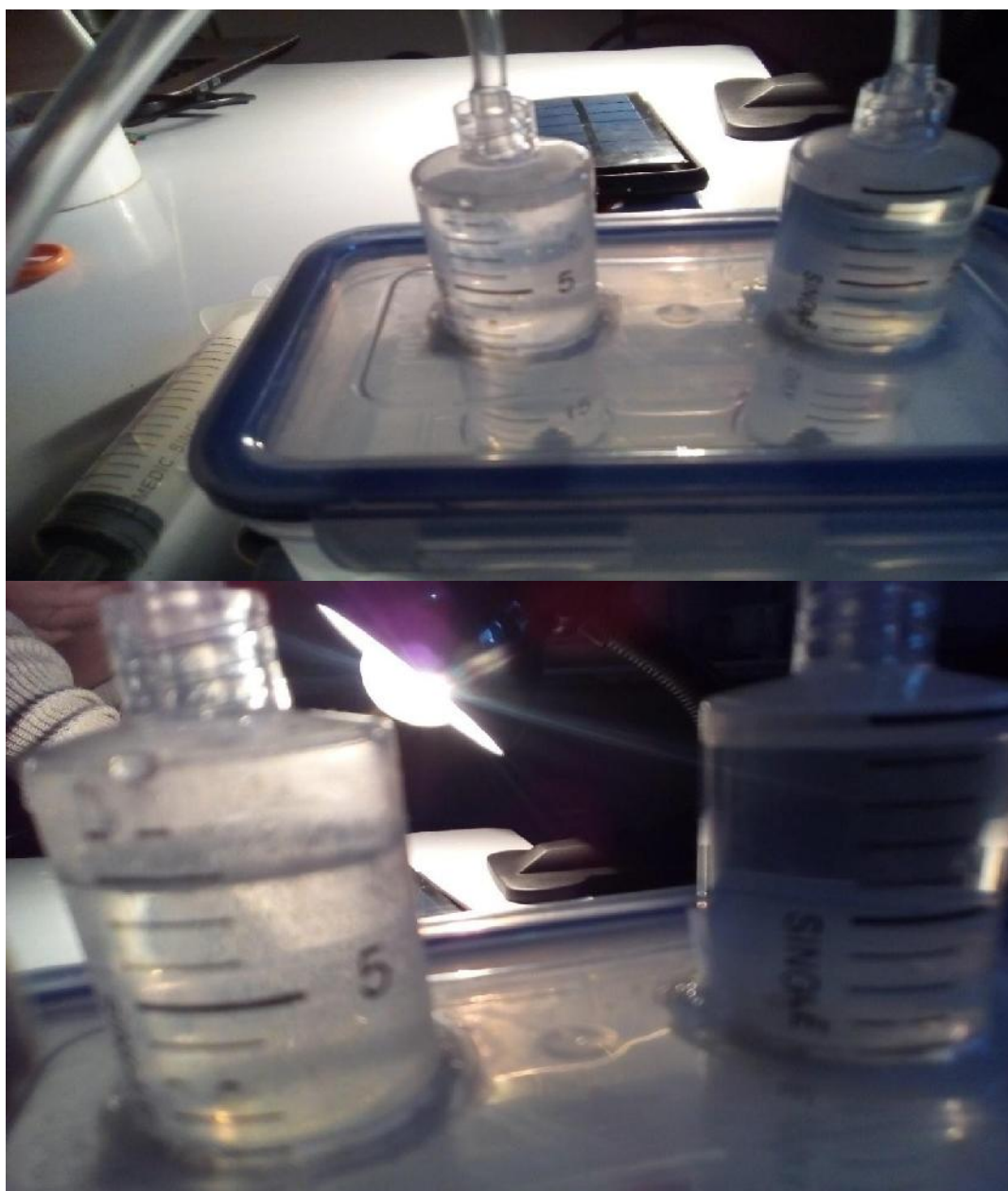
*Figura 54: Conexión con mangueras*



*Figura 55: Medición de voltaje del panel solar para celda electrolítica*

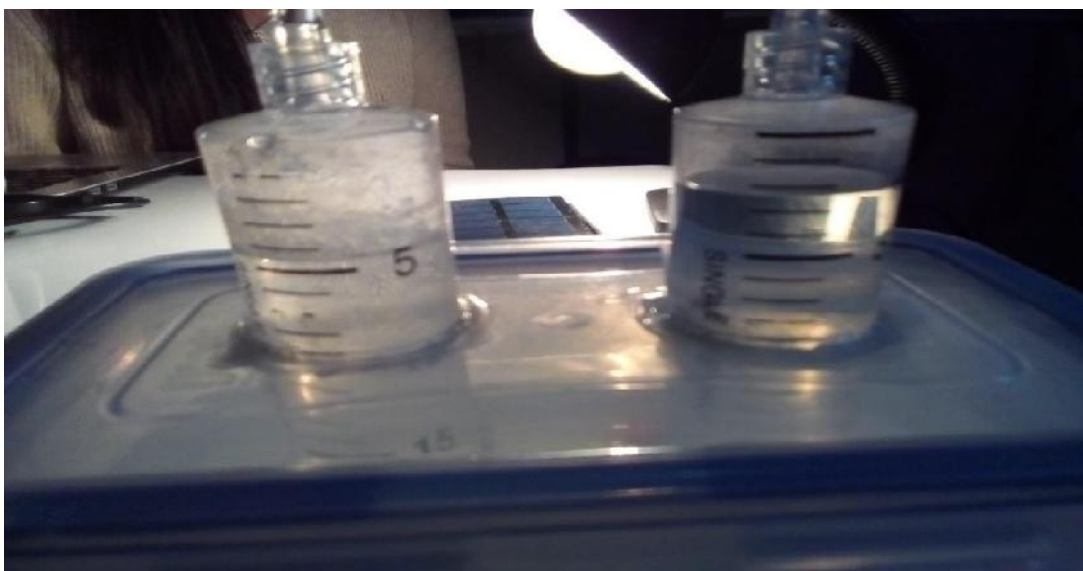


*Figura 56: Llenado a recipiente*

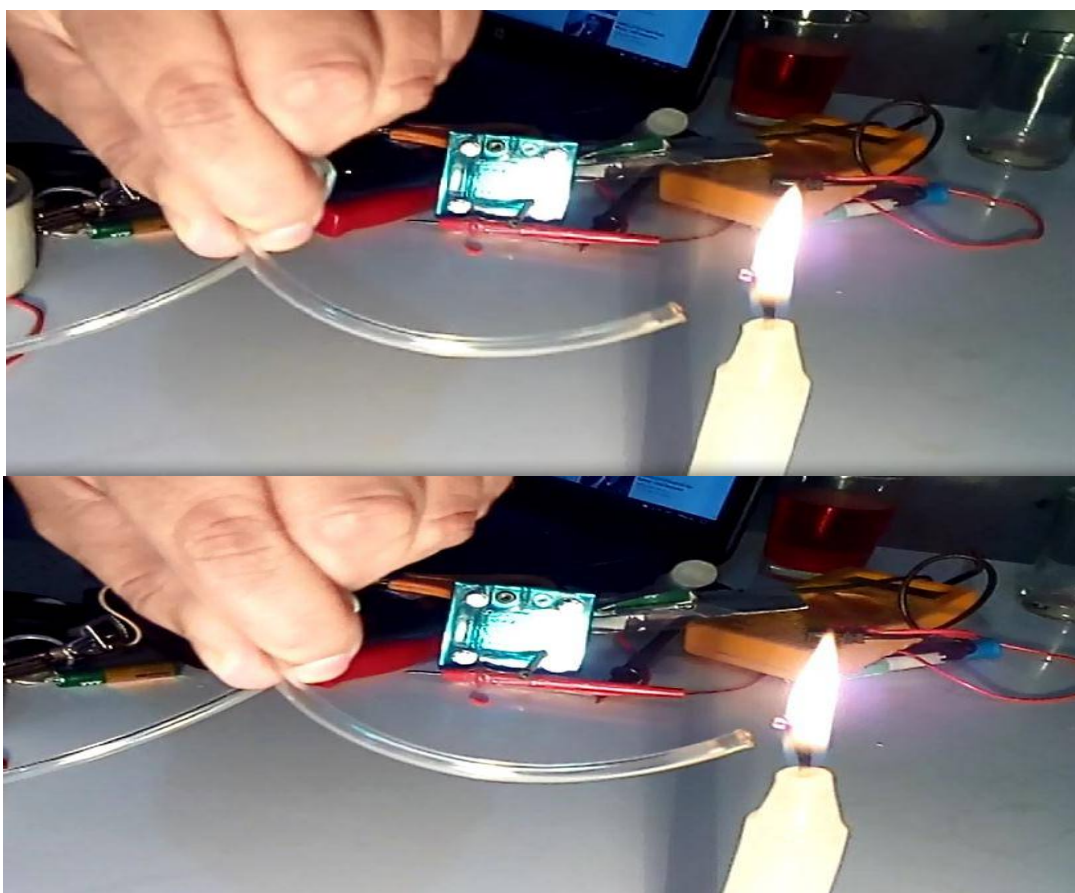


*Figura 57:* Producción de hidrogeno en celda electrolítica

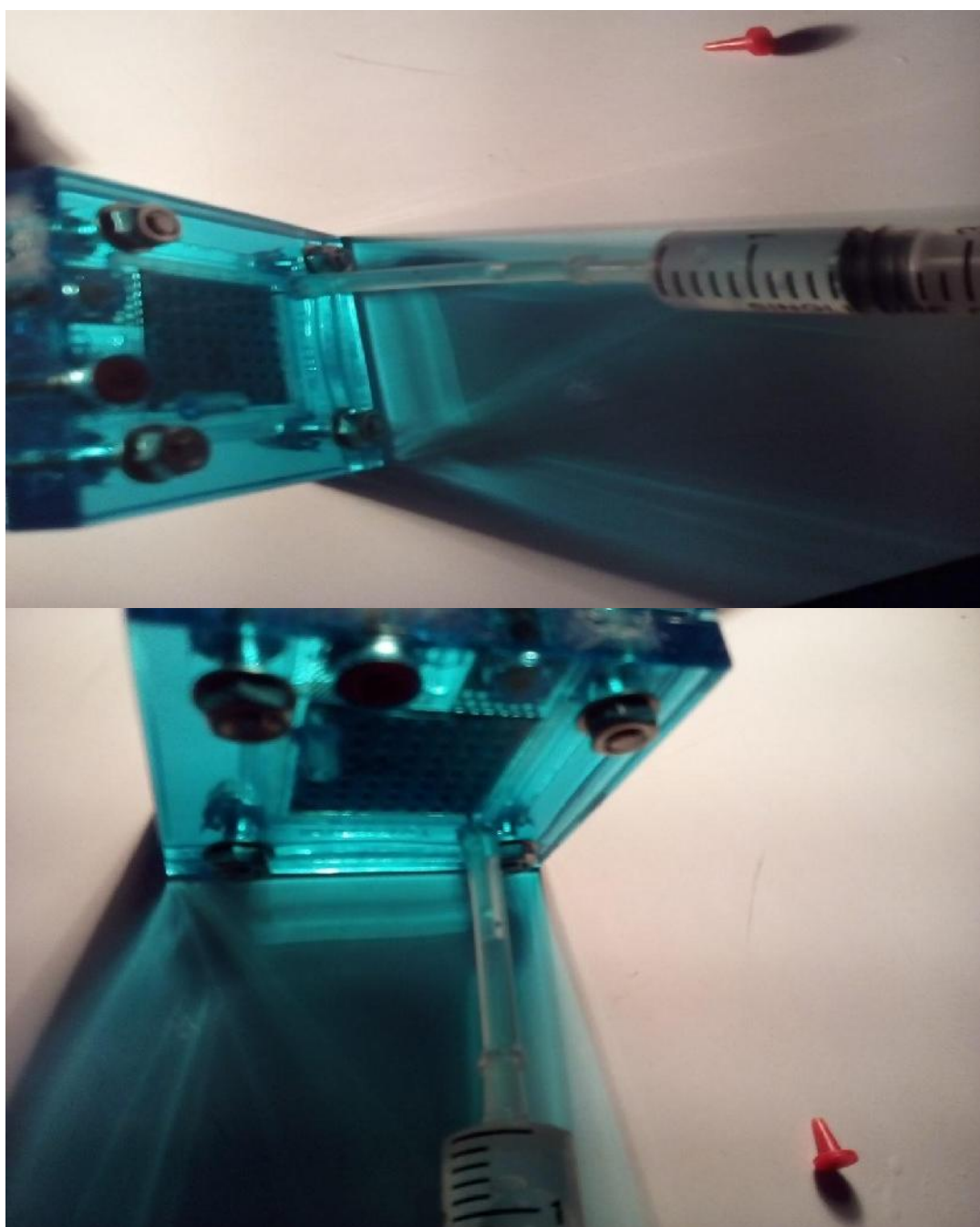




*Figura 58: Verificación de la producción de  $H_2$  y  $O_2$  en relación de 2 a 1*



*Figura 59: Comprobación de  $H_2$*



*Figura 60: Llenado con agua destilada a PEM ELECTROLYZER*

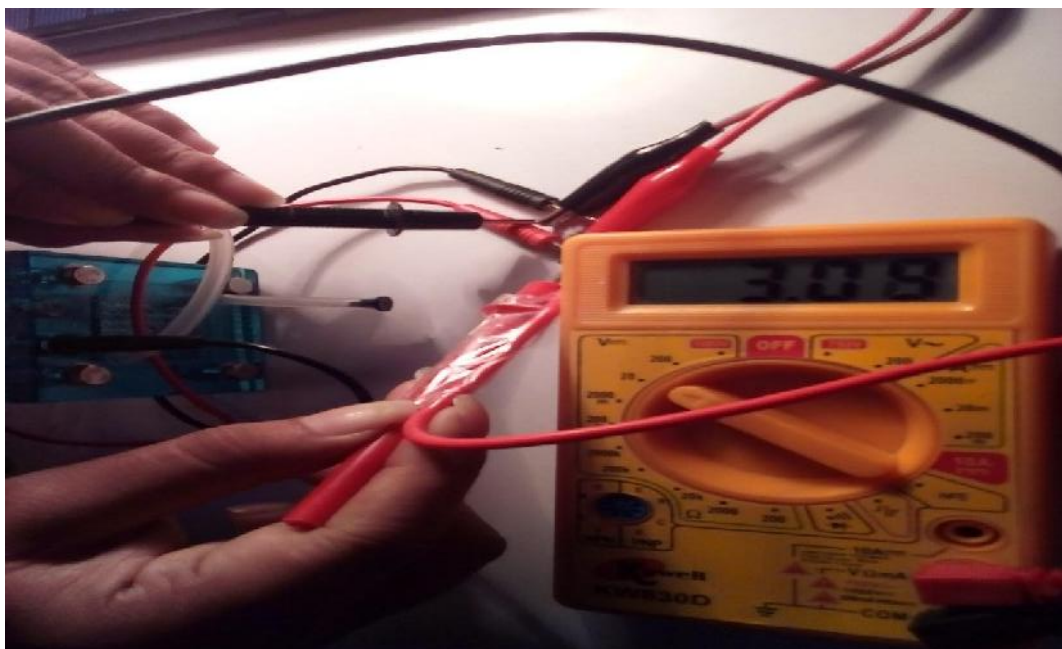


Figura 61: Toma de medida de voltaje para PEM Electrolyzer

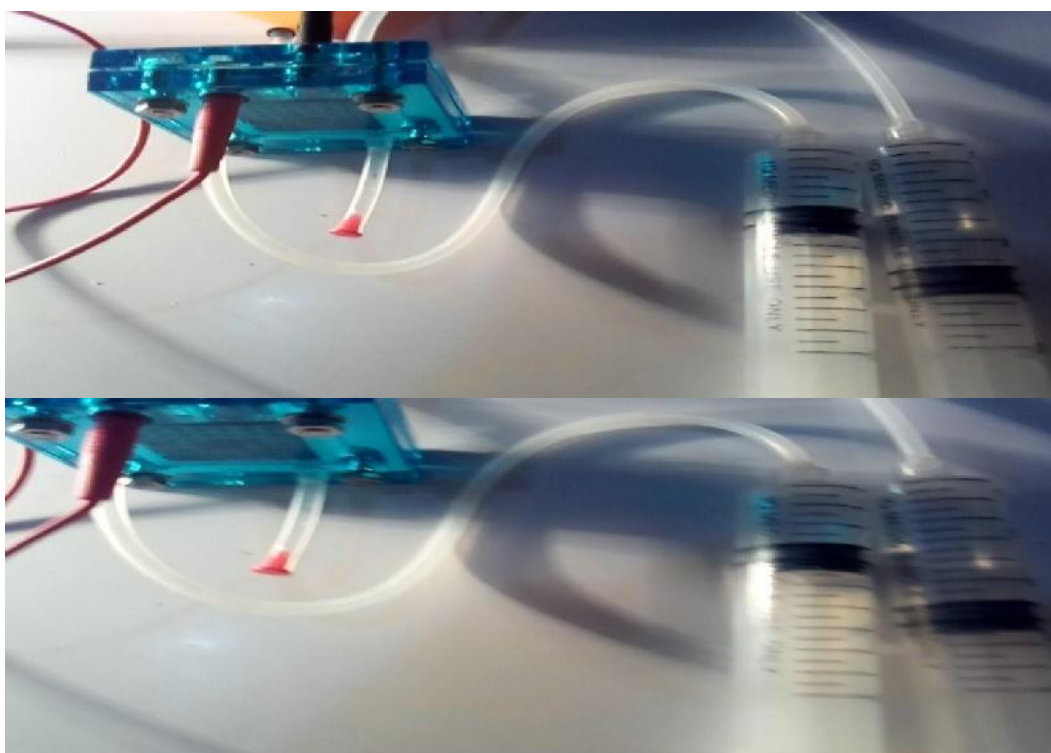
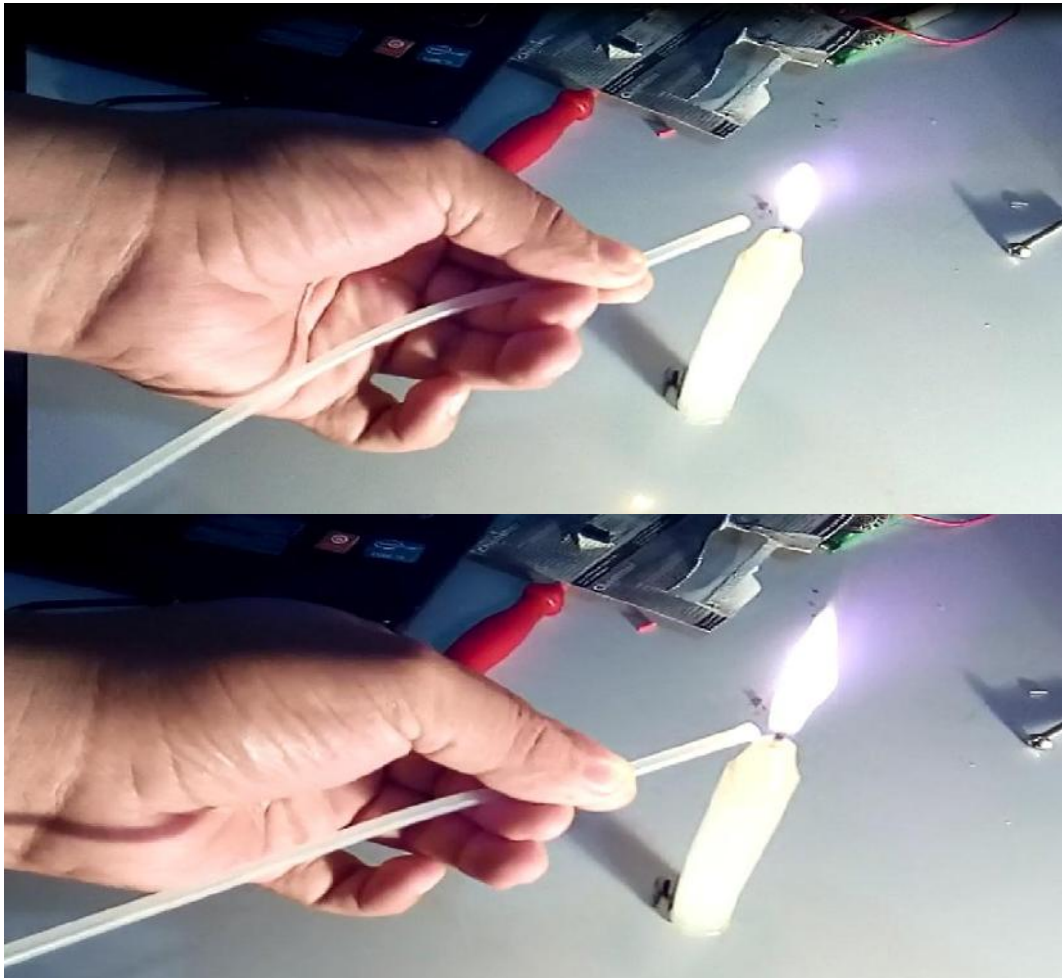
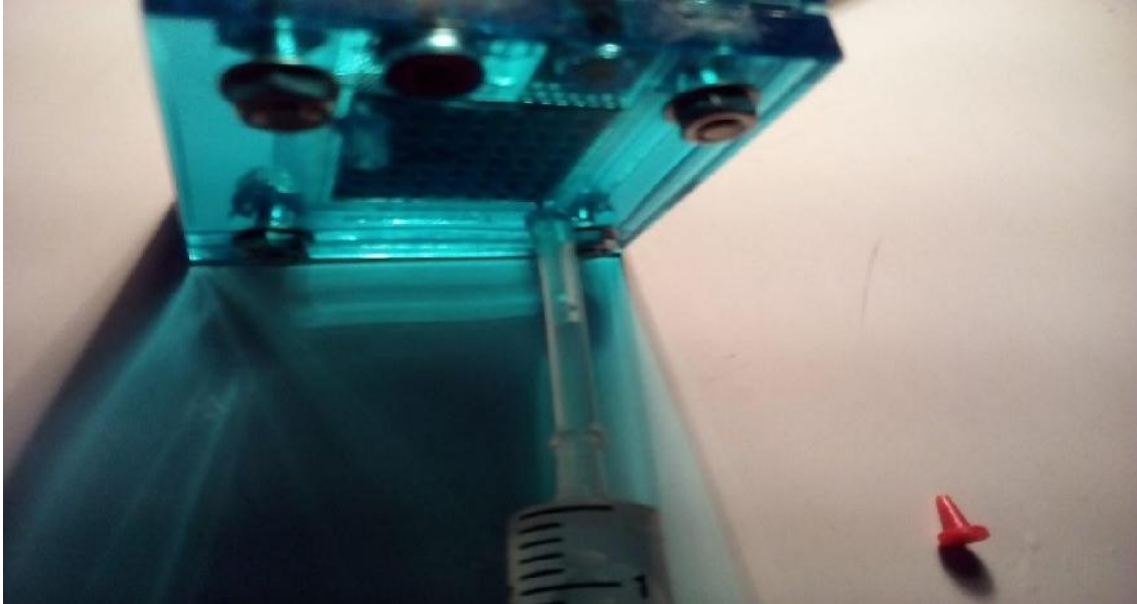


Figura 62: Comprobación de medida de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> – relación 2 a 1

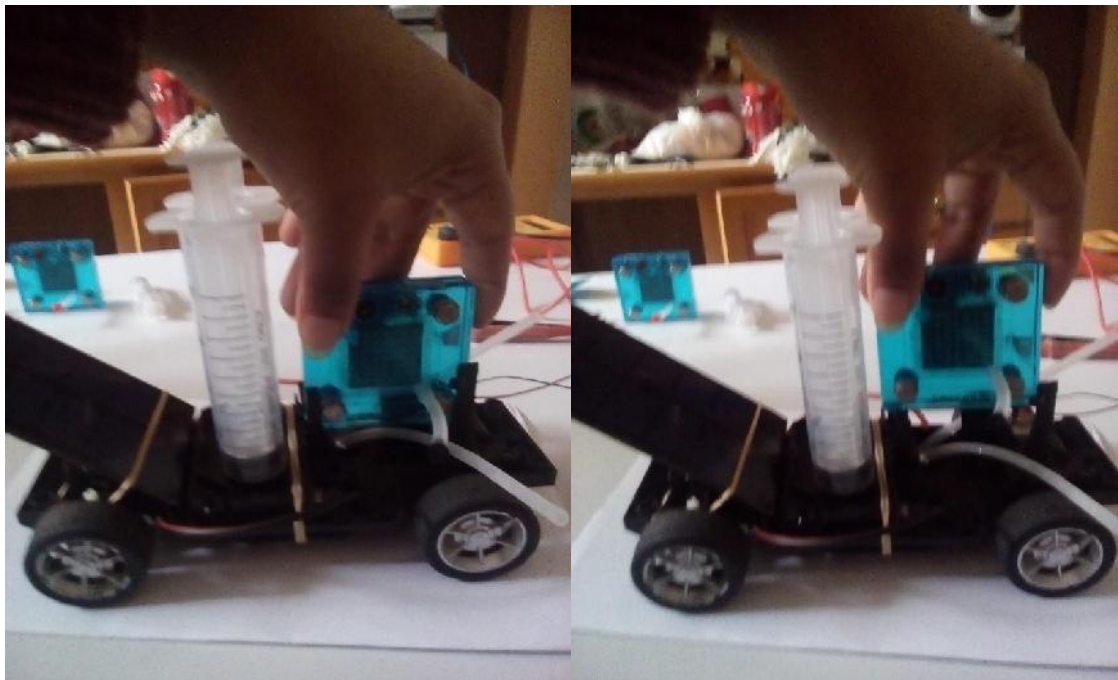




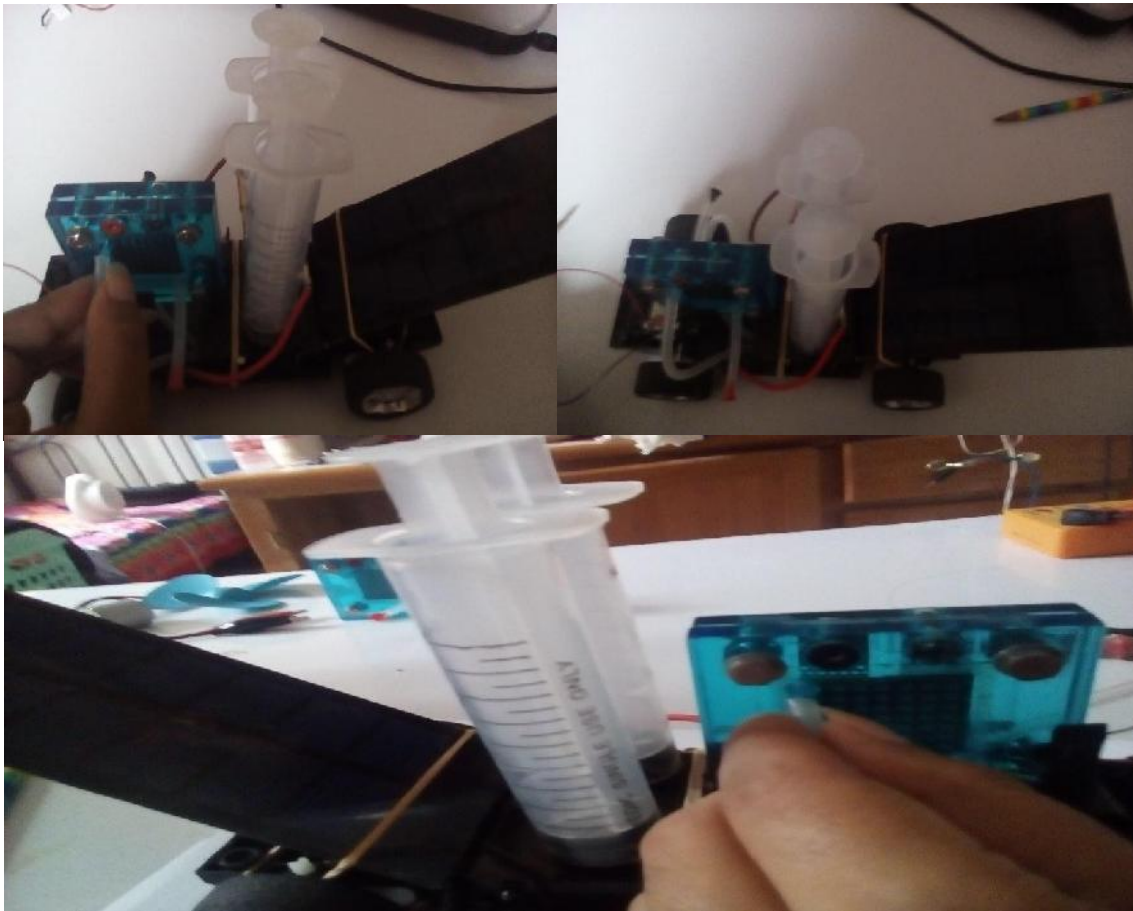
*Figura 63:* Verificación de la presencia de Hidrogeno



*Figura 64:* Inyección del agua destilada al PEM REVERSIBLE FUEL CELL



*Figura 65:* Instalación de PEM en carro prediseñado



*Figura 66: Conexión de mangueras a PEM*



*Figura 67: Conexión de del panel solar al PEM*

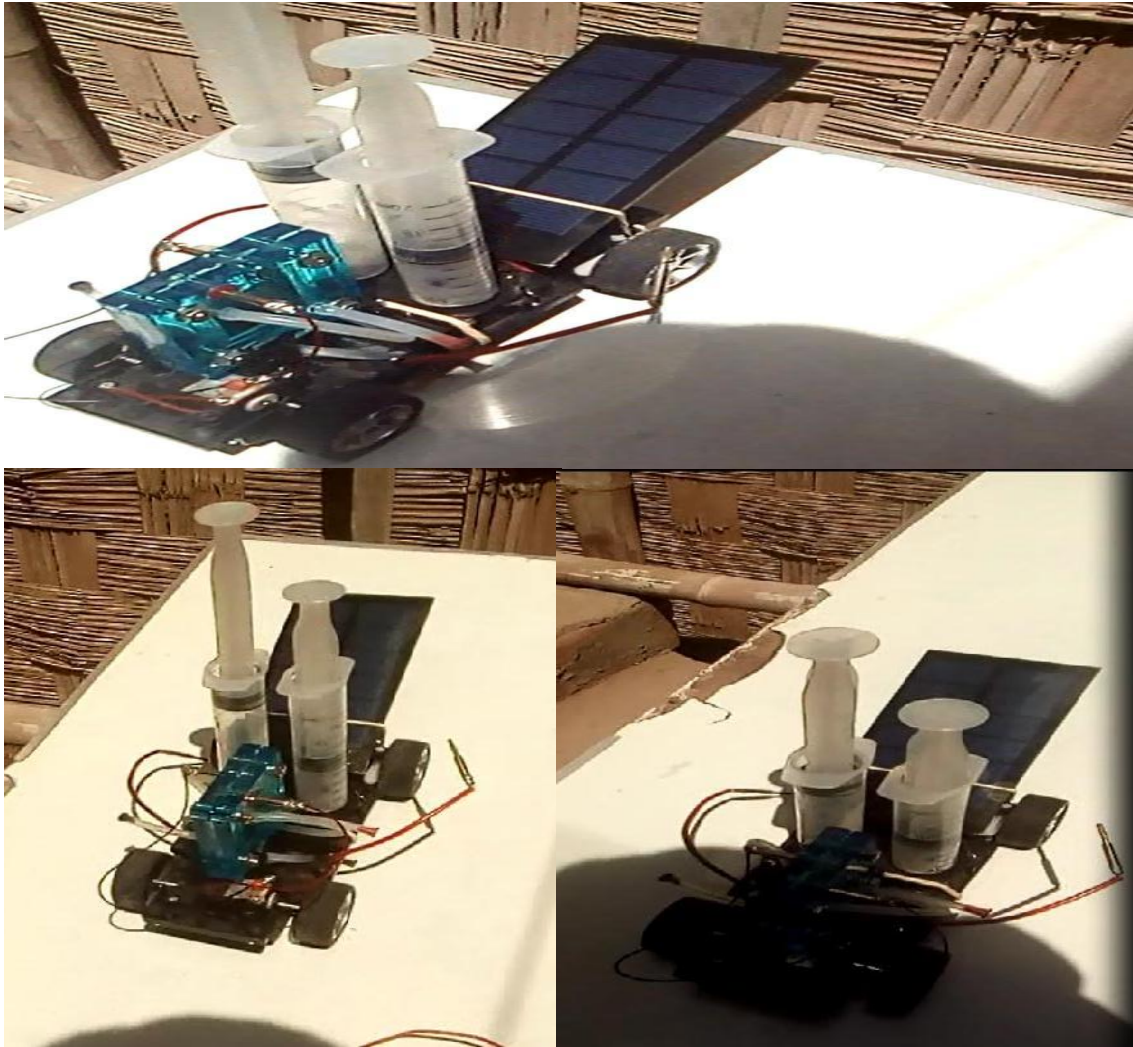




*Figura 68: Toma de medida de voltaje del panel solar in situ*



*Figura 69: Producción de hidrogeno*



*Figura 70: Trayecto del carro con energía del hidrogeno*





*Figura 71:* PEM REVERSIBLE FUEL CELL

**Especificaciones del modo de la pila de combustible:**

- Voltaje de salida: 0.6 V DC
- Corriente de salida: 360 mA
- Potencia: 210 mW
- Dimensiones: 2.1 "x 2.1" x 0.4 "(54 x 54 x 17 mm)

**Especificaciones del modo del electrolizador:**

- Tensión de entrada: 1.8 - 3 V DC
- Corriente de entrada: 0.7 A
- Tasa de producción de Hidrógeno: 7 mL / min
- Tasa de producción de Oxígeno: 3.5 mL / min



*Figura 72: PEM ELECTROLYZER*

**Características:**

- Convierte el agua en Hidrógeno y Oxígeno
- Totalmente compatible con el rango de educación Horizon

**Especificaciones:**

- Tensión de entrada: 1.8 - 3 V DC
- Corriente de entrada: 1 A
- Tasa de producción de Hidrógeno: 7 mL / min a 1 A
- Tasa de producción de Oxígeno: 3.5 mL / min a 1 A
- Dimensiones: 2.1 "x 2.1" x 0.7 " (54 x 54 x 17 mm)
- Peso: 2,4 oz (69,7 g)



*Figura 73:* Verificación de salida de CO<sub>2</sub> de fermentador



*Figura 74:* Control de presión en neutralizador