



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE QUÍMICA

**“RECUPERACIÓN DE AGUA DEL PROCESO
ELECTROQUÍMICO EN LA PRODUCCIÓN DE
HIDRÓGENO VERDE”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

QUÍMICO

AUTORAS: SONNIA MARISOL MIRANDA SÁNCHEZ

NOEMI TATIANA QUISHPI CHASILUISA

DIRECTORA: Dra. MAGDY MILENI ECHEVERRIA GUADALUPE. PhD.

Riobamba - Ecuador

2021

© 2021, Sonia Marisol Miranda Sánchez & Noemi Tatiana Quishpi Chasiluisa

Se autoriza la reproducción parcial o total, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotras, Sonia Marisol Miranda Sánchez y Noemi Tatiana Quishpi Chasiluisa declaramos que el presente trabajo de integración curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 18-08-2021.



Sonia Marisol Miranda Sánchez

CI: 18097052-1



Noemi Tatiana Quishpi Chasiluisa

CI: 060479283-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular: Tipo: Proyecto de Investigación “**RECUPERACIÓN DE AGUA DEL PROCESO ELECTROQUÍMICO EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE**”, de responsabilidad de las señoritas: **SONNIA MARISOL MIRANDA SÁNCHEZ** y **NOEMI TATIANA QUISHPI CHASILUISA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Dr. Edmundo Rodrigo Caluña Sánchez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**EDMUNDO RODRIGO
CALUNA SANCHEZ**

18-08-2021

Dra. Magdy Mileni Echeverría PhD.
**DIRECTORA DEL TRABAJO
DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**



Firmado electrónicamente por:
**MAGDY MILENI
ECHEVERRIA
GUADALUPE**

18-08-2021

Dra. Jheny del Carmen Orbe Ordoñez PhD.
MIEMBRO DE TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**JHENY DEL
CARMEN ORBE
ORDONEZ**

18-08-2021

DEDICATORIA

El presente trabajo de integración curricular lo dedico con todo mi amor y cariño a mis padres Isabel y Edison, por estar siempre a mi lado brindándome su apoyo y amor incondicional; a toda mi familia que siempre me han apoyado; a mis hermanas Tania y Magali, por todo el cariño brindado; a mi segunda madre, la más bonita estrella del cielo.

A mi hijo; que quizá en este momento no comprendas mis palabras, pero cuando seas capaz de hacerlo, deseo que te des cuenta cuanto te amo, eres la razón de que me levante cada día, para esforzarme por nuestro futuro, eres mi principal motivación, con cariño para mi ángel de la guardia, Gabriel.

Noemi

El presente trabajo de integración curricular se lo dedico principalmente a Dios por darme fuerza para cumplir mis metas, objetivos, guiarme por el camino del bien y no permitir que desmaye frente a los problemas durante mi formación académica y personal.

A mi madre Lilian Miranda por ser la mujer que, con su amor, comprensión, consejos, compañía y protección en todo momento durante mi formación profesional me ha brindado su apoyo incondicional, no habrá manera de devolverte tanto de lo que me has dado y me has ofrecido durante toda mi vida. Me ha enseñado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter y el coraje para cumplir mis metas.

A mis tíos Ramiro y Cecilia Miranda porque me han brindaron su apoyo incondicional. A mis primos por ser mis hermanos y amigos durante todo este proceso.

Sonnia

AGRADECIMIENTO

A nuestros padres, por ser el pilar fundamental de nuestras vidas y haber tenido fe en nuestra perseverancia.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por permitirnos formarnos como profesionales y la Facultad de Ciencias. A nuestra tutora, Dra. Magdy Echeverría por enseñarnos, guiarnos y permitirnos realizar el trabajo de integración curricular y a nuestra alma máter, Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC).

Al Ing. Rafael Cordova, técnico docente del laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias; por su paciencia, dedicación y por compartir sus conocimientos para desarrollar el presente trabajo, al pasante Adolfo Almeida por su colaboración en el modelado del prototipo.

Sonnia y Noemi

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN	xvi
ASBTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1. Antecedentes	5
1.2. Bases teóricas	8
1.2.1. Elemento químico hidrógeno (H_2).....	8
1.2.2. Métodos de obtención de H_2.....	10
1.2.2.1. Electrólisis del agua.....	10
1.2.3. Pilas de combustible de H_2.....	11
1.2.4. Funcionamiento de las pilas de H_2 a escala molecular	13
1.2.5. Tipos de pilas de combustible	14
1.2.5.1. Pilas de combustible alcalinas (Alcaline Fuel Cell o AFC):	16
1.2.5.2. Membrana de electrolito de polímero o celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (Proton Exchange Membrane o PEM)	17
1.2.5.3. Pilas de combustible de ácido fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell o PAFC).....	18
1.2.5.4. Pilas de combustible de carbonato fundido (Molten Carbonate Fuel Cell o MCFC):	19
1.2.5.5. Pilas de combustible de Óxidos Sólidos (Solid oxide fuel cell o SOFC):.....	19
1.2.5.6. Pilas de combustible de Metanol Directo (Direct Methanol Fuel Cell o DMFC):	20
1.2.6. Conclusiones sobre el estado del arte.....	22
1.2.7. Equipo de laboratorio: tecnología de pilas de combustible	23
1.2.7.1. Electrolizador (corriente continua de 24 VDC).....	23
1.2.7.2. Estructura y funcionamiento de una pila de combustible de H_2	25
1.2.8. Recuperación de agua en pilas de combustible	25
1.2.8.1. Ley de Avogadro "Relación cantidad-volumen".....	25
1.2.8.2. La crisis mundial del agua	26
1.2.8.3. Países que sufren estrés hídrico.	27

1.2.8.4.	<i>La niebla como recurso para obtener agua.....</i>	27
1.2.8.5.	<i>Niebla de Evaporación.....</i>	27
1.2.9.	<i>Prototipos o sistemas de recuperación de agua.....</i>	27
1.2.10.	<i>Tipos de atrapanieblas.....</i>	28
1.2.10.1.	<i>Atrapanieblas Macrodiamante.....</i>	28
1.2.10.2.	<i>Atrapaniebla Cilíndrico.....</i>	29
1.2.10.3.	<i>Atrapanieblas Bidimensional.....</i>	29
1.2.11.	<i>Materiales que se pueden emplear como malla condensadora.....</i>	29
1.2.11.1.	<i>Características que debe cumplir los materiales que son utilizados como malla colectora o condensadora.....</i>	30
1.2.12.	<i>Pilas de combustible de H₂ y energías renovables.....</i>	30
1.2.13.	<i>Producción de H₂ verde.....</i>	30
1.2.13.1.	<i>Potencial de descarbonización del H₂ verde.....</i>	31
1.2.14.	<i>Energía Solar.....</i>	32
1.2.14.1.	<i>Celda Fotovoltaica.....</i>	33
1.2.15.	<i>Energía Eólica.....</i>	39
1.2.16.	<i>Prototipos que utilizan combustible de H₂ y energías renovables.....</i>	39
1.2.16.1.	<i>Automóvil con paneles solares y control remoto.....</i>	39
1.2.16.2.	<i>Pila de combustibles de H₂ con energía eólica y solar.....</i>	41
1.2.16.3.	<i>Automóvil con panel solar.....</i>	42

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO.....	44
2.1.	Área de estudio.....	44
2.2.	Tipo y diseño de la investigación.....	44
2.2.1.	<i>Según el enfoque de estudio.....</i>	44
2.2.2.	<i>Según el objetivo:.....</i>	44
2.2.3.	<i>Según el nivel de profundización en el objeto de estudio.....</i>	45
2.2.4.	<i>Según la manipulación de variables.....</i>	45
2.2.5.	<i>Según el periodo temporal.....</i>	45
2.2.6.	<i>Según el lugar de estudio.....</i>	45
2.3.	Población de estudio.....	45
2.4.	Tamaño de la muestra.....	45
2.5.	Matriz de consistencia.....	47
2.6.	Técnicas y metodologías.....	48
2.6.1.	<i>Prototipo para recuperar agua de pilas de combustible de H₂ "water recovery tank".</i>	48

2.6.2.	<i>Modelado del prototipo</i>	48
2.6.3.	<i>Impresión del prototipo "water recovery tank"</i>	50
2.6.7.	<i>Materiales y Equipos</i>	51
2.6.7.1.	<i>Materiales y Equipos proporcionados por la ESPOCH</i>	51
2.6.7.2.	<i>Materiales y Equipos adicionales</i>	51
2.7.	Pre-Experimentos	52
2.7.1.	<i>Curva característica del electrolizador</i>	52
2.7.2.	<i>Primera ley de Faraday: Medición del volumen de H₂ en función del tiempo de . electrolización</i>	52
2.7.3.	<i>Primera ley de Faraday: Medición del volumen de H₂ en función de la energía de . electrolización</i>	52
2.7.4.	<i>Medición de volumen de H₂</i>	52
2.7.5.	<i>Medición de volumen de H₂ y O₂</i>	52
2.7.6.	<i>Medición de tiempo de Purga</i>	53
2.7.7.	<i>Comprobar el funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno alimentada con energía renovable</i>	53
2.7.8.	<i>Prototipo "water recovery tank"</i>	54
2.7.9.	<i>Vehículo de hidrógeno y energía renovable</i>	54
2.8.	Diseño Experimental	54
2.9.	Modelo estadístico e hipótesis de interés	55
2.10.	ANOVA del diseño factorial a x b	56

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS	57
3.1.	Ensamblaje del prototipo "water recovery tank"	57
3.2.	Conexiones eléctricas del prototipo "water recovery tank"	57
3.3.	Pre-Experimentos	58
3.3.1.	<i>Curva característica del electrolizador</i>	58
3.3.2.	<i>Primera ley de Faraday: Medición del volumen de H₂ en función del tiempo de electrolización</i>	58
3.3.3.	<i>Primera ley de Faraday: Medición del volumen de H₂ en función de la energía de electrolización</i>	59
3.3.4.	<i>Medición de volumen de H₂</i>	60
3.3.5.	<i>Medición de volumen de H₂ y O₂</i>	61
3.3.6.	<i>Medición de tiempo de Purga</i>	63
3.4.	Experimentos	66

3.4.1.	<i>Tasa de fuga de hidrógeno con el prototipo "water recovery tank"</i>	66
3.4.2.	<i>Comprobar el funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno alimentada con energía renovable</i>	67
3.4.3.	<i>Prototipo "water recovery tank"</i>	67
3.4.3.1	<i>ANOVA del diseño factorial a x b para el prototipo "water recovery tank"</i>	69
3.4.4.	<i>Vehículo de hidrógeno y energía renovable</i>	70
3.4.4.1.	<i>ANOVA del diseño factorial a x b para el Vehículo de hidrógeno y energía renovable.</i>	71
	CONCLUSIONES	73
	RECOMENDACIONES	74
	BIBLIOGRAFÍA	75
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Formación de la molécula de H ₂	9
Tabla 2-1:	Tipos de pilas de combustible	15
Tabla 3-1:	Reacciones químicas según el tipo de pila	21
Tabla 4-1:	Diferencia entre hidrogeno gris e hidrógeno verde	31
Tabla 5-1:	Electrón "defecto o hueco"	35
Tabla 6-1:	Formación de un campo magnético	37
Tabla 7-1:	Efecto fotovoltaico.....	38
Tabla 1-2:	Matriz de consistencia.....	47
Tabla 2-2:	Materiales y Equipos proporcionados por la ESPOCH.....	51
Tabla 3-2:	Materiales y Equipos adicionales.....	51
Tabla 4-2:	ANOVA para el diseño factorial a x b.....	56
Tabla 1-3:	Medición del volumen de H ₂ en función del tiempo.....	58
Tabla 2-3:	Medición del volumen de H ₂ en función de la corriente del electrolizador.....	59
Tabla 3-3:	Medición del volumen de H ₂ en función de la corriente de electrolización.....	60
Tabla 4-3:	Medición del volumen de vapor de agua en función del tiempo.....	62
Tabla 5-3:	Medición del voltaje en función del tiempo.....	65
Tabla 6-3:	Medición de la tasa de fuga en función del tiempo.....	66
Tabla 7-3:	Medición del volumen de agua recuperada en función de la velocidad del proceso electroquímico en las pilas de H ₂	68
Tabla 8-3:	ANOVA para el diseño factorial a x b.....	69
Tabla 9-3:	Medición del tiempo de funcionamiento del vehículo de H ₂ en función del tiempo de carga del panel solar y la radiación.....	70
Tabla 10-3:	ANOVA para el diseño factorial a x b.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Esquemas de la electrólisis del agua.....	11
Figura 2-1:	Electrólisis del agua	11
Figura 3-1:	Pilas de combustible.....	12
Figura 4-1:	Funcionamiento de las pilas de combustible	13
Figura 5-1:	Pilas de combustible alcalinas (AFC).....	16
Figura 6-1:	Membrana de electrolito de polímero o celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM).....	18
Figura 7-1:	Pilas de combustible de carbonato fundido	18
Figura 8-1:	Pilas de combustible de ácido fosfórico	19
Figura 9-1:	Pilas de combustible.....	20
Figura 10-1:	Pilas de combustible de Metanol Directo	21
Figura 11-1:	UniTrain-I SO4204-4L "Fuel Cell"	23
Figura 12-1:	Electrolizador UniTrain-I SO4204-4L "Fuel Cell"	24
Figura 13-1:	Ley de los volúmenes de combinación	25
Figura 14-1:	Atrapaniebla	28
Figura 15-1:	Atrapaniebla macrodiamante.....	28
Figura 16-1:	Atrapaniebla cilíndrico	29
Figura 17-1:	Atrapaniebla bidimensional.....	29
Figura 18-1:	Potencial de descarbonización de H ₂ verde.....	31
Figura 19-1:	Características de un material semiconductor.....	33
Figura 20-1:	Estructura de una celda fotovoltaica.....	34
Figura 21-1:	Bandas de energía del silicio	35
Figura 22-1:	Formación del campo magnético.....	36
Figura 23-1:	Energía solar	39
Figura 24-1:	Energía eólica.....	39
Figura 25-1:	Automóvil con paneles solares y control remoto.....	40
Figura 26-1:	Pila de combustibles de H ₂ con energía eólica y solar.....	41
Figura 27-1:	Automóvil con panel solar.....	42
Figura 1-2:	Propuesta 1.....	48
Figura 2-2:	Propuesta 2.....	49
Figura 3-2:	Propuesta 3.....	49
Figura 4-2:	Propuesta final.....	50
Figura 5-2:	Partes del prototipo "water recovery tank".....	50
Figura 1-3:	Ensamblaje del prototipo "water recovery tank".....	57
Figura 2-3:	Conexiones y ajustes del prototipo "water recovery tank"	57

Figura 3-3:	Pruebas para un automóvil con panel solar.....	67
Figura 4-3:	Prototipo "water recovery tank".....	68
Figura 5-3:	Experimentación vehículo de hidrógeno y energía renovable.....	70

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1:	Eficiencia de las pilas de combustible.....	22
Gráfico 2-1:	Demanda global de energía suministrada con hidrógeno.....	32
Gráfico 1-3:	Resultados del experimento Energía de electrolización vs. Voltaje.....	58
Gráfico 2-3:	Resultados del experimento Voltaje vs. Tiempo.....	59
Gráfico 3-3:	Resultados del experimento Voltaje vs. Energía de electrolización.....	60
Gráfico 4-3:	Resultado del experimento \bar{V} de H ₂ vs. Corriente de electrolización.....	61
Gráfico 5-3:	Resultados del experimento volumen de H ₂ y O ₂ generado o consumido a diferentes tiempos.....	62
Gráfico 6-3:	Resultados del experimento Volumen de H ₂ y O ₂ generado o consumido a diferentes tiempos.....	63
Gráfico 7-3:	Tiempo en el que cae la corriente que pasa por la resistencia variable.....	64
Gráfico 8-3:	Resultados del experimento Medición de tiempo de Purga.....	64
Gráfico 9-3:	Resultados del experimento Voltaje vs. Tiempo.....	66

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS EN LABORATORIO DE REDES INTELIGENTES Y ENERGÍAS
RENOVABLES

ANEXO B: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE VARIANZA EXPERIMENTO WATER
RECOVERY TANK

ANEXO C: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE VARIANZA EXPERIMENTO VEHÍCULO
DE HIDRÓGENO

ANEXO D: REPORTE URKUND

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

C	Carbono
CE	Conductividad Eléctrica
CO₂	Dióxido de Carbono
CC	Corriente continua (CC)
ESPOCH	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
GIDAC	Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático
H₂	Hidrógeno
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
O₂	Oxígeno
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PEM	Celdas de Combustible de Intercambio Protónico
PPM	Partes por millón

RESUMEN

El presente estudio demuestra un sistema de recuperación de agua del proceso electroquímico en la producción de hidrógeno verde, para lo cual se fabricó un prototipo denominado "water recovery tank"; adicionalmente se experimentó con un prototipo: un vehículo que funciona a base de pilas de hidrógeno, alimentadas por energía fotovoltaica. Para el análisis de la capacidad de recuperación de agua del proceso electroquímico se colocó el prototipo en la salida de vapor de agua en el experimentador de pilas de combustible del laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias; los experimentos del vehículo se ejecutaron en el mismo lugar. Para el análisis estadístico se utilizó un diseño factorial 2e2 en ambos casos, para el tanque, el efecto de la corriente a través de la carga (1 A – 1,5 A) fue el factor A, y el tiempo de purga (cada 10 min – cada 25 min) fue el factor B; la variable estudiada fue la cantidad de agua recuperada (ml – prototipo). Para el vehículo la variable fue el tiempo de funcionamiento, el factor A, fue el tiempo de carga del panel solar y el factor B, la radiación. Se realizaron tres replicas en cada experimento, el valor máximo promedio para el tanque es 3,67 gotas en el punto (1,5 A, 10 min); en el caso del vehículo el tiempo máximo promedio de funcionamiento es 162,37 s en el punto (radiación alta, 15 min). Se concluye que tanto el tiempo de purga como la corriente afectan significativamente al experimento de recuperación de agua; se recolectó un total de 1,5ml de agua en dos horas con una eficiencia del 70%. En el caso del vehículo se demostró el uso combinado de energías renovables. Se recomienda utilizar electroválvulas especiales para hidrógeno y evitar fugas durante el proceso.

Palabras clave: <ELECTROQUÍMICA>, <PILA DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE PROTONES (PEM)>, <LUCAS NÜLLE>, <ATRAPANIEBLAS>, <WATER RECOVERY TANK>, <ENERGÍAS RENOVABLES>.

LEONARDO
FABIO
MEDINA
NUSTE

Firmado
digitalmente por
LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Fecha: 2021.09.30
11:45:15 -05'00'



1652-DBRA-UTP-2021

ASBTRACT

This study indicates a water recovery system from the electrochemical process in the production of green hydrogen, for which a prototype called a water recovery tank was manufactured. Additionally, they experimented with a prototype vehicle that runs on hydrogen batteries, powered by photovoltaic energy. For the analysis of the water recovery capacity of the electrochemical process, the prototype was placed in the water vapour outlet in the fuel cell experimenter of the Laboratory of Intelligent Networks and Renewable Energies of the Faculty of Sciences, the vehicle experiments were run at the same location. For the statistical analysis, a 2e2 factorial design was used in both cases, for the tank, the effect of the current through the load (1 A - 1.5 A) was factor A, and the purge time (every 10 min - every 25 min) was factor B, the variable studied was the amount of water recovered (ml - prototype). For the vehicle the variable was the operating time, factor A was the charging time of the solar panel and factor B was the radiation. Three replicates were made in each experiment, the average maximum value for the tank was 3.67 drops at the point (1.5 A, 10 min), in the case of the vehicle, the average maximum operating time is 162.37 s at the point (high radiation, 15 min). It is concluded that both the purge time and the current significantly affect the water recovery experiment, a total of 1.5ml of water was collected in two hours with an efficiency of 70%. In the case of the vehicle, the combined use of renewable energies was demonstrated. It is recommended to use special solenoid valves for hydrogen and avoid leaks during the process.

Keywords: <ELECTROCHEMISTRY>, <PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL PILE (PEM)>, <LUCAS NÜLLE>, <FOG CATCHER>, <WATER RECOVERY TANK>, <RENEWABLE ENERGIES>.

INTRODUCCIÓN

El clima del planeta ha estado cambiando constantemente a lo largo del tiempo, de ahí la importancia de reconstruir la historia del clima de un país o región (Caicedo, 2006, pp.75-92.). Las Naciones Unidas con el afán de prever daños que pueden ocurrir en el futuro por el cambio climático creó el Panel Intergubernamental de cambio climático (IPCC), generó el Protocolo de Kioto y se han realizado casi una veintena de Conferencias de las Partes (COP) con el fin de reducir la emisión de gases de efecto invernadero que es la mayor amenaza para el mundo en décadas (Postigo *et al.*, 2013, p.3-10.). Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) los indicios del cambio climático se han intensificado, la temperatura media mundial ha aumentado en 1,1 °C desde la era preindustrial y en 0,2 °C con respecto al período 2011-2015 (The Global Climate, 2019, p.3.).

La quema de combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) es uno de los factores más determinantes en el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (CO₂) en la atmósfera; una alternativa para mitigar el cambio climático es la utilización de energía renovable (García Gómez, José Rincón Bernal and Darío Banguero Escobar, 2019, p.4-7.). El H₂ es una fuente de energía renovable y al ser el más abundante en la naturaleza su importancia es aún mayor ya que permite obtener energía, electricidad y es un combustible que puede ser usado en motores o en células (pilas) llamadas electroquímicas e impulsar directamente vehículos al combustionar o generar electricidad a partir de una reacción electroquímica sin ocasionar daños en el medio ambiente (BBC News Mundo, 2018, pp.5-8.).

La electrólisis del agua es el proceso de descomposición de la molécula de H₂O en gases de O₂ e H₂ separados, este proceso ayuda a la obtención de H₂ extra puro. Se produce a través de una corriente continua conectada a un electrolizador o cualquier equipo de hidrogenación que pasa la energía a un electrolito fundido o disolución acuosa y produce la descomposición (Net Interlab S.A, s.f., p.2.). La diferencia de potencial en los bornes de la celda, la corriente que circula por la celda y el volumen de hidrógeno y oxígeno producido son las variables que se deben tener en cuenta en una celda de obtención de H₂ (Ignacio *et al.*, 2018, p.5-9.).

Al hablar de los procesos electroquímicos para la obtención de energía a partir del H₂ se pueden hablar de algunas ventajas que son la versatilidad (oxidación directa o indirecta), eficiencia de energía, posibilidad de la automatización y rentabilidad que en conjunto pueden ayudar a evitar daños en el ambiente y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, pero de la misma manera estos procesos pueden ocasionar desventajas tales como las limitaciones de los procesos electroquímicos por el transporte de masa y el área específica de los electrodos que afectan el rendimiento de los procesos electroquímicos (Tapiero, 2011, p.7-11.).

Planteamiento del Problema

La Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, cuenta actualmente con el Laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables, donde existen sistemas de producción de energía solar fotovoltaica y pilas de combustible de hidrógeno con fines académicos. Al utilizar las pilas de combustible, se ha observado que el vapor de agua resultante del proceso electroquímico de producción de energía eléctrica es desechado al ambiente. Por consiguiente, existe la necesidad de crear un sistema que permita la recuperación del agua y buscar la integración de energías renovables (solar) para hacer funcionar el sistema.

¿Cómo se puede recuperar el agua del proceso electroquímico en pilas de combustible de hidrógeno alimentadas por energías renovables?

Justificación

La presente investigación tiene un enfoque a la economía y proceso circular; el sector energético, siempre será el centro de la economía global.

Actualmente; casi el 88% de la economía energética depende de los combustibles fósiles (Peng and Wei, 2020, p.1-9). La pandemia mundial que se está viviendo por la crisis del coronavirus (COVID-19), ha provocado varios bloqueos en la producción dando como resultado el quebranto de varios recursos como por ejemplo el decaimiento del precio del petróleo. La idea de frenar la recesión económica ha llevado a muchos países a enfocarse en sistemas eléctricos basados en energías renovables como son la instalación de paneles solares, turbinas eólicas, pilas de combustibles de H₂ entre otras opciones; las pilas de combustible muestran un funcionamiento impecable y con alta eficiencia (IRENA, 2020; Wright, 2020, p.1-12).

La Agencia Internacional de Energía (AIE) exige implementar políticas energéticas para poder reducir las emisiones globales en los próximos tres años, la (AIE) realizó una convocatoria para reunir a 40 ministros de países que representan más del 80% de la economía mundial en la Cumbre de Transiciones de Energía Limpia de la IEA el 9 de julio de 2020, donde se trató la importancia de una recuperación limpia y sostenible (Wright, 2020, p.1-5.). Basándonos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se puede afirmar que la presente investigación se rige a tres objetivos muy importantes. Objetivo siete (energía asequible y no contaminante), once (ciudades y comunidades sostenibles), y trece (acción por el clima).

El objetivo siete, cada día se ve más alcanzable y posible, la falta de energía en varias zonas con excesiva pobreza en el mundo ha llevado a la necesidad de crear ideas innovadoras, hoy en día la eficiencia de energía renovable ha logrado excelentes resultados y satisfacer de electricidad a varias personas. El objetivo once se centra en la ciudades y comunidades sostenibles, se estima que en 2050 más de 6 500 millones de personas vivirán en zonas urbanas, dos tercios de la

humanidad. Para alcanzar un desarrollo sostenible se debe modificar radicalmente la forma en cómo se distribuye los espacios urbanos; buscar una disposición adecuada en la cual cada hogar tenga acceso a energía eléctrica. El objetivo trece fomenta la acción por el clima, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se buscan nuevas alternativas más sostenibles con el medio ambiente, como es el caso de automóviles a base de pilas de combustible de H₂, una alternativa muy rentable (Naciones Unidas, 2015, p. 2-4.).

El Objetivo tres del Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida; se enfoca en garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones, el respecto integro, la restauración en casos de degradación o contaminación. Para garantizar un manejo sustentable del patrimonio natural, se busca alternativas de procesos circulares que reduzcan la contaminación ambiental, de esta forma se garantiza un ambiente sano y ecológicamente equilibrado como derecho y obligación para las generaciones actuales y futuras (REPÚBLICA DEL ECUADOR, 2017, p.1-3.).

Este trabajo se desarrolla en el laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias cuyo responsable es el Ing. Rafael Cordova U., y con el auspicio del Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC), dentro del proyecto de investigación “Medios de vida como estrategia para la planificación y gestión en la adaptación basada en ecosistemas: PACHA”.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Desarrollar un sistema de recuperación de agua del proceso electroquímico en la producción de hidrógeno verde.

Objetivos Específicos:

- Construir el estado del arte de pilas combustible de hidrógeno.
- Diseñar un prototipo de un sistema de recuperación de agua para pilas de combustible.
- Demostrar un proyecto piloto que incluya pilas de combustible que funcionan en base a energía solar.

Hipótesis

Hipótesis nula

Ho: No se obtiene agua destilada mediante un prototipo colocado en la salida de vapor de agua en el sistema de pilas de combustible del laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias.

Hipótesis alternativa

Ha: Se obtiene agua destilada mediante un prototipo colocado en la salida de vapor de agua en el sistema de pilas de combustible del laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

En la década de los 60 se utilizaron por primera vez las pilas de combustible en aplicaciones de la astronáutica, mientras que en la crisis energética de los 70 y 80 se construyeron las primeras centrales eléctricas piloto, pero en la actualidad existen aplicaciones fijas, móviles y portátiles, la diferencia entre estas tres es que en las fijas el almacenamiento del H_2 es menos costoso debido a que no es necesario transportar el H_2 (se lleva a cabo mediante un sistema de tuberías cuando se encuentran activas), en el caso de las aplicaciones móviles se necesita de contenedores adecuados y por su tamaño implica un esfuerzo adicional (estas aplicaciones pueden estar en camiones, autobuses, submarinos y trenes), finalmente en el caso de las aplicaciones portátiles son pequeñas y ligeras razón por la cual se los puede utilizar como depósitos de alimentación de emergencia para las pilas de combustible de H_2 en viviendas transportables, contenedores habitables o caravanas. En ordenadores portátiles y teléfonos móviles se pueden utilizar las pilas de combustible ultra compactas.

Robert Boyle, en 1671, fue el primero en considerar al aire como una mezcla de gases de H_2 y O_2 (Orera, 2007, p.1-3.). Henry Cavendish, en 1766, demostró que el aire es inflamable, ya que tenía la propiedad de arder en la atmósfera produciendo agua (Orera, 2007, p.2-6.). Antoine Laurent de Lavoisier desarrolló un método para producir hidrógeno en grandes cantidades, mediante la disociación del agua con un hierro calentado al rojo, además de afirmar que el agua no es una sustancia simple, sino que está formada por dos compuestos: el aire vital, oxígeno, y este aire inflamable al que llamó hidrógeno “que produce agua”. A comienzos del siglo XIX, el hidrógeno fue utilizado como fuente de energía para la iluminación (Orera, 2007, p.4-6.).

En 1800 un científico inglés llamado William Nicholson desarrolló por primera vez el proceso de intercambio energético el cual consistía en hacer pasar una corriente eléctrica desde una pila de volta a través de unas gotas de agua, como resultado de este experimento, se observó que el agua desaparecía y se formaba burbujas de hidrógeno y oxígeno, pero once años antes ya se había realizado la primera electrólisis del agua mediante una máquina electrostática y una botella de Leyden (Net Interlab S.A, s.f.).

William Robert Grove en 1839, descubrió la pila de combustible, este descubrimiento definió el uso final para el H_2 . La primera pila constaba de electrodos de platino, como electrolito se utilizaba ácido sulfúrico, como combustibles hidrógeno y oxígeno; se producía electricidad y como subproducto agua. Con el desarrollo e innovación de maquinarias térmicas ese

descubrimiento quedó obsoleto (Orera, 2007, p.2-7.). Francis Thomas Bacon, en 1953, tomando como base el aporte de Grove, plasmó sus conocimientos acerca de las pilas de combustible de H₂ y construyó un prototipo, utilizando hidrógeno y oxígeno.

La pila elaborada por Francis Thomas Bacon poseía un electrolito alcalino, en lugar de electrolitos ácidos; debido a su bajo costo en el mercado reemplazó al platino por níquel como electrodo, este aporte fue la base para los diseños utilizados en los programas Geminis y Apolo por General Electric. Actualmente, la Estación Espacial de la NASA, utiliza pilas de combustible para producir agua potable y electricidad para la tripulación (Orera, 2007; Miranda, 2018, p.2-5.).

Desde 1970 la crisis económica ha llevado al consumo elevado de gas natural, el mismo que llegará a su punto máximo en 2050 (Orera, 2007, p.5-7.); la economía del hidrógeno y sus aplicaciones presentan una solución a este problema. Una pila de combustible genera energía electroquímica; transforma la energía química del combustible directamente en corriente continua (CC). Generar electricidad a partir de combustibles implica varios procesos de conversión de energía: la combustión convierte la energía química del combustible en calor, este calor se usa para ebullición de agua y generar vapor, el vapor se utiliza para hacer funcionar una turbina en un proceso que convierte energía térmica en energía mecánica, finalmente la energía mecánica se utiliza para hacer funcionar un generador y producir electricidad (Barbir, 2013, pp.23-45.).

Los vehículos eléctricos que funcionan en base a pilas de combustible de hidrógeno han recibido una gran atención en todos los sectores del transporte (Li *et al.*, 2020, pp. 10-87.). En 2010, un primer prototipo de bus con 29 asientos que funciona en base a la energía del hidrógeno fue presentado en Brasil; la potencia de la pila de combustible utilizada fue 77,2 kWe (Miranda, P.E.V.; Carreira, 2010; Miranda, 2018). Grandes empresas tales como Hyundai han iniciado la producción en masa de vehículos tales como el Tucson ix35 y Nexo (2018) con eficiencias que alcanzan hasta el 60%, un rango de conducción de 415 km a 609 km y una durabilidad de hasta 10 años (Li *et al.*, 2020, pp.27-79.).

En octubre de 2020, la empresa ZeroAvia completó el primer vuelo en un avión de pasajeros utilizando pilas de combustible; el vuelo duró ocho minutos, y se alcanzó una altitud de 300 metros con una velocidad de 185 km/h (Fuel Cells Bulletin, 2020). Aplicaciones adicionales que incluyen la fabricación de pilas de combustible portátiles y trenes han sido desarrollados por Toyota y la Universidad de Birmingham (Fuel Cells Bulletin, 2020). Existen también submarinos que funcionan con pilas de combustible con una potencia eléctrica total de 300kW. El H₂ se almacena como sólido en un compuesto de hidruro metálico; el agua que se produce a partir del combustible se puede utilizar como agua cruda a bordo del submarino (Pichonat, 2009, pp.79-167).

Los scooters y las bicicletas pueden ser un mercado importante para las tecnologías de pilas de combustible, particularmente en los países en desarrollo. A pesar de los estrictos requisitos en relación con el peso, el tamaño y el bajo costo, las celdas de combustible se han empleado en varios scooters y bicicletas. El requisito de potencia es considerablemente menor que el de los

automóviles: hasta 3 kW para los scooters y unos cuantos vatios para bicicletas (Apostolou, 2020, pp.542-986). En todas las aplicaciones citadas, existe el potencial de recuperación o reutilización del agua que se obtiene como subproducto en las pilas de combustible de hidrógeno.

Para una pila de combustión de H₂ con alta eficiencia, la idea de recuperar vapor de agua y emplearla nuevamente en el proceso presenta varias ventajas; el uso de un intercambiador de calor y de unidades condensadoras, a menudo tienen que ser desarrolladas exclusivamente para esta aplicación (Roychoudhury and Mastanduno, 2011, p.1-12). Las pilas de combustible tienen adaptado tramas de vapor, tanques y un conjunto de enfriamiento que permiten recibir el escape y recuperar porciones de agua, el agua recuperada debe estar libre de contaminaciones para evitar contaminar el reformador o pila. Al hablar de contaminantes que pueden alterar el funcionamiento de la pila se debe tener más cuidado con los inorgánicos de otra forma sería necesario la implementación de un sistema de purificación en la pila de combustible (Roychoudhury y Mastanduno, 2011; Jahnke y Daly, 2014).

En 2014 se presentó un prototipo para recuperar agua de una pila de combustible, el cual consistía en adaptar un sistema de enfriamiento en el escape del cátodo: en primera instancia se inyecta agua de pulverización, la cual condensa el vapor de agua, con la ayuda de un elemento de separación, se separa una primera porción de agua y gracias a una purga se elimina los contaminantes no volátiles de dicho escape de cátodo, esta primera porción de agua es reciclada y es utilizada como agua de pulverización. En un segundo sistema de enfriamiento que recibe el escape del cátodo limpio, se condensa la segunda porción de agua. Debido a que el agua recuperada posee una alta pureza es utilizada en el proceso electroquímico (Jahnke and Daly, 2014, pp.2-34.).

En 2018 se elaboró un prototipo para la obtención de H₂ mediante la electrólisis del agua utilizando energía renovable como alternativa energética, la construcción del prototipo constaba de cuatro componentes: un generador eléctrico alimentado por una fuente renovable en este caso energía eólica y energía solar fotovoltaica, un electrolizador, un panel de control y un medidor de producción de H₂ (Carlos and Contreras, 2019, p.2-4.). En el mismo año por motivos económicos se desarrolló un prototipo que reemplazó el agua desmineralizada por agua potable a temperatura y presión ambiente; este prototipo a diferencia del anterior constaba de un desagüe que era un cilindro de acrílico que se encargaba de condensar el vapor de agua (Asensio, Rodriguez and Sánchez, 2011; Ignacio *et al.*, 2018, pp.122-134.).

El reciclaje de agua en una pila de combustible nos presenta una alternativa muy importante, ya que se puede reutilizar el agua recuperada en el mismo proceso y crear una economía circular; si se habla a nivel industrial, la energía obtenida a partir del H₂ no solo puede abastecer a una localidad, sino que también puede generar agua potable, de esta forma se satisface las dos necesidades más importantes del ser humano. La energía del H₂ en combinación con energías renovables se utiliza en varios países del mundo como fuentes de energía eléctrica y calefacción

en los hogares con el fin de contribuir a la sostenibilidad ambiental del planeta.

1.2. Bases teóricas




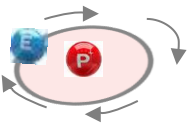

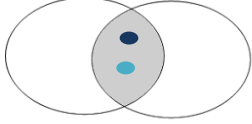
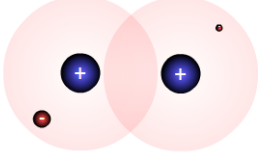
1.2.1. Elemento químico hidrógeno (H₂)

El químico francés Lavoisier le dio el nombre de Hidrógeno (del griego *hydro*, agua, y *gennao*, producir), al elemento capaz de producir agua al combinarse con el aire, también es conocido como “Productor de agua”; el hidrógeno es el único elemento que no pertenece a ninguna familia en la tabla periódica, gracias a su configuración electrónica $1s^1$ (Brown *et al.*, 2009).

El hidrógeno (H₂) es el primer elemento en la tabla periódica con número atómico igual a uno y un peso atómico igual a 1,0079 (g/mol); es inodoro, incoloro, no tóxico, por lo que se lo considera como inofensivo, en condiciones normales se presenta en forma de gas. El átomo de H₂ está constituido por un protón y un electrón, al no poseer neutrones en su núcleo, se lo considera como el elemento más ligero y sencillo (Moratilla y Linares, s.f.).

Al H₂ se lo considera como el elemento más abundante del universo; la materia cósmica está constituida de tres cuartas parte de H₂, el mismo que podría ser utilizado como una forma de combustible si fuera accesible (Asensio *et al.*, 2011). El H₂ en estado puro no se encuentra en la naturaleza, por lo cual no puede ser explotado como otros recursos naturales como es el caso del petróleo y el carbón, por esta razón para su producción se utiliza otros compuestos químicos abundantes como el agua y el metano, y el H₂ pasa a ser un portador secundario de energía, pues se lo utiliza como puente en la transformación de unos tipos de energías en otros, una aplicación muy importante son las pilas de combustible de H₂ (Moratilla y Linares, s.f.).

Tabla 1-1: Formación de la molécula de H₂

Formación de la molécula de H ₂				
<p>El átomo tiene la misma forma que una esfera. En el centro se encuentra su núcleo</p>	<p>En el núcleo se encuentra los protones que contiene un átomo ninguno se encuentra fuera de él.</p>	<p>Los electrones conforman el último componente del átomo de H₂</p>	<p>El protón se encuentra en el núcleo, mientras que el electrón se encuentra girando al redor de él a altas velocidades.</p>	<p>La unión de dos átomos de H₂ forman la molécula diatómica de H₂</p>
				
<p>La corteza del átomo de H₂ solo tiene un electrón, pero para que esta se llene necesita 2 electrones. Cuando 2 átomos de H₂ se encuentran comparten sus electrones y se unen mediante un enlace covalente. Se forma la molécula diatómica de H₂</p>		<p>Cada átomo tiene a su disposición dos electrones en su corteza exterior (la única). Dos átomos unidos siempre forman una molécula y en este caso es la molécula de H₂</p>		
				

Fuente: (LUCAS-NÜLLE GmbH, 2010).

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2020.

1.2.2. Métodos de obtención de H₂

El H₂ se puede obtener mediante procesos industriales y por fuentes renovables entre los métodos de obtención esta: mediante el reformado del gas natural, nafta, fuel pesado o carbón, la relación atómica H/C (hidrógeno/carbono) más elevada de la molécula CH₄ con respecto a otros combustibles indica que el gas natural, cuyo componente mayoritario es el CH₄, sea el precursor más idóneo para producir hidrógeno, el reformado de metano (CH₄) con vapor es un proceso utilizado a lo largo de varias décadas para producir H₂. Por tratarse de la tecnología más económica, este proceso es el que se utiliza en la actualidad en la producción industrial del hidrógeno (Fierro, s.f., pp.24-78.).

1.2.2.1. Electrólisis del agua

La electrólisis es el proceso que permite romper las moléculas ya sean orgánicas e inorgánicas mediante electricidad, las moléculas se disocian en especies químicas cargadas positiva o negativamente y permiten conducir la corriente eléctrica. Al colocar un par de electrodos en una disolución de un electrolito (compuesto ionizable) conectado a una fuente de corriente continua entre ellos, los iones con carga positiva que se encuentran en la disolución se mueven hacia el electrodo negativo mientras que los iones con carga negativa hacia el electrodo positivo. Cuando los iones llegan a los electrodos estos pueden ganar o perder electrones y transformarse en átomos neutros o moléculas, las reacciones que se produzcan en el electrodo dependen de la diferencia de potencial o voltaje que se aplica a la pila. Todos los cambios químicos que se producen en el proceso de electrólisis implican una reagrupación o reajuste de los electrones en las sustancias que reaccionan (Cesar, 2010, p.2-34.).

La electrólisis del agua se lleva a cabo mediante una fuente de energía eléctrica conectada a dos electrodos hechos con platino o acero inoxidable que representan el polo positivo y el polo negativo. Los electrodos se colocan en el agua, el lado positivo se encarga de extraer el oxígeno, mientras que el negativo extrae el hidrógeno (Net Interlab S.A, s.f., p.12-56.). Para que se produzca la oxidación en el ánodo y la reducción en el cátodo se requiere de cantidades considerables de electricidad y que el sistema permita el tránsito de iones entre ambos electrodos a través de un electrolito, este electrolito a su vez debe impedir el flujo de electrones en su interior porque se podría establecer un flujo de electrones externo y se obtendrían daños en el equipo (Santiago, 2016).

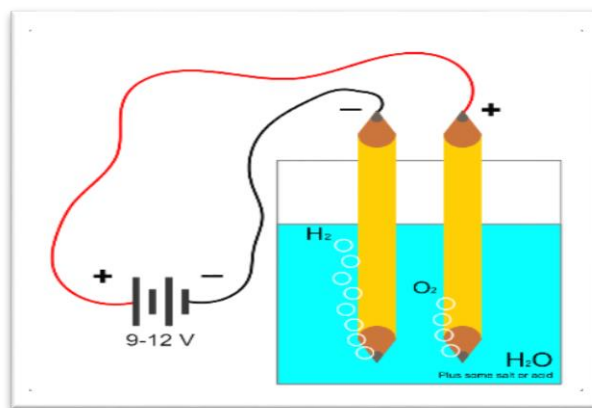
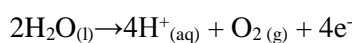


Figura 1-1: Esquemas de la electrólisis del agua

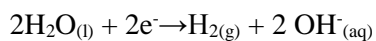
Fuente: (Electrolysis, 2015)

Reacciones que se producen en el proceso de la electrólisis:

Oxidación:



Reducción:



Reacción global de la celda:

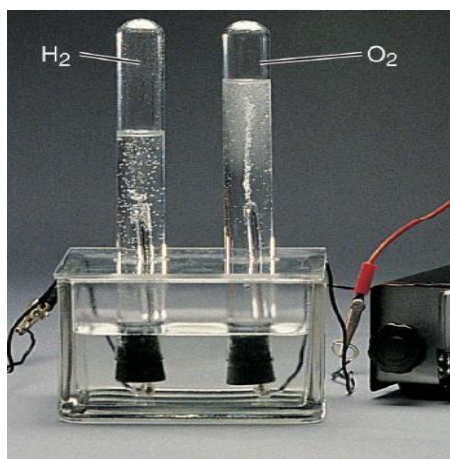
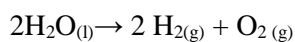


Figura 2-1: Electrólisis del agua

Fuente: (Sánchez, 2012)

1.2.3. Pilas de combustible de H_2

Las pilas de combustible son convertidores electroquímicos que permiten transformar directamente la energía química en energía eléctrica mediante una serie de reacciones químicas. La figura 3-1 muestra como las pilas de combustible tienen la capacidad de generar agua y calor a más de la electricidad mientras que exista el suministro de los combustibles, un elemento

oxidante (O₂) y un combustible (H₂) son los reactivos que utilizan las pilas de combustible para su funcionamiento y están almacenados fuera de la pila; el proceso se realiza en un solo paso sin involucrar partes móviles, evitando así las pérdidas asociadas con los procesos energéticos tradicionales (Asensio *et al.*, 2011, p.12-45.).

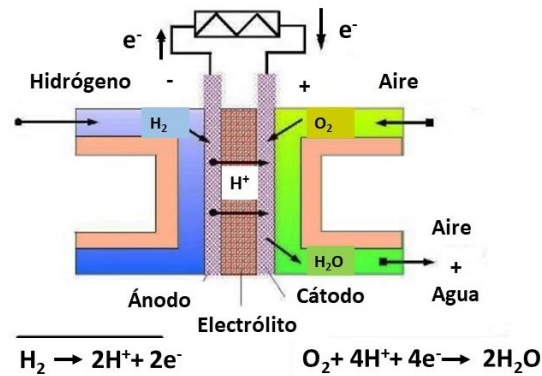


Figura 3-1: Pilas de combustible

Fuente:(Fuelcell, 2004)

Las pilas de combustible dependen de la electroquímica y no se consumen cuando produce electricidad aumentando de esta manera su eficiencia y reduciendo las emisiones de gases contaminantes que hoy en día presentan una de las mayores problemáticas ambientales (Barbir, 2013, pp.123-456). Las pilas de combustible constituyen una alternativa de obtención de energía a partir de fuentes renovables y disminución del consumo de combustibles fósiles (Corominas, 2001). A las pilas de combustible se las considera como una tecnología puente entre el sistema actual de hidrocarburos y el uso de energías renovables sin la emisión de gases de efecto invernadero (Corominas, 2001, pp.23-378).

Para que exista el paso de los iones (positivos o negativos) las pilas de combustible en su estructura están constituidas por: dos electrodos, ánodo (-), cátodo (+) y placas bipolares:

Electrodo (ánodo): en este electrodo se lleva a cabo la oxidación del combustible (H₂), generando una serie de electrones que circulan por un circuito externo

Electrodo (cátodo): depende del ánodo y se produce la reacción de reducción, de forma que el oxidante capta los electrones procedentes del circuito externo

Electrolito: está comprimido entre dos placas bipolares que separan las celdas y se encargan de conducir los gases en los electrodos, evacuar el H₂O y cumple la función de protección conduciendo los electrones y facilitando la interconexión en serie de las distintas células que conforman la pila, además permite el paso de los iones con carga (+ o -) (Santiago, 2016, pp.345-789.).

Las tres partes antes mencionadas son aquellas que principalmente mejoran la calidad y el funcionamiento de las pilas de combustible, las pilas de combustible producen una energía eléctrica alternativa porque ayuda a la reducción de gases de efecto invernadero ya que utilizan

como combustible el H_2 en estado gaseoso obteniendo calor y agua como producto secundario, en la actualidad existen una gran cantidad de instalaciones y equipos que emiten al ambiente grandes cantidades de CO_2 , un claro ejemplo de este tipo de instalaciones son los coches, calefacciones, centrales eléctricas y fábricas por esta razón se dice que las pilas de combustible son una alternativa amigable con el ambiente.

1.2.4. Funcionamiento de las pilas de H_2 a escala molecular

A escala molecular el funcionamiento de las pilas de hidrógeno guarda relación con las colisiones entre las moléculas de H_2 y las moléculas de O_2 dando como resultado una reacción química. Las moléculas de H_2 se oxidan produciendo agua y liberando calor, mientras que a escala atómica en cuestión de picosegundos los enlaces H-H y los enlaces de O-O se rompen, forman enlaces H-O, estos enlaces se rompen y se forman por la transferencia de electrones entre las moléculas (O' Hayre, Cha, & Colella, 2016, pp.234-300.).

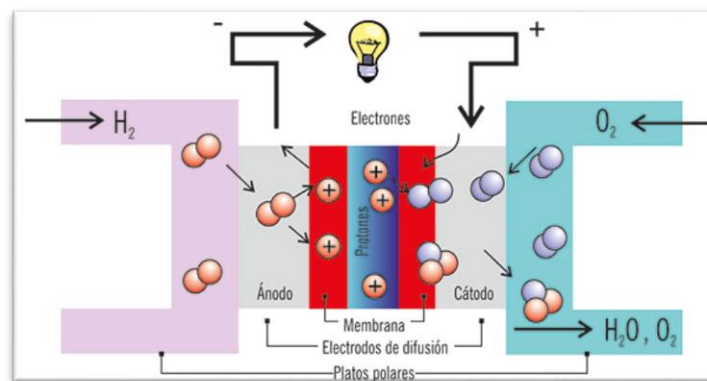


Figura 4-1: Funcionamiento de las pilas de combustible

Fuente: (Ente Provincial Regulador de la Energía, 2015).

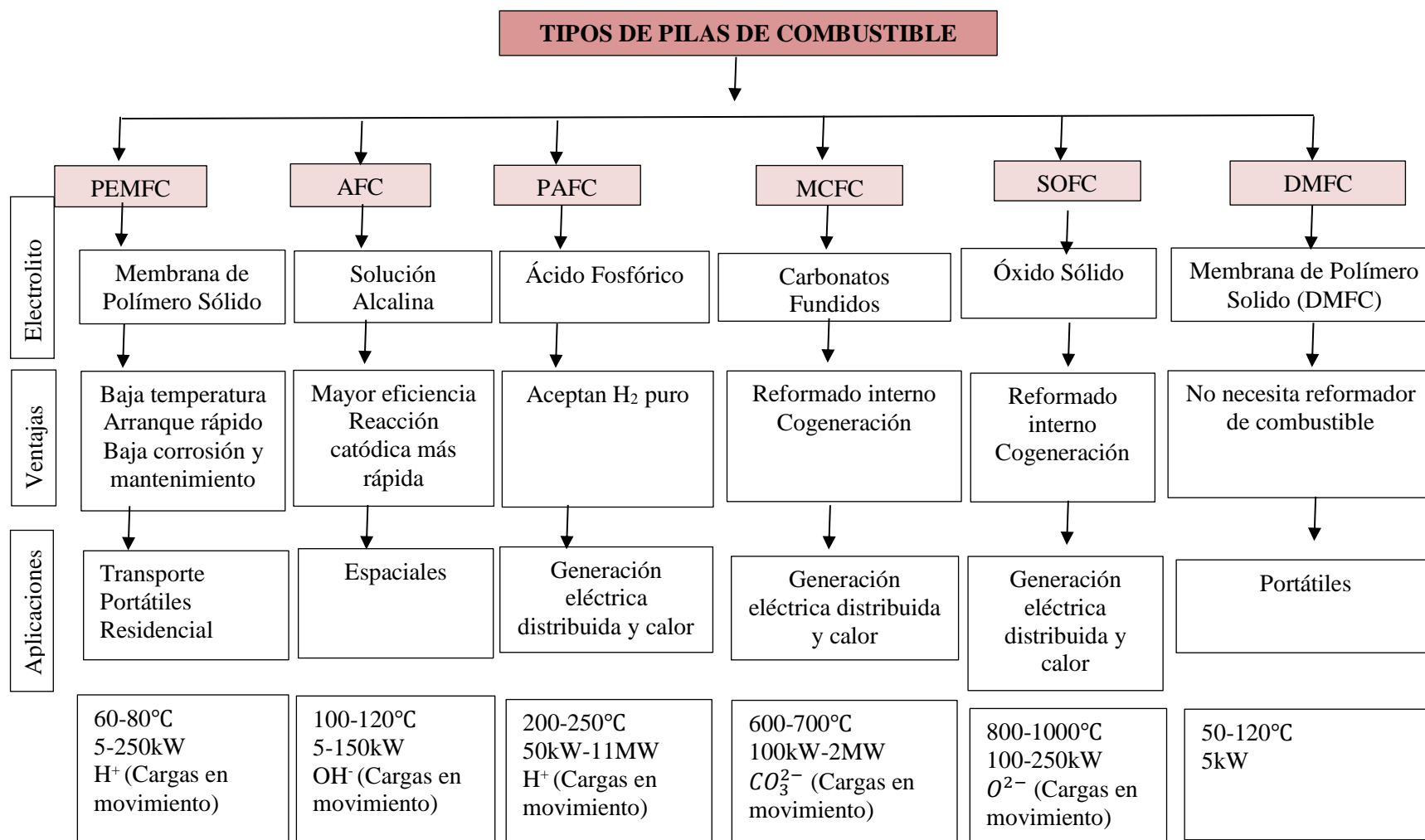
La energía de la configuración de enlace de agua del producto es menor que las configuraciones de enlace de los gases iniciales de hidrógeno y oxígeno. Esta diferencia de energía se libera en forma de calor. Aunque la diferencia de energía entre los estados inicial y final ocurre por una reconfiguración de los electrones a medida que se mueven de un estado de enlace a otro, esta energía es recuperable sólo como calor porque la reconfiguración de la unión ocurre en picosegundos a una escala subatómica. Para producir electricidad, esta energía térmica debe convertirse en energía mecánica y luego la energía mecánica debe convertirse en energía eléctrica (O' Hayre, Cha, & Colella, 2016, pp.123-456.).

En una pila de combustible, el combustible oxida independientemente en el ánodo de la celda y el oxígeno se reduce independientemente en el cátodo de la celda (Haas y Cairns, 1999, pp.56-89.).

1.2.5. Tipos de pilas de combustible

La siguiente tabla 3-1 muestra la clasificación de las pilas de combustible según el tipo de electrolito que utiliza:

Tabla 2-1: Tipos de pilas de combustible

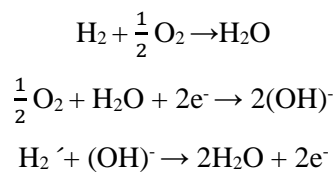


Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

1.2.5.1. Pilas de combustible alcalinas (Alcaline Fuel Cell o AFC)

El electrolito que utilizan este tipo de pilas es el KOH concentrado (85% en peso) para operaciones a alta temperatura (250 °C) y menos concentrado (35 - 50% en peso) para funcionamiento a temperaturas más bajas (< 120 °C). En la figura 5-1 se observa que el electrolito de KOH se retiene en un matriz (generalmente obsoleta) y el Ni, Ag óxidos metálicos y metales nobles pueden ser utilizados como electrolizadores (Barbir, 2013, pp.97-89.). Una de las ventajas de las pilas AFC es su temperatura de funcionamiento generalmente entre 23 y 70 °C mientras que la desventaja que presenta es su líquido electrolito que reacciona con los bicarbonatos formados de dióxido de carbono y sales de carbonato (Ruiz, 2020, pp.78-90).

Las pilas AFC presentan las siguientes ecuaciones:



Las pilas AFC operan con una solución electrolítica líquida de hidróxido de potasio o hidróxido de sodio que es retenida en una matriz de asbesto que es conductora de todos los hidróxidos alcalinos. Poseen catalizadores como oro, plata, platino, níquel y óxidos metálicos, finalmente sus aplicaciones se encuentran en las misiones espaciales y/o militares y transporte. Las pilas AFC y PEM son estructuralmente similares, pero con la diferencia de que las primeras presentan una membrana de intercambio de aniones en el AEMFC en lugar de una membrana de intercambio de protones (Ruiz, 2020, pp.456-700.).

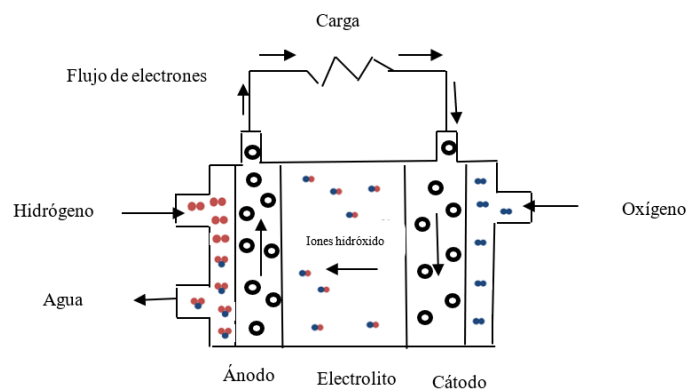


Figura 5-1: Pilas de combustible alcalinas (AFC)

Fuente: (Ring, 2007)

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

1.2.5.2. Membrana de electrolito de polímero o celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (Proton Exchange Membrane o PEM)

Las celdas de combustible de intercambio protónico ("Proton Exchange Membrane" PEM) permiten la obtención directa de electricidad en donde el combustible es el H₂ o una mezcla rica en gases en H₂ obteniendo como subproducto agua 100% pura. La figura 5-1 muestra la estructura las partes de las PEM que están compuestas por dos electrodos, un ánodo y un cátodo separados por un electrólito que facilita la transferencia iónica y funcionan a bajas temperaturas, debido a esto se utilizan en vehículos y generadores de energía en pequeña escala para casas. En el ánodo las moléculas de H₂ pierden sus electrones y forman iones, los electrones pasan al cátodo por un circuito externo que produce electricidad al pasar por un motor, los iones del H₂ pasan por la membrana de intercambio protónico para unirse con las moléculas de O₂ y electrones para producir agua y calor como subproductos (Pennacchiotti Monti, 2010, pp.789-900.).

Las ventajas de utilizar celdas de combustible de intercambio protónico (PEM) para obtener H₂, es que no producen contaminación ni consumen recursos naturales; además, el agua producida tiene suficiente pureza para ser utilizada como agua potable. Una de las desventajas que presenta las PEM es que están económicamente fuera del alcance de los consumidores y la velocidad de reacción es lenta lo que conlleva a tener corrientes y potencias pequeñas (Pennacchiotti Monti, 2010, pp.23-67.).

Este tipo de pilas utiliza una fina membrana de polímero conductor de protones (< 50 m) y un electrolito (polímero de ácido perfluorosulfonado). Las pilas de combustible PEM tiene aplicaciones de automoción, generación de energía estacionaria distribuida en pequeña escala y para aplicaciones de energía portátiles (Barbir, 2013, p.6-7.).

El electrolito de las PEM está constituido por una membrana de un polímero generalmente el Nafion, el Nafion es un polímero perfluorado (con átomos de flúor) en lugar de hidrogeno con grupos sulfonatos polares que en presencia de agua se convierte en un excelente conductor protónico, finalmente están compuestas por cadenas de tipo tflon de las cuales derivan cadenas laterales con grupos iónicos (Ruiz, 2020, pp.56-90). Las células de combustible PEM presentan varias ventajas que son: baja temperatura de funcionamiento, respuesta rápida, alta eficiencia, alta densidad de potencia, el diseño compacto, la alta presión de salida, capacidad de inicio rápido y bajo nivel de ruido mientras que la desventaja que presenta es el alto costo de los metales preciosos utilizados como electro catalizador para la electrolisis lo que la hace más costosa que la electrolisis alcalina (Ruiz, 2020, p.5-7.).

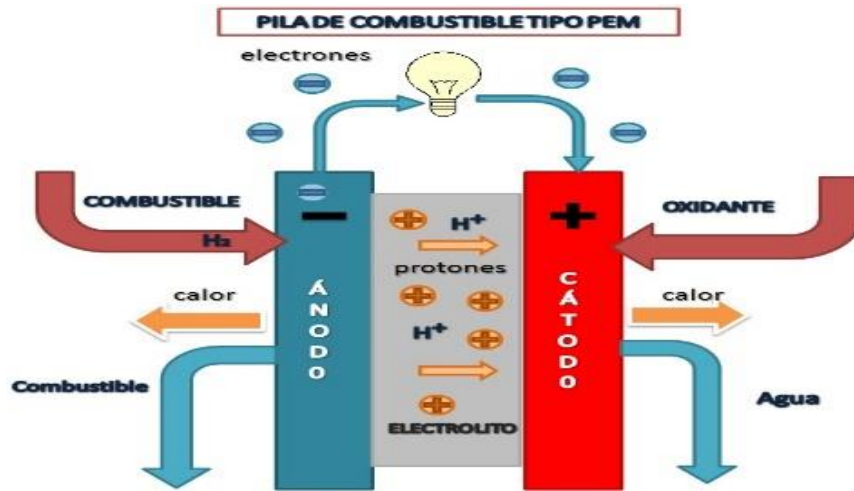


Figura 6-1: Membrana de electrolito de polímero o celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM)

Fuente: (Amalia, 2014).

1.2.5.3. Pilas de combustible de ácido fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell o PAFC)

El electrolito que utilizan este tipo de pilas es de ácido fosfórico concentrado (~ 100%). El SiC se utiliza como matriz para retener el ácido es y el platino se utiliza como electrocatalizador tanto en el ánodo como en el cátodo (Barbir, 2013, pp.567-800.). Las pilas PAFC poseen aplicaciones estacionarias (Ruiz, 2020, pp.12-89.).

Las PAFC presentan las siguientes reacciones químicas, en donde el catalizador empleado es el platino debido a que son tolerantes al CO₂.

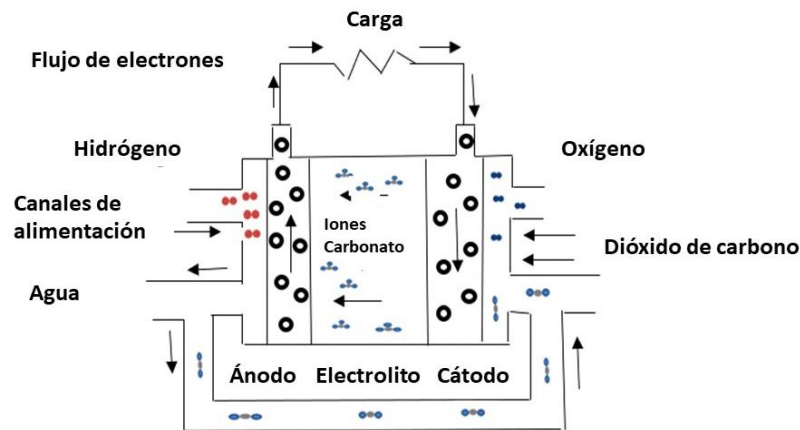
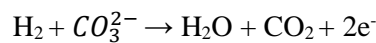
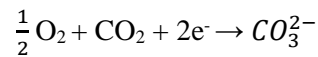
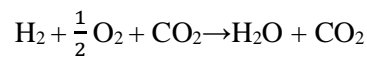


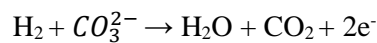
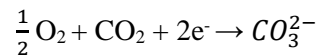
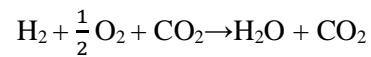
Figura 7-1: Pilas de combustible de carbonato fundido MCFC)

Fuente:(Hidalgo, 2013)

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

1.2.5.4. Pilas de combustible de carbonato fundido (Molten Carbonate Fuel Cell o MCFC)

El electrolito está compuesto por una combinación de carbonatos alcalinos (Li, Na, K), que se retiene en una matriz cerámica de LiAlO_2 , donde los carbonatos forman una sal fundida altamente conductora, con iones carbonato que proporcionan conducción iónica. A temperaturas de funcionamiento tan elevadas, normalmente no se requieren catalizadores de metales nobles. Estas celdas de combustible se encuentran en la etapa pre comercial / de demostración para la generación de energía estacionaria (Barbir, 2013, pp.67-89.).



Generalmente las pilas MCFC son utilizadas en la generación centralizada de energía eléctrica para aplicaciones industriales (Ruiz, 2020, p.3-5.).

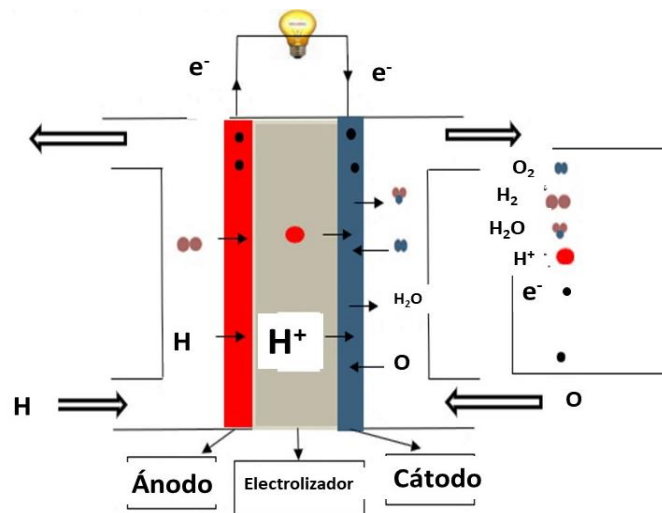


Figura 8-1: Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

Fuente: (Hidalgo, 2013)

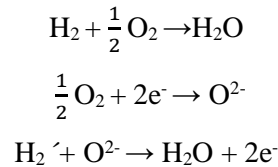
Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

1.2.5.5. Pilas de combustible de Óxidos Sólidos (Solid oxide fuel cell o SOFC)

El electrolito que usan estas celdas es un óxido metálico no poroso buen conductor iónico, el óxido de zirconio estabilizado con óxido de ytrio. Las celdas SOFC operan entre 900- 1000°C, temperatura a la que tiene lugar la conducción iónica de iones oxígeno. El ánodo es una mezcla de cerámico y metal, Ni-ZrO_2 , el cátodo es una manganita de lantano dopada con estroncio o selenio. La semejanza entre las pilas SOFC y MCFC es su alta temperatura de trabajo y pueden

utilizar el calor residual que generan en el proceso de reformado del combustible. La diferencia entre las dos clases de pilas es que las SOFC existe la posibilidad de trabajar a mayor densidad de corriente y sin problemas de corrosión, mientras que las MCFC, las convierten en una alternativa interesante y como la más prometedora en pilas de combustible de alta temperatura (Asociación Española de Pilas de Combustible, s.f.).

Reacciones de las reacciones SOFC:



Las pilas SOFC son utilizadas generalmente para la obtención de calor electricidad debido a que obtiene electricidad directamente de un combustible, las pilas SOFC tiene la ventaja de pertenecer a los combustibles flexibles adecuados para cualquier sistema combinado para la generación de hidrogeno, energía y refrigeración o calefacción mientras que la desventaja es la degradación de los componentes por corrosión debido a la alta temperatura de funcionamiento y mayor tiempo de arranque (Ruiz, 2020, p.4-6.).

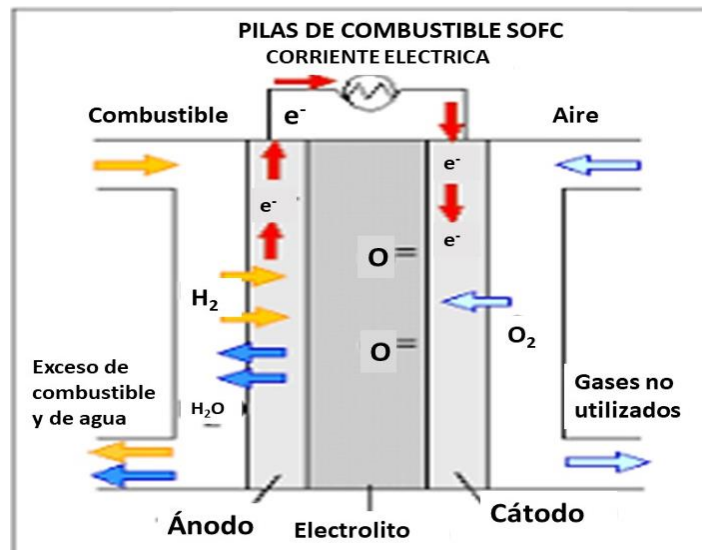


Figura 9-1: Pilas de combustible de Óxidos Sólidos (SOFC):

Fuente: (Ingenieros, 2014).

1.2.5.6. Pilas de combustible de Metanol Directo (Direct Methanol Fuel Cell o DMFC)

Las pilas DMFC son una unión o un híbrido de las PEMFC. Las DMFC usan la misma membrana del polímero que son usadas en las PEMFC, el combustible que utilizan las pilas DMFC en lugar del hidrogeno reformado como en el caso de los otros tipos de pilas es el metanol líquido, el

catalizador del ánodo obtiene el hidrógeno directamente del metanol líquido. Las pilas DMFC son un tipo de celdas relativamente nuevas con los otros tipos de celdas de combustible por lo cual se dice que poseen una eficiencia del 40% y su temperatura de operación es de 60 – 100 °C (Gonzales-Longatt, 2016, p.23-67.).

Las aplicaciones de las DMFC se encuentran en la industria y transporte y las finalmente las celdas de combustible de metanol directo (DMFC) son una tecnología que ofrece una menor densidad de potencia y eficiencia respecto a una PEMFC / H₂, pero tienen una mayor simplicidad adicional a una mayor densidad de energía (Ruiz, 2020, pp.567-600.).

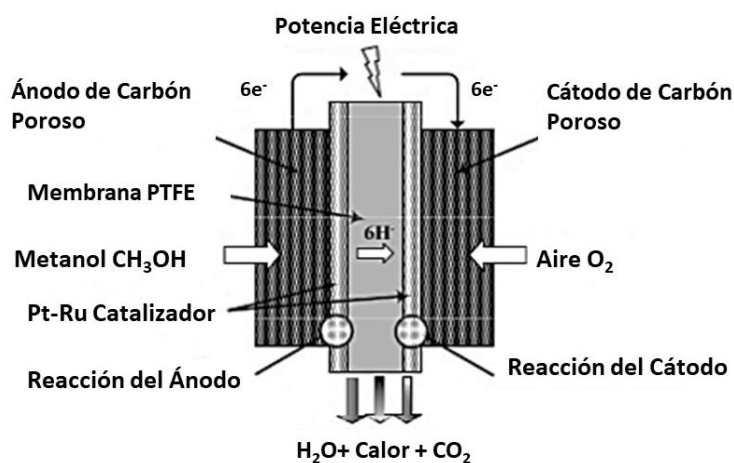


Figura 10-1: Pilas de combustible de Metanol Directo (DMFC)

Fuente: (Gonzales-Longatt, 2016).

Tabla 3-1: Reacciones químicas según el tipo de pila

Reacciones químicas según el tipo de pila		
Tipo	Reacción del Ánodo	Reaccione del cátodo
PEM Y PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow +2(OH)^-$
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
MDFC	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
CO: monóxido de carbono CO ₂ : dióxido de carbono e ⁻ : electrón H ⁺ : ion hidrógeno		H ₂ : hidrógeno H ₂ O: agua O ₂ : oxígeno OH ⁻ : ion hidroxilo

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

1.2.6. Conclusiones sobre el estado del arte

Las pilas de combustible de electrolito de polímero o membrana de intercambio de protones (PEM) son una alternativa más eficiente para la obtención de H₂ con relación a las otras pilas de combustible debido a su simplicidad, viabilidad, rápida puesta en marcha y sobre todo por que poseen una membrana de polímero con características importantes: como su impermeabilidad a los gases, pero conducen protones. En las PEM la membrana actúa como electrolito que se aprieta entre los dos electrodos (de carbono o tela de carbono) porosos que conducen la electricidad (Barbir, 2013, p.1-5.).

Sin lugar a duda las pilas de combustible poseen una alta eficiencia, generando energía limpia y sin emisiones toxicas. El hidrógeno es un excelente portador de energía, al no ser un elemento tóxico se puede renovar con gran facilidad, por estas propiedades el hidrógeno se puede convertir en electricidad sin combustión alguna.

La energía que nos brindan los combustibles fósiles es muy fugaz, difícil de contener e ineficaz, por otro lado, los combustibles fósiles producen CO₂ que al ser un compuesto contaminante no se puede aprovechar en el proceso y es emitido al medio ambiente. Un motor de combustión tan solo puede aprovechar entre el 30 al 40% de la energía de los combustibles fósiles y transformarla en electricidad. Los motores de un automóvil poseen una eficiencia entre el 15 al 20%, todo lo restante se disipa en calor y en ruido que produce un automóvil. Una alternativa muy eficiente que resuelva todos estos problemas son las pilas de combustible de hidrógeno debido a que poseen una eficiencia entre el 40 al 65% y al tratarse de un proceso circular, es la mejor propuesta para generar energía limpia (Thames & Kosmos, 2007, p.3-7.).

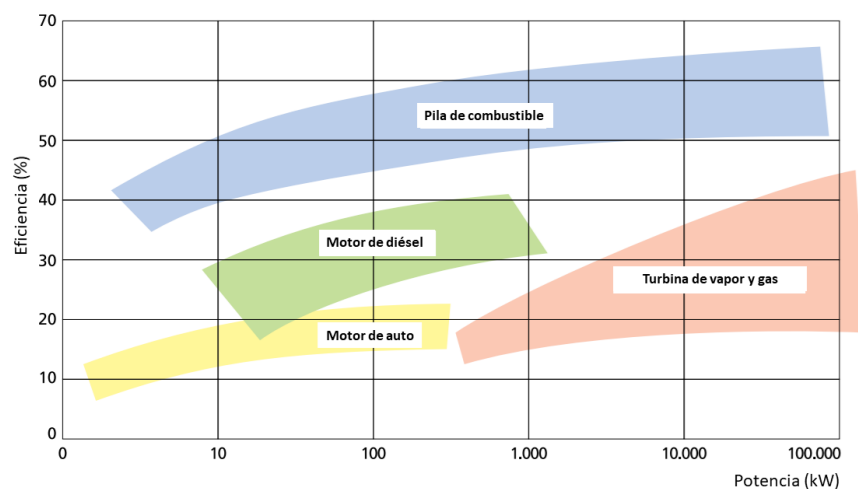


Gráfico 1-1: Eficiencia de las pilas de combustible

Fuente: (Thames & Kosmos, 2007).

1.2.7. Equipo de laboratorio: tecnología de pilas de combustible

El equipo de laboratorio; tecnología de pilas de combustible, se encuentra en el laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias; este equipo permite realizar varios experimentos en una pila de combustible, consta de algunas partes: electrolizador, conjunto de pilas de combustible, contenedor H₂, contenedor de O₂, panel de conexión para el electrolizador, panel de conexión para el conjunto de pilas, panel de conexión para el resistor eléctrico (resistencia de carga variable, bombilla, electromotor).

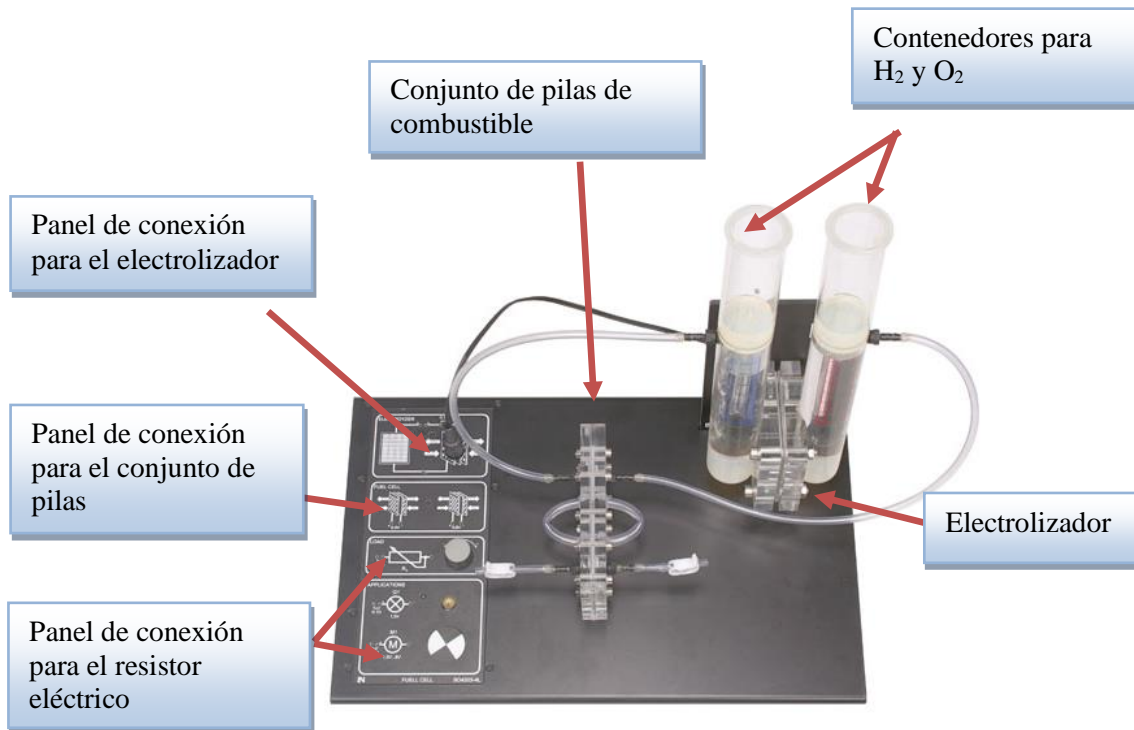


Figura 11-1: UniTrain-I SO4204-4L "Fuel Cell"

Fuente: (LUCAS-NÜLLE GmbH, 2010).

1.2.7.1. Electrolizador (corriente continua de 24 VDC)

El electrolizador funciona con 24 voltios de corriente continua (VDC), a él se encuentra adheridos los depósitos de H₂ y O₂ que se encuentran llenos de agua, cuando se produce H₂ y O₂ gaseosos, los gases pasan a los depósitos y deslizan el agua hacia arriba. El electrolizador consta de un cátodo y de un ánodo, y una cámara de reacción. En este caso en particular, el electrolizador al consumir energía suficiente para separar a los iones de la molécula del agua; la corriente ingresa por el lado positivo y sale por el negativo, por lo que, el ánodo es el electrodo positivamente cargado y el cátodo es el electrodo negativamente cargado. Al aplicar una tensión continua, desde el polo negativo de la fuente de corriente continua, fluye un flujo de electrones que son atraídos por el cátodo, el cátodo es el encargado de bombardear electrones al agua, en ese instante

reaccionan con el agua; se rompe el enlace y se obtiene H_2 y dos iones OH^- . Según la siguiente reacción $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2 OH^-$. El Hidrógeno en estado gaseoso es dirigido a la parte superior del depósito de H_2 , este proceso ocurre simultáneamente, los cuatro iones OH^- al ganar un electrón poseen carga negativa y se ven atraídos por el ánodo, en el ánodo cargado positivamente, los iones OH^- pierden el electrón absorbido y el electrón se dirige al polo positivo de la fuente de energía, los iones reaccionan a dos moléculas de H_2O , los dos átomos de oxígeno que sobran se combinan y forman O_2 , el mismo que ya en estado gaseoso se dirige al depósito de oxígeno, según la siguiente reacción



Se da una segunda reacción esta vez en el ánodo quien recibe los electrones del agua, inicia con seis las moléculas de agua del medio, estas moléculas pierden cuatro electrones, según la siguiente reacción 2.



El agua reacciona con cuatro iones hidronios (H_3O^+), los dos átomos de oxígeno sobrantes se unen y forman O_2 , el mismo que se dirige a su respectivo depósito. El hidronio positivamente ionizado extrae un electrón del cátodo, cada ion se desprende de un átomo de hidrógeno y se obtiene agua, los iones de hidrógeno sobrante se recombinan y forman H_2 gaseoso (LUCAS-NÜLLE GmbH, 2010), según la siguiente reacción

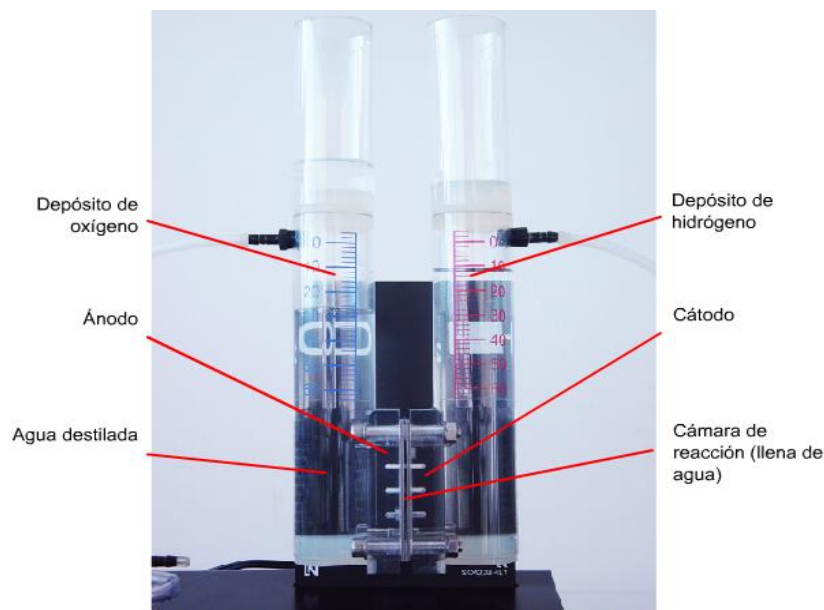


Figura 12-1: Electrolizador UniTrain-I SO4204-4L "Fuel Cell"

Fuente: LUCAS-NÜLLE GmbH, 2010.

1.2.7.2. Estructura y funcionamiento de una pila de combustible de H₂

La pila está constituida de: dos placas bipolares que tiene la capacidad de conducir el H₂ y el O₂ a través de la pila sin que estos lleguen a mezclarse, los electrodos son de carbono poroso, gracias a este material se puede pasar los gases, y la energía producida es dirigida hacia fuera, la membrana se compone de un polímero, dándole la capacidad de ser impermeable a los gases y tan solo deja pasar los iones de hidrógeno y un catalizador de platino (Pt) que ayuda a separar los gases formados.

El H₂ que llega al ánodo, se disocia en protones y electrones; los protones (H⁺) penetran la membrana y son conducidos al cátodo, debido a la existencia de un aislamiento térmico que posee la membrana, los electrones se ven obligados a transportarse por un circuito externo liberando energía, en el catalizador del cátodo las moléculas de O₂ reaccionan con los protones y electrones para forman agua, la energía almacenada en el enlace de la molécula diatómica H₂ se transforma en energía eléctrica y vapor de agua (LUCAS-NÜLLE GmbH, 2010, pp.45-78.).

1.2.8. Recuperación de agua en pilas de combustible

La recuperación y el reciclaje de agua es una iniciativa muy importante para los sistemas de energía de pilas de combustible. Hoy en día existen un gran avance tecnológico para recuperar y reciclar agua; no es suficiente con obtener energía, también ha nacido la necesidad de recircular el agua utilizada en el proceso. Para lograr recuperar y reciclar agua en una pila de combustible de H₂, se puede utilizar algunos métodos: condensadores, sistemas de enfriamiento, y atrapanieblas (Jahnke y Daly, 2014, pp.89-200.). Si bien es cierto el agua es un recurso renovable, pero debido al mal uso del ser humano este recurso es escaso y vulnerable.

1.2.8.1. Ley de Avogadro "Relación cantidad-volumen"

Existe una relación entre la cantidad de un gas y su volumen, esta relación se deriva del trabajo de Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1823) y Amedeo Avogadro (1776-1856).

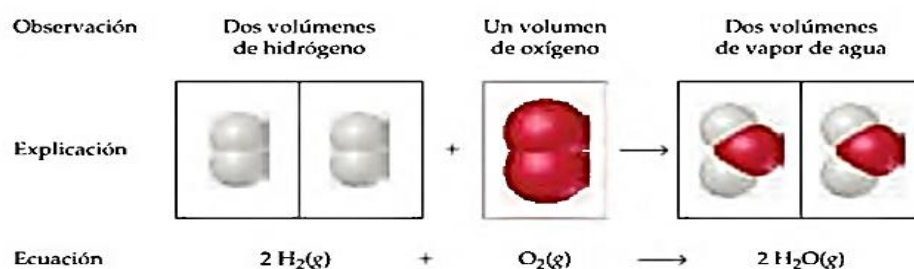


Figura 13-1: Ley de los volúmenes de combinación

Fuente: (Brown *et al.*, 2009).

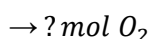
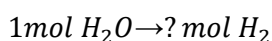
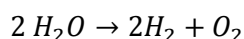
En la figura 13-1 se puede observar el aporte Gay-Lussac en 1808, acerca de los volúmenes de combinación, por ejemplo, nos menciona que dos volúmenes de hidrógeno gaseoso reaccionan o interactúan con un volumen de oxígeno gaseoso para formar dos volúmenes de vapor de agua. Tres años después, Amedeo Avogadro sustentó este aporte con una hipótesis, mencionando que **"volúmenes iguales de gases a la misma temperatura y presión contienen el mismo número de moléculas"**. Por ejemplo, 22,4 L de cualquier gas a 0 °C y a 1 atm contienen $6,02 \times 10^{23}$ moléculas de gas (es decir, 1 mol). Después de analizar esta hipótesis nace La ley de Avogadro que se conoce hoy en día, esta Ley nos menciona que: **"el volumen de un gas mantenido a temperatura y presión constantes es directamente proporcional al número de moles del gas"**. Según la siguiente ecuación.

$$V = \text{constante} \times n \quad (4)$$

Por lo tanto, al duplicar el número de moles del gas, el volumen también se duplicará si T y P permanecen constantes (Brown *et al.*, 2009, p.89-200).

Ecuación química:

1 litro de agua pesa 1 kilo y cuando se electroliza producirá hidrógeno y oxígeno como se describe en la siguiente ecuación:



$$1 \cancel{\text{ g } H_2O} \times \frac{1 \cancel{\text{ mol } H_2O}}{18,01528 \cancel{\text{ g } H_2O}} \times \frac{2 \cancel{\text{ mol } H_2}}{2 \cancel{\text{ mol } H_2O}} \times \frac{22,4 \text{ l}}{1 \cancel{\text{ mol } H_2}} = 1,243388 \text{ l } H_2$$

$$1 \cancel{\text{ g } H_2O} \times \frac{1 \cancel{\text{ mol } H_2O}}{18,01528 \cancel{\text{ g } H_2O}} \times \frac{1 \cancel{\text{ mol } O_2}}{2 \cancel{\text{ mol } H_2O}} \times \frac{22,4 \text{ l}}{1 \cancel{\text{ mol } O_2}} = 0,6216944 \text{ l } O_2$$

1.2.8.2. La crisis mundial del agua

El acceso a reservas de agua dulce y limpia es un problema muy importante al que se enfrenta la humanidad (Pascual *et al.*, 2016, p.23-67.). Según las Naciones Unidas, el agua insalubre mata a más

personas en todo el mundo que la misma guerra. La Tierra, que comprende un sinnúmero de formas de vida, en pleno siglo veintiuno sufre una grave crisis del agua (UNESCO-WWAP, 2003). La necesidad de abastecer a todos los seres vivos de este recurso vital ha llevado al ser humano a lograr varios proyectos de recuperación y obtención de agua., consiguiendo soluciones creativas y a un costo asequible (Cereceda *et al.*, 2014, pp.89-150.).

1.2.8.3. Países que sufren estrés hídrico

Chile es uno de los pocos países que, en los próximos años, deberá afrontar un elevado agotamiento de sus recursos hídricos (Álvarez, 2020). A lo largo de la historia Chile ha sido el país pionero en la aplicación y desarrollo de atrapanieblas. Sin embargo, esta tecnología ha sido implementada en otras partes del mundo como en las Islas Canarias (España), Perú, Ecuador, República Dominicana, Sudáfrica, Nepal, Cabo Verde, Namibia, México, Israel, Arabia Saudita, Yemen y en el Sultanato de Omán (Pascual *et al.*, 2016, pp.78-234.).

1.2.8.4. La niebla como recurso para obtener agua

La niebla es un hidrometeoro formado por un conjunto de gotitas de agua visibles (o cristales de hielo), lo suficientemente pequeñas para mantenerse suspendidas en la atmósfera cerca de la superficie terrestre (Sánchez, s.f., pp.78-90.).

1.2.8.5. Niebla de Evaporación

Este tipo de niebla se produce cuando se evapora agua en el aire frío. Este cambio de estado del agua tiene lugar gracias a una corriente de aire frío y relativamente seco que fluye o permanece en reposo sobre la superficie de agua que en ese momento se encuentra a mayor temperatura (Aranguiz *et al.*, 2009, pp.78-198.). A partir de esta niebla de evaporación se diseñan sistemas de captación de agua, convirtiéndose en una opción factible y aplicable en zonas donde existe escasez hídrica (Sánchez, 2018, pp.78-234.).

1.2.9. Prototipos o sistemas de recuperación de agua

La invención de los atrapanieblas tiene lugar en el año 1960 en Chile, este atrapaniebla tiene como función condensar el vapor de agua atmosférico que se concentra de forma natural en el aire; el vapor condensado forma gotas de agua líquida, este fenómeno popularmente conocido como rocío. Este proceso tiene lugar, gracias a la superficie expuesta que se enfría rápidamente por el cambio de temperatura, la humedad atmosférica se condensa a una velocidad mayor que la que

se puede evaporar, dando lugar a la formación de gotas de agua, que a gran escala resulta una buena opción para obtener este recurso hídrico (Fuentes, Santos y Santander, 2017, pp.78-93.).

En primera instancia la niebla es arrastrada por el viento hacia la malla, miles de gotitas de agua quedan adheridas a la malla, estas gotas caen por efecto de la gravedad hacia una canaleta recolectora, la canaleta dirige el agua hasta un recipiente recolector

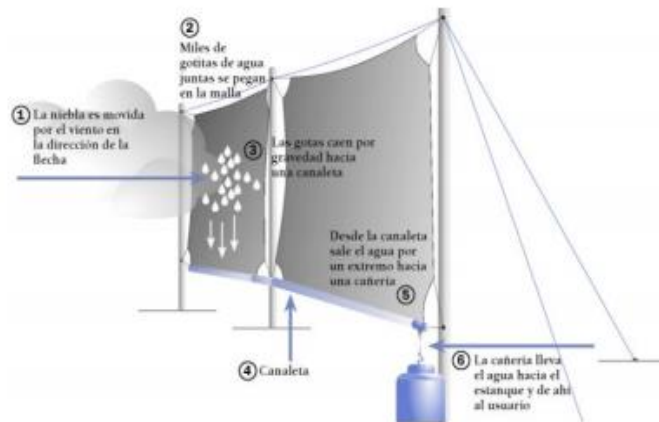


Figura 14-1: Atrapaniebla

Fuente: (Aranguiz *et al.*, 2009).

1.2.10. Tipos de atrapanieblas

1.2.10.1. Atrapanieblas Macrodiamante

Se trata de una estructura poliédrica compuesta por tubos revestidos con malla tipo Raschel, al poseer esta estructura poliédrica con muchas caras en diferentes direcciones, garantiza una eficiencia en obtener mayor cantidad de agua y al mismo tiempo mayor resistencia a fuertes vientos, una desventaja de este tipo de atrapaniebla es su elevado costo (Aranguiz *et al.*, 2009, pp.56-178.).



Figura 15-1: Atrapaniebla macrodiamante

Fuente: (Cereceda *et al.*, 2014).

1.2.10.2. Atrapaniebla Cilíndrico

Se trata de un cilindro de 2 metros de alto, en cuyo interior se encuentra varios hilos finos verticales de polietileno, esta estructura reposa sobre un pequeño bidón metálico de 100 litros (Aranguiz *et al.*, 2009, pp.78-345).



Figura 16-1: Atrapaniebla cilíndrico

Fuente: (Cereceda *et al.*, 2014).

1.2.10.3. Atrapanieblas Bidimensional

Es una estructura conformada por dos pilares distanciados a 12 metros, entre los cuales va templada una malla tipo Raschel de 4 metros de altura y unos cuantos tensores de refuerzo. Esta estructura, es ubicado en forma perpendicular a la dirección del viento predominante, de esta forma se asegura una mejor eficiencia (Aranguiz *et al.*, 2009, pp.67-90).

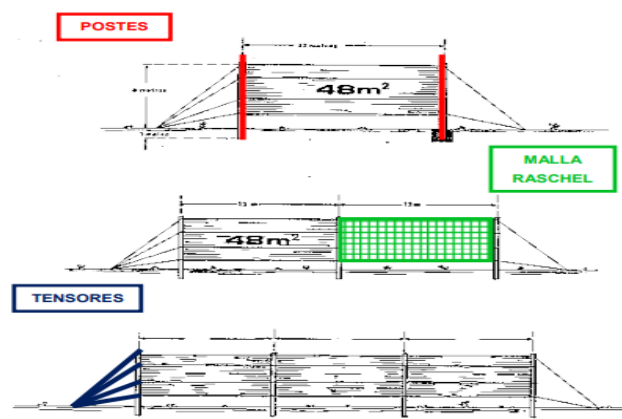


Figura 17-1: Atrapaniebla bidimensional

Fuente: (Cereceda *et al.*, 2014).

1.2.11. Materiales que se pueden emplear como malla condensadora

La malla frecuentemente empleada es la malla Raschel, de polipropileno o de nylon y en algunos casos se utiliza malla de acero inoxidable. Sin embargo, existen otros materiales con menor eficiencia que se pueden utilizar en los atrapanieblas, entre algunas opciones tenemos: sacos de rafia (polipropileno laminado), plástico de invernaderos, mosquiteras manipuladas, y como último recurso telas o trapos (Gómez y Quinteros, 2020, pp.90-234.).

1.2.11.1. Características que debe cumplir los materiales que son utilizados como malla colectora o condensadora

Existen algunas características que debe cumplir un material al ser utilizado como malla condensadora, para que no altere la composición del agua recolectada:

- El material debe dejar pasar la suficiente luz y permitir la circulación de la niebla
- Presentar alta resistencia
- Permitir la condensación del agua sobre sí mismo
- No alterar las características fisicoquímicas del agua captada (Pascual et al. 2016; Perez Cotrina, 2017, pp.78-345.).

1.2.12. Pilas de combustible de H₂ y energías renovables

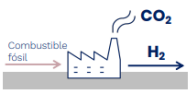
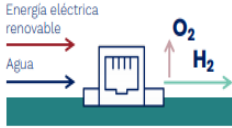
Las pilas de combustible de H₂ son consideradas como una fuente de energía renovable sin embargo anteriormente eran alimentadas con energía alterna; gracias a la necesidad de crear un prototipo sostenible y ecológico, se llegó a la conclusión que las pilas de combustible de H₂ puede ser alimentada por otro tipo de energía renovable (eólica y solar), es ahí donde se habla de una combinación de tipos de energías renovables. No solo basta con la producción de H₂ verde, sino también buscar una fuente de energía renovable, que satisfaga de electricidad a estos equipos de producción, de esta forma se habla de un proceso netamente sostenible con el ambiente. Varias empresas se han dedicado a indagar procesos que combinen estos tipos de energías; en el mercado se encuentra algunas opciones con una alta eficiencia de producción de H₂.

1.2.13. Producción de H₂ verde

El hidrógeno verde o conocido también como hidrógeno renovable se obtiene a partir de la electrólisis del agua con electricidad obtenida de fuentes renovables por lo cual se dice que producimos energía sin emitir dióxido de carbono, este método consiste en transformar el agua en moléculas gaseosas de hidrógeno y oxígeno. Dentro de los aspectos positivos del hidrógeno verde, es que proviene de fuentes renovables, no emite CO₂ y se lo obtiene al transformar el agua. Los gases de H₂ y O₂ obtenidos de la electrólisis del agua pueden ser depurados, enriquecidos o

transformados en un gas rico en CH₄ con características y composición similar a la del gas natural (Newsletter UFG, 2020, p.3-7.).

Tabla 4-1: Diferencia entre hidrógeno gris e hidrógeno verde

Diferencia entre los gases	
Hidrógeno gris	Hidrógeno verde
	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se genera a partir de reformado de vapor de gas natural sin captura de CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Es un medio para utilizar la inagotable energía renovable que se encuentra en el planeta de varias formas ➤ Fuente energética que no produce gases de efecto invernadero en su uso ➤ Puede reemplazar combustibles para producir electricidad, calor y diversos compuestos

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

1.2.13.1. Potencial de descarbonización del H₂ verde

Debido a la velocidad del cambio climático y los impactos que este provoca, es necesario que se disminuya la cantidad de gases de efecto invernadero que procede del transporte, ciudades, transporte y en la obtención de energía.

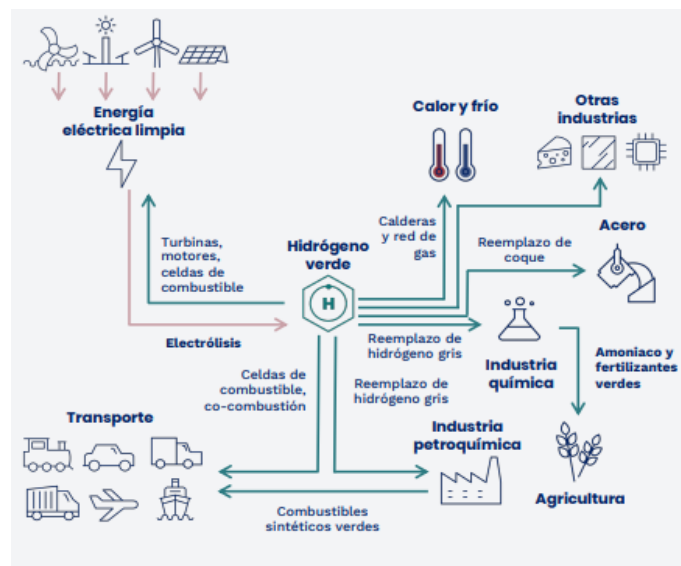


Figura 18-1: Potencial de descarbonización de H₂ verde

Fuente: (Correa, Max A; Barría, Carlos Q; Maluenda, 2020).

Las características fundamentales del hidrogeno verde es la capacidad para almacenar el excedente generado por energías renovables que garantiza el suministro energético con una mayor generación eléctrica de las energías renovables convencionales, el hidrogeno puede brindar la posibilidad de ser transformado en varias formas de energía como: gas sintético o calor, electricidad lo que se traduce para aplicaciones industriales y movilidad, finalmente otra de las características es que puede ser utilizado en sectores clave que no tiene opciones obvias de descarbonización en la industria intensiva en procesos con altas temperaturas y el transporte de mercancías (Newsletter UFG, 2020, pp.456-500.).

Se estima que para el año 2050 el uso de energía renovable, electrolisis y la necesidad de descarbonizar todos los sectores de las economías ayuden a las matrices energéticas y económicas del mundo a lucir más verdes (Correa, Max A; Barría, Carlos Q; Maluenda, 2020, pp.89-170.).

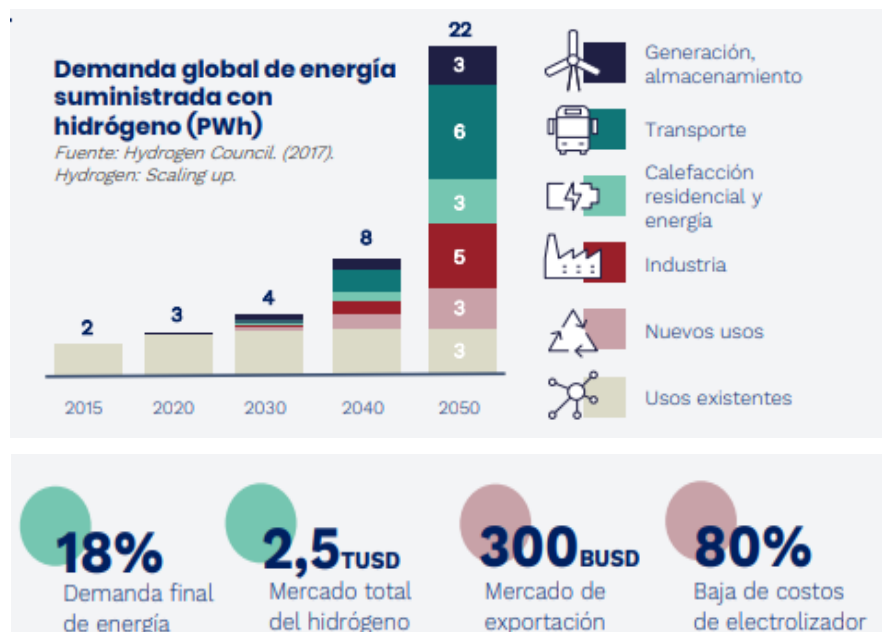


Gráfico 2-1: Demanda global de energía suministrada con hidrógeno

Fuente: (Correa, Max A; Barría, Carlos Q; Maluenda, 2020).

1.2.14. Energía Solar

La energía solar es una energía renovable que se obtiene de una fuente natural e inagotable en este caso es la proveniente del Sol. Existe varias formas de recoger y aprovechar los rayos del sol para generar calor y electricidad (Energía Solar, 2020, p.34-78.). Hay tres tipos de energía solar:

Fotovoltaica: transforma los rayos en electricidad mediante el uso de paneles solares

Fototérmica: aprovecha el calor a través de los colectores solares

Termoeléctrica: transforma el calor en energía de forma indirecta

1.2.14.1. Celda Fotovoltaica

La palabra “fotovoltaica” está conformada por la palabra griega fotos (luz) y el nombre del físico italiano Volta, este efecto fue observado por primera vez por Alexandre Edmond Bequerel en 1839. Posteriormente en el año 1958, se puso en órbita al alrededor de la tierra el primer satélite, alimentado por energía eléctrica gracias a las celdas solares (Lucas y Nülle GmbH Curso Unitrain «Energías renovables: Sistemas fotovoltaicos, 2010).

Una celda fotovoltaica es conocida como un material semiconductor, es decir se trata de un material que conduce energía únicamente bajo el predominio de la luz o en algunos casos del calor. Los materiales semiconductores son aquellos que poseen brechas de energías moderadas (menores a 3 eV), esta brecha de energía es la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción, muchos materiales semiconductores tienden a absorber luz visible, y por ello tienen color, a temperatura ambiente algunos electrones tienen la capacidad de atravesar la brecha y por lo tanto producir conducción. Se conoce como semiconductores típicos: Silicio ($E_g = 0,7 \text{ eV}$) Germanio ($E_g = 1,1 \text{ eV}$).

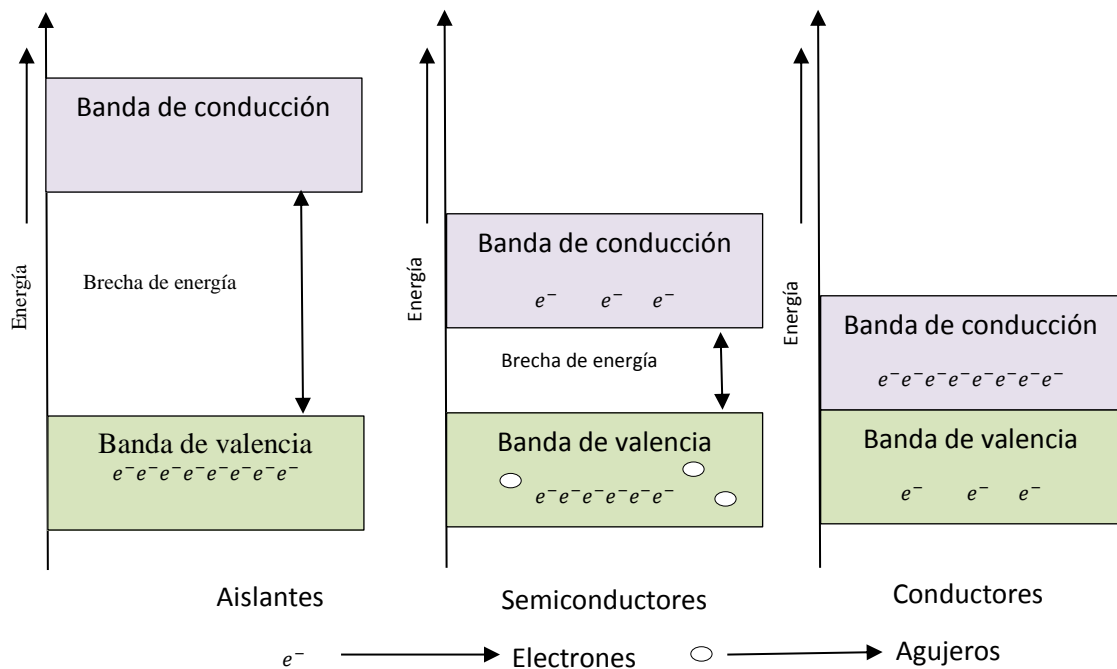


Figura 19-1: Características de un material semiconductor

Fuente: Adaptado del curso de Química del Estado Sólido

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

Una celda fotovoltaica consta de algunas partes como se observa en la figura 20-1.

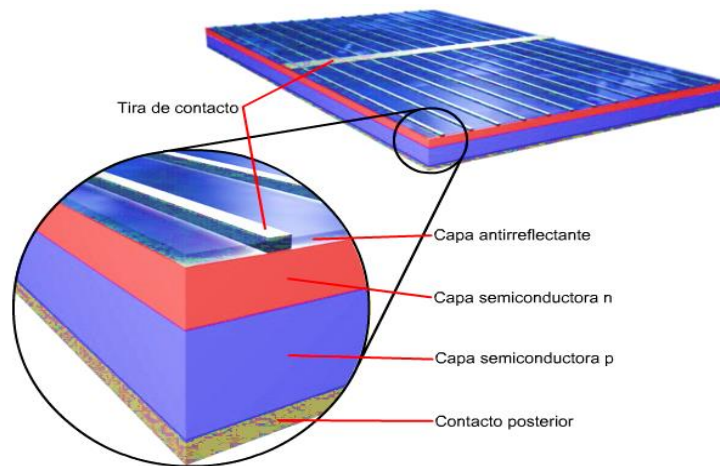


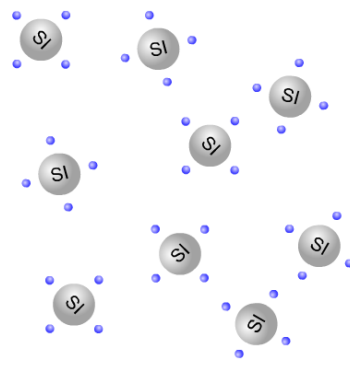
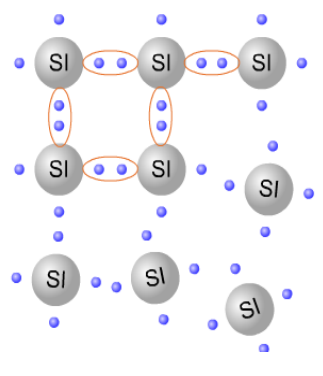
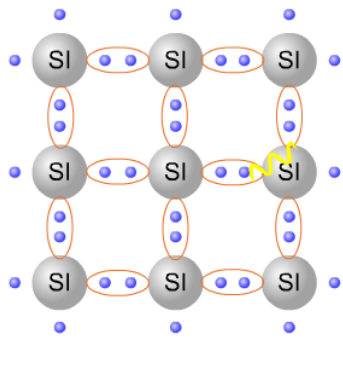
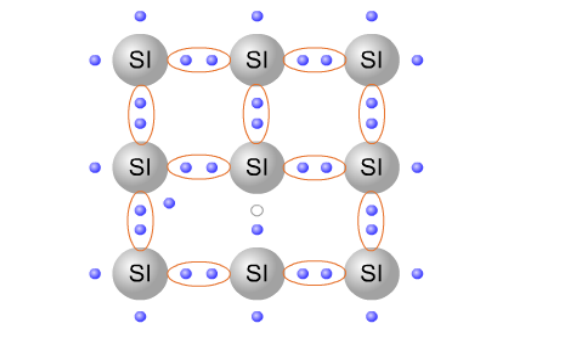
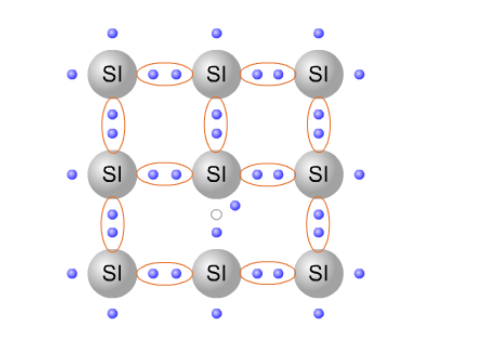
Figura 20-1: Estructura de una celda fotovoltaica

Fuente: (Lucas y Nülle GmbH Curso Unitrain Energías renovables: Sistemas fotovoltaicos, 2010).

- **Contacto metálico de las caras posteriores:** Este tipo de contacto permite la medición de la tensión de la celda fotovoltaica.
- **Capas semiconductor p:** En esta capa se introducen átomos extraños que posean menor cantidad de electrones libre, con el objetivo de alcanzar una preponderancia de portadores de carga positiva, a este efecto se conoce como “electrones defecto o huecos”, presentes en el material. Este tipo de material semiconductor se denomina “capas semiconductoras de tipo p (positivo)”, en este caso se crea un nivel adicional con huecos.
- **Capa semiconductor n:** En esta capa se introducen átomos extraños que poseen una mayor cantidad de electrones, con el objetivo de alcanzar una preponderancia de portadores de carga negativa (electrones), este efecto se lo conoce como conductividad de tipo n (negativo)
- **Dedos de contacto:** Son un tipo de conexión a las que, se les pueden conectar algún tipo de carga.
- **Capa antirreflectante:** Esta capa sirve para proteger la superficie de la celda fotovoltaica por el fenómeno de reflexión.

Una celda solar por lo general es fabricada con silicio, el silicio es el segundo elemento químico con mayor frecuencia en la corteza terrestre, un átomo de silicio posee cuatro electrones de valencia. En un cristal de silicio, cada dos electrones de átomos contiguos forman un enlace covalente. En este caso, el cristal de silicio no es un conductor eléctrico ya que carece de electrones libres que transporten energía. Si el cristal de silicio es sometido a la luz o al calor, este tipo de energía es absorbida por los electrones, si esta energía absorbida es suficiente, los electrones pueden abandonar sus enlaces covalentes y fluir libremente por el cristal de silicio, a este efecto se lo conoce como electrón “defecto o hueco”. De esta forma el silicio se convierte en un conductor de corriente, a este efecto se lo conoce como conductividad intrínseca de los semiconductores.

Tabla 5-1: Electrón "defecto o hueco".

<p>Un átomo de silicio posee cuatro electrones de valencia</p>	<p>Formación del enlace covalente</p>	<p>Por efecto de la luz los electrones abandonan sus enlaces covalentes</p>
		
<p>Los electrones pueden fluir libremente por el cristal de silicio</p>		<p>El electrón vuelve al enlace covalente</p>
		

Fuente: (Lucas y Nülle GmbH Curso Unitrain Energías renovables: Sistemas fotovoltaicos, 2010).

Realizado por: Miranda, Sonnia, Quishpi, Noemi, 2021.

En la conductividad intrínseca por efecto de la elevación de la temperatura, los electrones de valencia saltan a la banda de conducción.

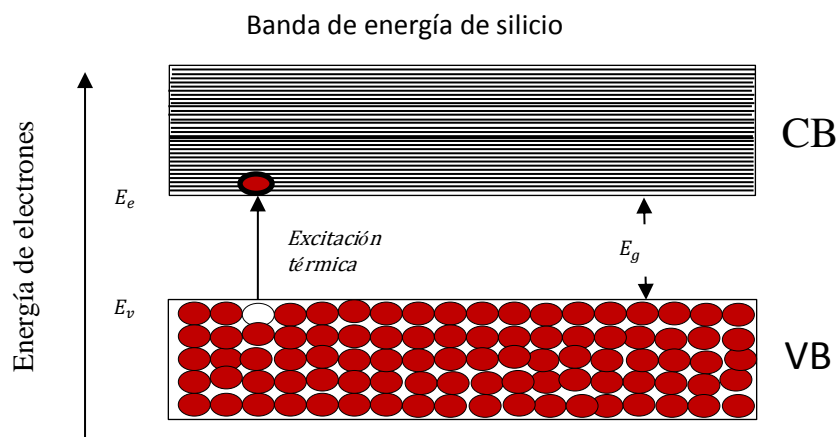


Figura 21-1: Bandas de energía del silicio

Fuente: Adaptado de curso de Química del Estado Sólido

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

Para separar los electrones de los huecos, se debe crear un campo eléctrico, en el caso de los semiconductores para crear un campo eléctrico se puede introducir átomos que generen perturbación en el sistema, en una zona determinada de la red cristalina se integran átomos de cinco electrones, a esta zona se denomina semiconductor o dopaje n, ahora esta zona posee una carga ligeramente negativa. En otra zona se introduce átomos de tres electrones, a esta zona se la conoce como semiconductor o dopaje p, ahora esta zona posee una carga ligeramente positiva, al unir los semiconductores n y p se forma la unión p-n creando así un campo magnético.

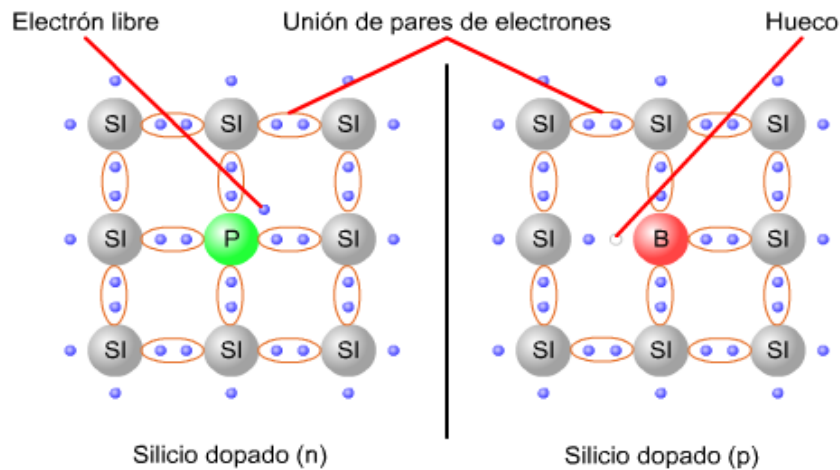


Figura 22-1: Formación del campo magnético

Fuente: (Lucas y Nülle GmbH Curso Unitrain Energías renovables: Sistemas fotovoltaicos, 2010).

En el límite que divide ambas capas los electrones atraviesan libremente la capa negativa a la positiva con el objetivo de recombinarse con los huecos.

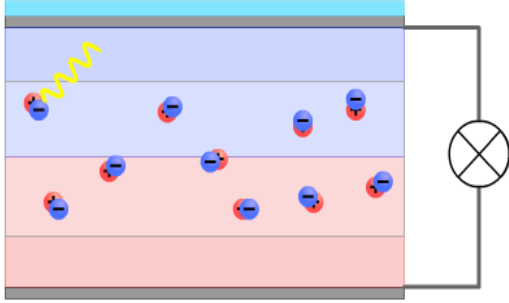
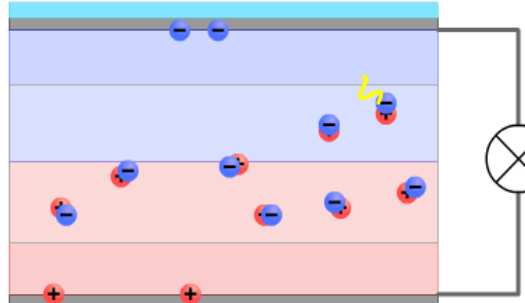
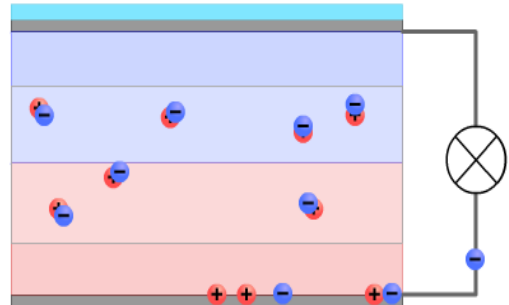
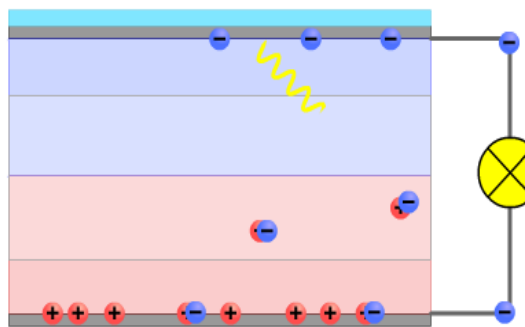
Tabla 6-1: Formación de un campo magnético

<p>En el límite que divide ambas capas los electrones atraviesan libremente la capa negativa a la positiva con el objetivo de recombinarse con los huecos.</p>	<p>En la zona determinada de la capa semiconductor n, emigran los electrones, al permanecer los átomos estáticos, la zona adopta una ligera carga positiva, por lo contrario, en la capa semiconductor p, en la cual los electrones que emigraron se recombinan con los huecos, por esta razón esta zona adopta una carga ligeramente negativa.</p> <p>Debido a que los portadores de carga se separan, en esta zona limite se crea un campo eléctrico, a esta zona se la conoce como “zona de carga especial “</p>
 <ul style="list-style-type: none"> - Electrón + Hueco - Átomo de carga negativa + Átomo de carga positiva 	

Fuente: (Lucas y Nülle GmbH Curso Unitrain Energías renovables: Sistemas fotovoltaicos, 2010).

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

Tabla 7-1: Efecto fotovoltaico

<p>Al incidir la luz sobre la retícula cristalina, esta energía luminosa es transmitida a la retícula</p>	<p>Este tipo de luz excita los átomos presentes en la red cristalina, en consecuencia, se generan pares de electrones, y huecos</p>
	
<p>Cuando esto ocurre fuera de la unión p-n, los pares de electrones y huecos se recombinan otra vez muy rápidamente, por otro lado, dentro de la unión p-n, los pares de electrones y huecos se separan por el efecto del campo eléctrico de la unión p-n</p>	<p>Si conectamos una carga, entonces se puede comprobar que fluye corriente eléctrica por el sistema.</p>
	

Fuente: (Lucas y Nülle GmbH Curso Unitrain Energías renovables: Sistemas fotovoltaicos, 2010)

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.



Figura 23-1: Panel solar

Fuente: (Ener City, s.f.).

1.2.15. Energía Eólica

Es un tipo de energía renovable que se obtiene de la energía cinética del viento, el viento mueve las palas de un aerogenerador y a su vez pone en funcionamiento una turbina y transforma en energía eléctrica (Enel, s.f.).



Figura 24-1: Energía eólica

Fuente:(Enel, s.f.).

1.2.16. Prototipos que utilizan combustible de H₂ y energías renovables

1.2.16.1. Automóvil con paneles solares y control remoto

El H-racer 2.0 fabricado en Shanghai, China, es el H-racer de nueva generación, nos presenta el alcance de la tecnología automotriz, para construir y conducir un automóvil a escala; este automóvil consta de una celda de combustible de H₂ y un panel solar; una estación de repostaje de H₂ alimenta al automóvil de energía eléctrica, con la ayuda de un control remoto el automóvil

se dirige en todas direcciones, tanto el automóvil como la estación de repostaje de H₂ tienen una carcasa transparente e iluminación LED.



Figura 25-1: Automóvil con paneles solares y control remoto

Fuente: (H-RACER, s.f.).

Contenido del kit

- Estación de hidrógeno: Se trata de un recipiente en el cual se coloca agua, este recipiente posee dos tipos de conexión; en la primera conexión se conecta el panel solar, la segunda es una conexión hacia el automóvil, esta estación de repostaje de H₂ carga al automóvil de energía eléctrica.
- Chasis de coche: Es el soporte de todas las piezas eléctricas del automóvil
- Carrocería: Protege todas las partes del automóvil.
- Pila de combustible PEM: Conduce el H₂ y el O₂ a través de la pila sin que estos lleguen a mezclarse.
- Panel solar de 0,75 vatios: Es una plancha de vidrio, constituida de estaño y otros materiales, sirve para captar energía solar y conducirla a un transformador de energía eléctrica, generando calor o electricidad.
- Mando a distancia por infrarrojos: Se utilizan para dirigir en varias direcciones al automóvil.
- Conector rápido
- Válvula de purga: Sirve para liberar el hidrógeno por completo.
- Válvula de entrada de repostaje
- Jeringa: Sirve para extraer el aire tirando de la jeringa.
- Parachoques delantero y trasero: Protege al automóvil de daños.
- 3 tubos de plástico flexible
- 8 tornillos
- Cable conector para estación solar + hidrógeno
- Pilas de control remoto

1.2.16.2. Pila de combustibles de H_2 con energía eólica y solar

Fabricado en Shanghai, China; este kit con dos clases de energías renovables demuestra el funcionamiento de un sistema tecnológico de energía limpia en miniatura. Gracias un panel solar o una turbina eólica con placas perfiladas según la NASA aeronáutica, se alimenta un circuito eléctrico, se genera hidrógeno a través de la electrolisis del agua, este hidrógeno se convierte en electricidad gracias a una membrana de intercambio protónico.



Figura 26-1: Pila de combustibles de H_2 con energía eólica y solar

Fuente: (Educational, s.f.).

Contenido de kit

- Aerogenerador: Sirve para transformarla energía cinética proveniente del viento en energía eléctrica.
- Cuerpo de aerogenerador: Sirve para controlar el aerogenerador
- Cabezal de rotor para placas perfiladas
- 3 hojas de polipropileno para turbina
- Base de soporte de turbina: Da soporte a la turbina
- Poste de aerogenerador de aluminio
- Electrolizador PEM: Proporciona electricidad para separar a los iones de las moléculas de H_2O .
- Base de electrolizador PEM: Sirve de soporte para el electrolizador PEM
- Pila de combustible PEM: Conduce el H_2 y el O_2 a través de la pila sin que estos lleguen a mezclarse.
- Base de pila de combustible PEM: Sirve de soporte para la pila de combustible PEM
- Tanque de hidrógeno: Contenedor de agua
- Tanque de oxígeno: Contenedor de agua

- Contenedores de gas internos: Almacenan el H₂ y O₂ generados.
- Base del módulo de placa de circuito
- Módulo de resistencia variable de 100 ohmios
- Panel solar de 1 vatio: Transforma la energía solar en electricidad.
- Adaptadores, cubierta de tubería y válvula de purga
- Base del módulo del tanque de agua / gas
- Tubo de silicona transparente
- Clavijas de plástico para electrolizador
- Paquete de baterías con cables de conexión
- Jeringa: Sirve para llenar de agua los tanque de H₂ y O₂

1.2.16.3. Automóvil con panel solar

Este kit funciona con una celda de combustible por electrólisis, al ser visible la celda de combustible, se puede observar su funcionamiento. La ventaja de esta versión es que la producción de H₂ se lleva a cabo en el propio vehículo.



Figura 27-1: Automóvil con panel solar

Fuente: (Horizon Fuel Cell Technologies, s.f.).

Contenido de kit

- Panel solar de 0,75Wp (Watt pico): Transforma la energía solar en electricidad.
- Célula de combustible reversible: Conduce el H₂ y el O₂ a través de la pila sin que estos lleguen a mezclarse.
- Chasis y ruedas del coche.
- Motor eléctrico.
- Leds parpadeantes.

- Recipiente de agua.
- Colectores de gases.
- Jeringuilla: Sirve para llenar los contenedores de agua y también para inyectar agua a la pila de combustible PEM.
- Tubos de silicona y cables.
- Pack de pilas: Alimenta de Energía a la batería.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Área de estudio

El área de estudio se establece en el laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba – Ecuador.

La facultad de ciencias $1^{\circ}39'28.57''$ S, $78^{\circ}40'34.83''$ W



2.2. Tipo y diseño de la investigación

2.2.1. Según el enfoque de estudio

Cuantitativa

En el presente trabajo de titulación se realizó una investigación de tipo cuantitativa ya que se generaron resultados a partir de datos recolectados en campo y analizados en el laboratorio es decir que se usaron valores numéricos para especificar los resultados y aceptar o rechazar la hipótesis del problema en asunto.

2.2.2. Según el objetivo

Aplicada

Según el objetivo, la investigación es aplicada, debido a que se intenta resolver un problema específico mediante la búsqueda y la consolidación del conocimiento acerca del funcionamiento de las pilas de combustible de H_2 .

2.2.3. Según el nivel de profundización en el objeto de estudio

Explicativa

La investigación es explicativa ya que el prototipo nos puede determinar las causas y consecuencias de un fenómeno concreto, en este caso el vapor de agua recuperada.

2.2.4. Según la manipulación de variables

Experimental

El proyecto se encuentra dentro de una investigación experimental, ya que en los procesos que se realizan se manipulan algunas variables para garantizar el funcionamiento del equipo y cumplir con los objetivos planteados.

2.2.5. Según el periodo temporal

Transversal

Se trata de una investigación transversal, debido a que se realiza en un tiempo determinado. La variable tiempo no es determinante en la experimentación.

2.2.6. Según el lugar de estudio

Campo

Se trata de un tipo de investigación de campo ya que se recopila los datos en condiciones naturales.

2.3. Población de estudio

Para determinar la población se debe tener claro cuál es la unidad de análisis del estudio para lo en esta investigación se considera como población a las tres pilas de combustible existentes en el laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias.

2.4. Tamaño de la muestra

Para determinar el tamaño de la muestra que se va a elegir en esta investigación de acuerdo con

el planteamiento del problema, al tener una población de tres pilas iguales, que presentan características y partes iguales, provenientes de un mismo fabricante LUCAS-NÜLLE, el tamaño de la muestra es igual a una pila de combustible elegida completamente al azar.

2.5. Matriz de consistencia

A continuación, en la tabla 1-2 se presenta de forma general los elementos importantes del proyecto de investigación.

Tabla 1-2: Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES
<p>Problema general: ¿Cómo se puede recuperar el agua del proceso electroquímico en pilas de combustible de hidrógeno alimentadas por energías renovables?</p>	<p>Objetivo general: Desarrollar un sistema de recuperación de agua del proceso electroquímico en la producción de hidrógeno verde</p> <p>Objetivos específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Construir el estado del arte de pilas combustible de hidrógeno • Diseñar un prototipo de un sistema de recuperación de agua para pilas de combustible • Demostrar un proyecto piloto que incluya pilas de combustible que funcionan en base a energía solar 	<p>Hipótesis:</p> <p>General: El prototipo colocado en la salida de vapor de agua en el sistema de pilas de combustible recupera agua destilada.</p> <p>H0: No se obtiene agua destilada mediante un prototipo colocado en la salida de vapor de agua en el sistema de pilas de combustible del laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias.</p> <p>HA: Se obtiene agua destilada mediante un prototipo colocado en la salida de vapor de agua en el sistema de pilas de combustible del laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias.</p>	<p>Variable independiente: La velocidad del proceso electroquímico en las pilas de H₂.</p> <p>Indicadores: Corriente de electrolización</p> <p>Variable dependiente: La cantidad de agua recuperada.</p> <p>Indicadores: La forma y el material del prototipo</p>

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

2.6. Técnicas y metodologías.

2.6.1. Prototipo para recuperar agua de pilas de combustible de H₂ "water recovery tank"

Para recuperar agua en una pila de combustible de H₂ se puede realizar un prototipo basado en un atrapaniebla denominado "water recovery tank", de esta forma no se desperdicia este recurso vital, al contrario esta agua reciclada puede volver a recircular en el proceso. Si esta idea se enfoca a una escala mayor, se lograría satisfacer de energía y agua potable a zonas desérticas y convertirlas en zonas habitables.

"Water recovery tank" consta de algunos componentes:

Mallas colectoras, estas mallas dejan pasar la niebla y condensan el contenido en agua. Las mallas que se utilizan están hechas de hilos de polipropileno, similares al nylon.

Cilindro que sirva de estructura para la malla colectora.

Canaleta recolectora sobre la cual, por motivos de gravedad, se congrega el agua condensada.

Un depósito o recolector donde se almacena el agua recuperada (Pascual *et al.*, 2016, p.56-89.).

2.6.2. Modelado del prototipo

Después de la revisión bibliográfica, se observó que a mayor número de malla mayor captación de agua, como es el caso del atrapaniebla con estructura poliédrica con muchas caras en diferentes direcciones, esta distribución garantiza una alta eficiencia.

Para la elaboración del prototipo se modeló tres propuestas basadas en un atrapaniebla circular:

- a) Este prototipo consiste en un cilindro, que en su interior se encuentra mallas en una misma dirección (horizontal), las mangueras de salida de vapor de agua están conectadas en posición perpendicular a las mallas, con esto se estima que existirá más captación de gotas de agua por la malla. Esta propuesta se basa en un atrapaniebla bidimensional, que puede constar de una o varias mallas en la misma dirección (Aranguiz *et al.*, 2009, p.34-90.).

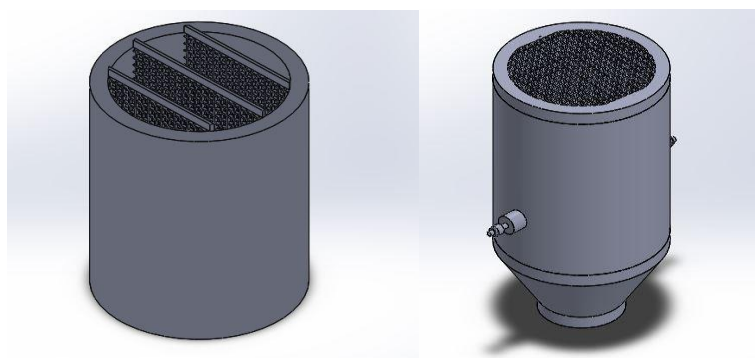


Figura 1-2: Propuesta 1

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2020.

- b) En el caso de este prototipo se colocó dos mallas en forma de cruz, las mangueras de salida de vapor de agua deben estar de tal forma que cada manguera este en posición perpendicular con la malla adyacente.

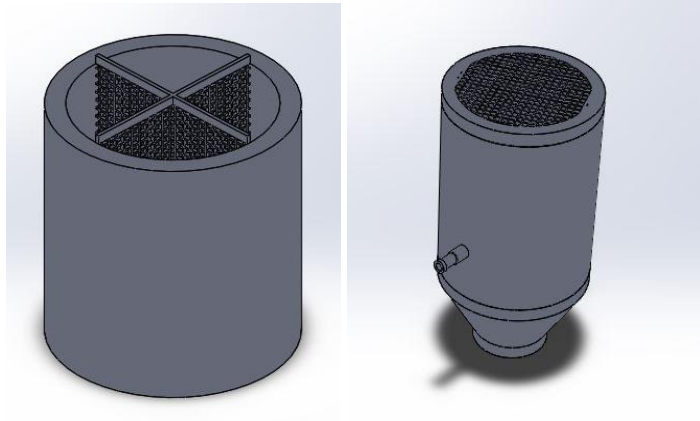


Figura 2-2: Propuesta 2

Fuente: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2020

- c) Se estima que, a mayor número de mallas internas, mayor será la cantidad de agua adherida, en este caso se cuenta con varias mallas, las mangueras se encontraran en la parte inferior del cilindro, mientras el vapor asciende es condensado y por efecto de la gravedad descende pequeñas gotas. Esta propuesta se basa en el atrapaniebla macrodiamante, puesto que posee varias mallas en diferentes direcciones (Aranguiz et al. 2009; Sánchez, 2018).

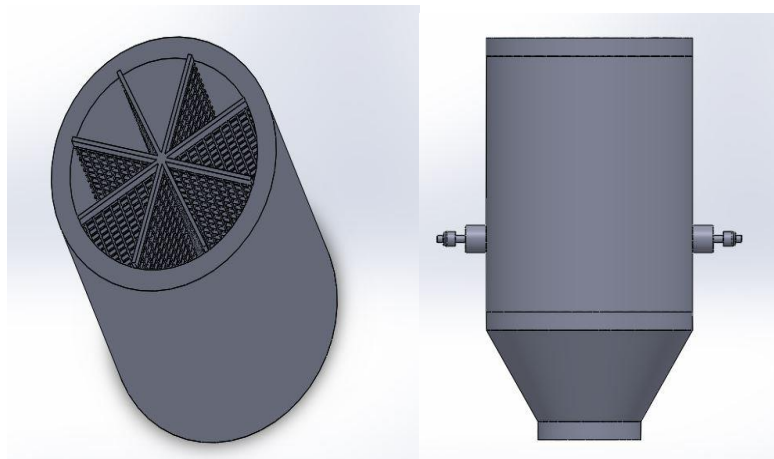


Figura 3-2: Propuesta 3

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2020.

2.6.3. Impresión del prototipo "water recovery tank"

Al analizar las propuestas de modelado, se optó por la propuesta "a", es decir un cuerpo similar a un cono con tres mallas ubicadas en el centro en posición horizontal, este prototipo posee una tapa con una malla, esta malla permite el ingreso de aire al sistema, con el objetivo de mejorar la capacidad de condensación de vapor de agua.

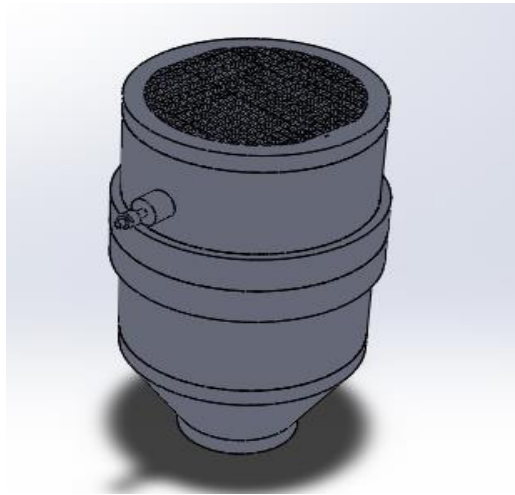


Figura 4-2: Propuesta final
Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2020.

Con la ayuda de una impresora 3D se logró imprimir todas las partes del prototipo de un material o filamento de ácido poli láctico con sus siglas "PLA", este material es un termoplástico, que se puede fabricar a base de algunos recursos renovables como es el almidón de maíz, raíces de tapioca o caña de azúcar. Este filamento al estar fabricado a base de recursos renovable no presenta ningún tipo de peligro para estar en contacto con el agua que se recupera en el prototipo "water recovery tank".

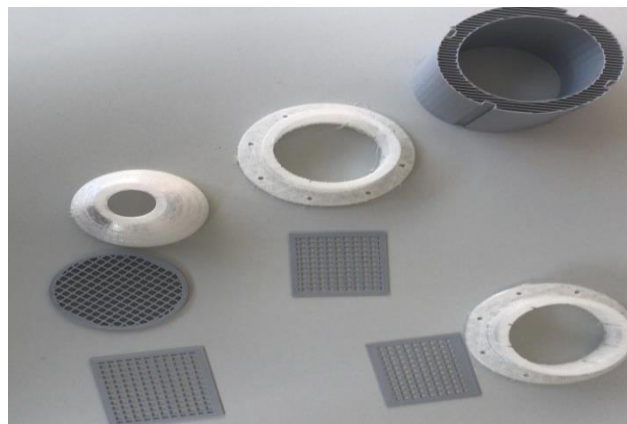


Figura 5-2: Partes del prototipo "water recovery tank"
Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2020.

2.6.7. Materiales y Equipos

2.6.7.1. Materiales y Equipos proporcionados por la ESPOCH

Se utilizó materiales presentes en el laboratorio de Redes Inteligentes y Energías Renovables, y otros materiales complementarios tal como se muestra en la tabla 2-2.

Tabla 2-2: Materiales y Equipos proporcionados por la ESPOCH

Cantidad	Unidad	Descripción	Valor Unitario	Subtotal
1	u	Cronometro	15	15
1	u	Flexómetro	8	8
3	u	Interfaz Unitrain con instrumentos virtuales (basicovi)	3060	3060
1	u	Curso de tecnología energética, tecnología de pilas de combustible	4688	4 688
1	u	Computador	399	399
1	kw	Energía consumida 1 kw por semana	1,60	1,60

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

2.6.7.2. Materiales y Equipos adicionales

Además de los equipos básicos que se utilizaron, para la construcción del prototipo water recovery tank fue necesario adquirir algunos materiales externos que se muestra en la tabla 3-2.

Tabla 3-2: Materiales y Equipos adicionales

Cantidad	Unidad	Descripción	Valor Unitario	Subtotal
1	m	Tubos de vinilo (silicona) de 3/16	3	3
2	u	Electroválvulas de 3/16 o ¼ pulgada (12 Voltaje De Corriente Directo)	5	10
1	Kg	Material para impresor 3 D transparentes	30	30
1	u	Electroválvulas de 1 ½ pulgada (12 VDC)	7,589	7,589
10	u	Terminales RIEL Hembra azul	0,089	0,893
1	L	Agua destilada	1	1
1	u	Mini Protoboard (400 puntos)	2,679	2,679
1	u	Kit de Cables Protoboard (macho o hembra)	3	3
1	m	Cable parlante	0,538	0,538
1	u	Arduino	16,964	16,964
10	u	Abrazaderas de plástico	0,3	3
2	u	Relés de 5 o 3 voltios	15	30
3	u	Pulsadores grandes	0,670	2,009
3	u	Resistencias ½ Watt 330 Homnios	0,045	0,134
3	u	Resistencias ½ Watt 4,7 kΩ	0,045	0,134
1	u	Batería de 12 voltios 5 Amperios-hora	19	19
1	u	Controlador de carga solar 12 Voltios	15	15
2	u	Cables con conexión de tipo banana	0,175	0,357

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

2.7. Pre-Experimentos

2.7.1. Curva característica del electrolizador.

1. Abrir el instrumento virtual electrolizador
2. Abrir el instrumento virtual registrador X/Y
3. Configurar el registrador X/Y de tal forma que el eje X mida la tensión del canal A y el eje Y mida la corriente del canal B
4. Iniciar el registro de la curva
5. Aumentar poco a poco la corriente de electrolización
6. Finalizar el registro

2.7.2. Primera ley de Faraday: Medición del volumen de H₂ en función del tiempo de electrolización

1. Verificar que el nivel del agua de depósito de H₂ este en cero
2. Seleccionar una energía de electrolización igual a 1 A
3. Medir el volumen de H₂ según los periodos de tiempo establecidos (60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 segundos)

2.7.3. Primera ley de Faraday: Medición del volumen de H₂ en función de la energía de electrolización.

1. Verificar que el nivel del agua de depósito de H₂ este en cero
2. Seleccionar diferentes valores de energía de electrolización (0,4- 0,8-1,2-1,6-2,0)
3. Cada 180 segundos, anotar el volumen de H₂ generado

2.7.4. Medición de volumen de H₂

1. Verificar que el agua este en 0 ml en dos los tanques
2. Con la ayuda de un cronómetro, cada tres minutos realizar diferentes mediciones a diferentes intervalos de corriente de electrolización.

2.7.5. Medición de volumen de H₂ y O₂

1. Verificar que el agua este en 0 ml en dos los tanques
2. Abrir las mangueras de las pilas

3. Encender el electrolizador a una corriente constante de 1.5 A
4. Observar la variación de volumen de H₂ y O₂ en sus respectivos tanques, a diferentes tiempos

2.7.6. Medición de tiempo de Purga

1. Purgar el conjunto de pilas
2. Llenar el depósito de H₂ con 50 ml con una corriente de electrolización de 2 A
3. Girar la resistencia variable hasta el centro de su capacidad (1A)
4. Iniciar el registro del diagrama y al mismo tiempo encender el electrolizador a 1 A
5. Medir el tiempo en el que la corriente que pasa por la resistencia variable cae
6. Posteriormente medir el tiempo de purga en el cual el sistema llega alcanzar el punto de potencia máxima (punto inicial), con una resistencia variable de (1A).

2.7.7. Comprobar el funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno alimentada con energía renovable

1. Retirar la manguera que protege las dos conexiones de la pila
2. Con la ayuda de las tijeras se debe cortar dos tramos de manguera de silicona de 4 cm, colocar el alfiler rojo en uno de los tubos y el alfiler negro en el otro tubo.
3. Corta el tubo largo que resta del kit en dos partes iguales.
4. Colocar los tubos cortos de 4 cm en las boquillas de H₂ y O₂ ubicadas en la parte inferior a los costados de la pila de combustible.
5. Conectar las cuatro ruedas al chasis del carro. Se debe asegurar cada rueda hasta escuchar un sonido de chasquido.
6. Insertar la celda de combustible en la ranura ubicada en el chasis del carro, de igual forma se debe insertar los dos contenedores externos de almacenamiento de H₂ y O₂.
7. Con la ayuda de la jeringa llenamos la pila de combustible Retire la tapa del tubo conectado al lado de oxígeno de la celda de combustible.
8. Con la ayuda de la jeringa, inyectar agua destilada en la celda de combustible hasta la mitad de su capacidad.
9. Colocar los contenedores internos en los dentro de los contenedores externos teniendo en cuenta que las ranuras no queden bloqueadas por los bordes de plástico. Llenar el agua hasta el nivel 0.
10. Conectar los dos tubos que salen de los contenedores internos de "H₂" y "O₂" a las boquillas superiores de la pila de combustible(Horizon Fuel Cell Technologies, s.f.).

2.7.8. Prototipo "water recovery tank"

1. Purgar el sistema
2. Conectar el sistema en paralelo, dejar abierto el circuito
3. Llenar el depósito de H₂ con 60 ml de hidrógeno
4. Abrir los instrumentos digitales: voltímetro A y amperímetro B
5. Conectar ambas pilas con la resistencia variable
6. Para mantener en equilibrio el sistema (generar H₂ y al mismo tiempo consumir), controlar la energía de electrolización, con el objetivo de que pase por la resistencia variada una energía igual a 1 y a 1,5 respectivamente según el tratamiento
7. Purgar el sistema: en el primer caso cada 10 minutos por 30 minutos realizar una purga de 3 segundos, en el segundo caso realizar una purga de 3 segundos a los 25 minutos.
8. Medir el volumen de agua recuperada

El efecto de la corriente a través de la carga (1 A – 1,5 A) y el tiempo de purga (cada 10 min – cada 25 min) en la cantidad de agua recuperada (ml – prototipo). La corriente es el factor A, y el tiempo de purga es el factor B. El experimento es llevado a cabo tres veces.

2.7.9. Vehículo de hidrógeno y energía renovable

1. Conectar el panel solar a la pila de combustible, dejar cargar durante el tiempo establecido
2. Una vez transcurrido el tiempo de carga desconectar el panel, y conectar el motor del vehículo a la pila de combustible
3. Medir el tiempo de funcionamiento del vehículo

El tiempo de carga del panel solar (5 min– 15 min) y de radiación (baja (tarde o temprano en la mañana) – alta (medio día)) en el tiempo de funcionamiento del vehículo (s – carro H₂). El tiempo de carga del panel solar es el factor A, y la radiación es el factor B. El experimento es llevado a cabo tres veces.

2.8. Diseño Experimental

Para el presente trabajo (prototipo de recuperación de agua y el automóvil de H₂ alimentado con energía solar) se utilizará un diseño factorial 2². El principal objetivo de un diseño factorial es, estudiar y analizar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas; estos factores pueden ser de tipo cualitativo y cuantitativo. En el caso del prototipo "water recovery tank" se utilizó dos factores cuantitativos que son: la carga (1 A – 1,5 A) y el tiempo de purga (cada 10 min – cada 25 min). En el caso del vehículo de hidrógeno y energía renovable, se utilizó un factor cuantitativo que es el tiempo de carga del panel solar (5 min– 15 min) y un factor cualitativo que es la radiación

(baja (tarde o temprano en la mañana) – alta (medio día)).

Este tipo de diseño considera los factores A y B con a y b ($a, b \geq 2$) niveles de prueba, respectivamente, con estas condiciones se puede desarrollar un arreglo o diseño factorial $a \times b$, el cual consiste en $a \times b$ tratamientos. Algunos casos particulares de uso frecuente son: el factorial 2^2 , el factorial 3^2 y el factorial 3×2 (Gutiérrez Pulido y De la Vara Salazar, 2008, p.67-100).

2.9. Modelo estadístico e hipótesis de interés

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Y_{ijk} = La respuesta para la k-ésima u.e. del nivel i de A y j de B.

μ = La media común a todos los datos del experimento.

α_i = El efecto debido al i-ésimo nivel del factor A.

β_j = El efecto debido al j-ésimo nivel del factor B.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción en la combinación ij.

ε_{ijk} = Error experimental o efecto aleatorio de muestreo que se supone sigue una distribución normal con media cero y una varianza constante σ^2 ($N(0, \sigma^2)$) y son independientes entre si.

- Para que la estimación de los parámetros en este modelo sea única, se introduce las restricciones $\sum_{i=1}^a \alpha_i = 0$, $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ y $\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij} = 0$
- Es decir, los efectos dados en el modelo son desviaciones relacionadas con la media global.
- En este modelo para los dos casos: prototipo “water recovery tank”(carga) $a = 2$ y (tiempo de purga) $b=2$, y $n = 3$ repeticiones, para el vehículo de hidrógeno y energía renovable (tiempo de carga del panel solar) $a = 2$ y (radiación) $b=2$, y $n = 3$ repeticiones.
- Las hipótesis de interés para los tres efectos en el modelo anterior son:

PROTOTIPO "WATER RECOVERY TANK"

H0: Efecto de la carga (A) = 0

HA: Efecto de la carga (A) $\neq 0$

H0: Efecto del tiempo de purga (B) = 0

HA: Efecto del tiempo de purga (B) $\neq 0$

H0: Carga x Tiempo de purga (AB) = 0

HA: Carga x Tiempo de purga (AB) $\neq 0$

VEHÍCULO DE HIDRÓGENO Y ENERGÍA RENOVABLE

H0: Efecto del tiempo de carga del panel solar (A) = 0

HA: Efecto del tiempo de carga del panel solar (A) $\neq 0$

H0: Efecto de la radiación (B) = 0

HA: Efecto de la radiación (B) $\neq 0$

H0: Tiempo de carga del panel solar x Radiación (AB) = 0

HA: Tiempo de carga del panel solar x Radiación (AB) $\neq 0$

H0: $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0$

HA: $\alpha_i \neq 0$ para algún i

H0: $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$

HA: $\beta_j \neq 0$ para algún j

H0: $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ para todo ij

H0: $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ para todo ij

2.10. ANOVA del diseño factorial a x b

$$SC_T = SC_A + SC_B + SC_{AB} + SC_E$$

Tabla 4-2: ANOVA para el diseño factorial a x b

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	F0	Valor P
Efecto A	SC_A	$a - 1$	CM_A	CM_A/CM_E	$P(F > F_0^A)$
Efecto B	SC_B	$b - 1$	CM_B	CM_B/CM_E	$P(F > F_0^B)$
Efecto AB	SC_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	CM_{AB}	CM_{AB}/CM_E	$P(F > F_0^{AB})$
Error	SC_E	$ab(n-1)$	CM_E		
Total	SC_T	$abn - 1$			

Fuente: (Gutiérrez Pulido y De la Vara Salazar, 2008).

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

3.1. Ensamblaje del prototipo "water recovery tank"

Al tener todas las piezas impresas y secas, se procedió a la etapa de ensamblaje, en la cual se unió todas las piezas, posteriormente se procedió a lijar y pulir toda imperfección presente en el prototipo, una vez pulido la última fase consistía en fijar todas las partes con la ayuda de una suelda en frío.



Figura 1-3: Ensamblaje del prototipo "water recovery tank"

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

3.2. Conexiones eléctricas del prototipo "water recovery tank"

Este prototipo consta de algunas conexiones eléctricas para controlar algunos patrones como, por ejemplo: abrir o cerrar las electroválvulas, purgar el sistema, recolectar agua, entre otras.



Figura 2-3: Conexiones y ajustes del prototipo "water recovery tank"

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

3.3. Pre-Experimentos

3.3.1. Curva característica del electrolizador.

En este pre-experimento se analiza las características eléctricas que posee el electrolizador

Variables

- **Variable independiente:** Tensión del canal A en voltios (V)
- **Variable dependiente:** Corriente del canal B en amperios (A)

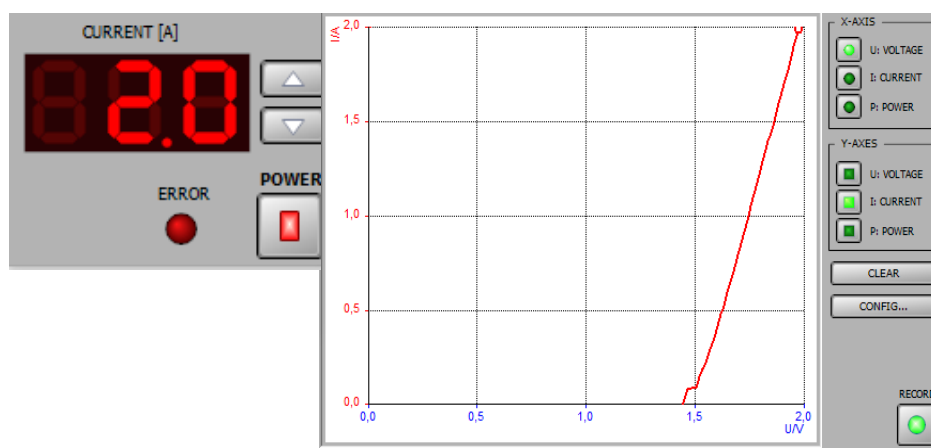


Gráfico 1-3: Resultados del experimento energía de electrolización vs. Voltaje

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

3.3.2. Primera ley de Faraday: Medición del volumen de H_2 en función del tiempo de electrolización

En este caso se analiza la primera ley de Faraday, para ello se estudia como el tiempo de electrolización afectan a la cantidad de H_2 generado.

Variables

- **Variable independiente:** Tiempo de electrolización en minutos (min)
- **Variable dependiente:** Volumen de H_2 generado en mililitros (ml)
- **Constante:** Energía de electrolización 1 A

Tabla 1-3: Medición del volumen de H_2 en función del tiempo.

t (s)	60	90	120	150	180	210	240
V (ml)	9	14	18	24	28	34	38

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

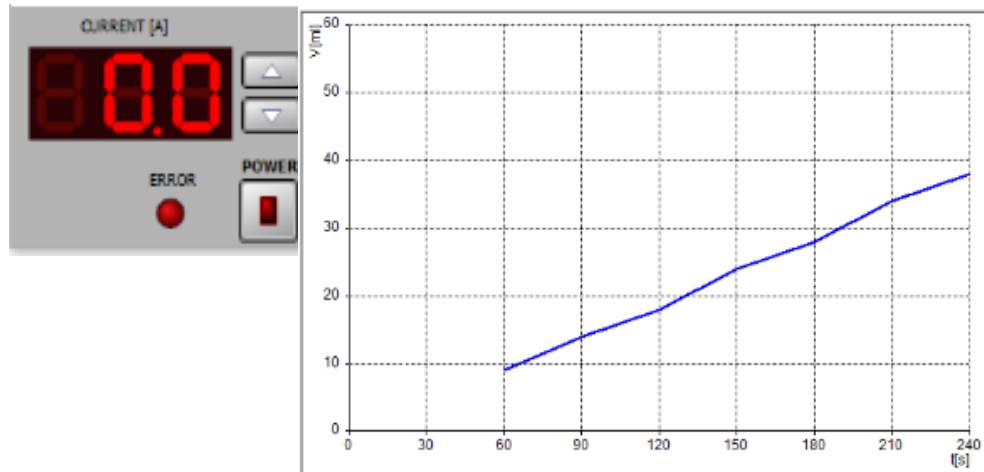


Gráfico 2-3: Resultados del experimento voltaje vs. Tiempo

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

Al variar el tiempo con una energía de electrólisis de 1,0 A constante, se observó que la producción de H₂ aumenta a medida que aumenta el tiempo.

3.3.3. Primera ley de Faraday: Medición del volumen de H₂ en función de la energía de electrólisis

En este caso se analiza la primera ley de Faraday, para ello se estudia como la energía de electrólisis afectan a la cantidad de H₂ generado.

Variables

- **Variable independiente:** Energía de electrólisis
- **Variable dependiente:** Volumen de H₂ generado en mililitros (ml)
- **Constante:** Tiempo 3 min

Tabla 2-3: Medición del volumen de H₂ en función de la corriente del electrolizador.

I (A)	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
V (ml)	10	20	30	48	60

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

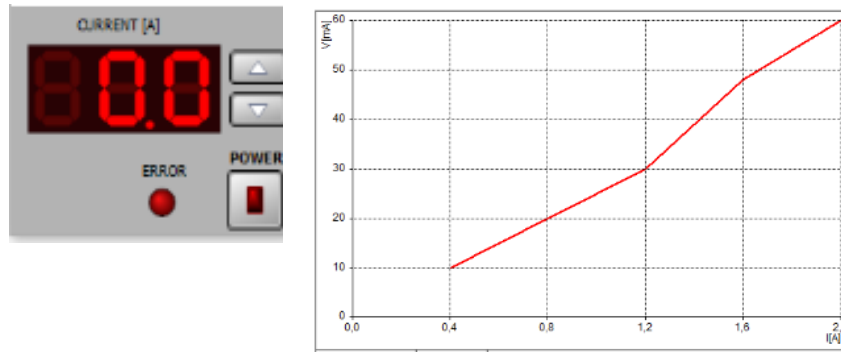


Gráfico 3-3: Resultados del experimento voltaje vs. Energía de electrolización

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

Al variar la energía de electrolización, y con un tiempo constante de tres minutos, se observó que, a mayor energía de electrolización, mayor volumen de H_2 producido, al aplicar la línea de tendencia.

3.3.4. Medición de volumen de H_2

El objetivo de este pre- experimento es medir el volumen de H_2 generado con una variación de corriente de electrolización a un tiempo constante de tres minutos, con las mangueras de las pilas cerradas.

Variables

- **Variable independiente:** Energía de electrolización en amperios (A)
- **Variable dependiente:** Volumen de H_2 generado en mililitros (ml)
- **Constante:** Tiempo (minutos)

Tabla 3-3: Medición del volumen de H_2 en función de la corriente de electrolización

I (A)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	V ₃ (ml)	\bar{V} (ml)	σ^2
0	0	0	0	0,00	0,00
0,2	6	6	4	5,33	0,94
0,4	10	10	8	9,33	0,94
0,6	14	16	16	15,33	0,94
0,8	22	20	22	21,33	0,94
1,0	30	28	28	28,67	0,94
1,2	36	36	36	36,00	0,00
1,4	42	40	40	40,67	0,94
1,6	50	46	46	45,67	0,47
1,8	56	54	52	52,67	0,94
2,0	60	60	58	59,33	0,94

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

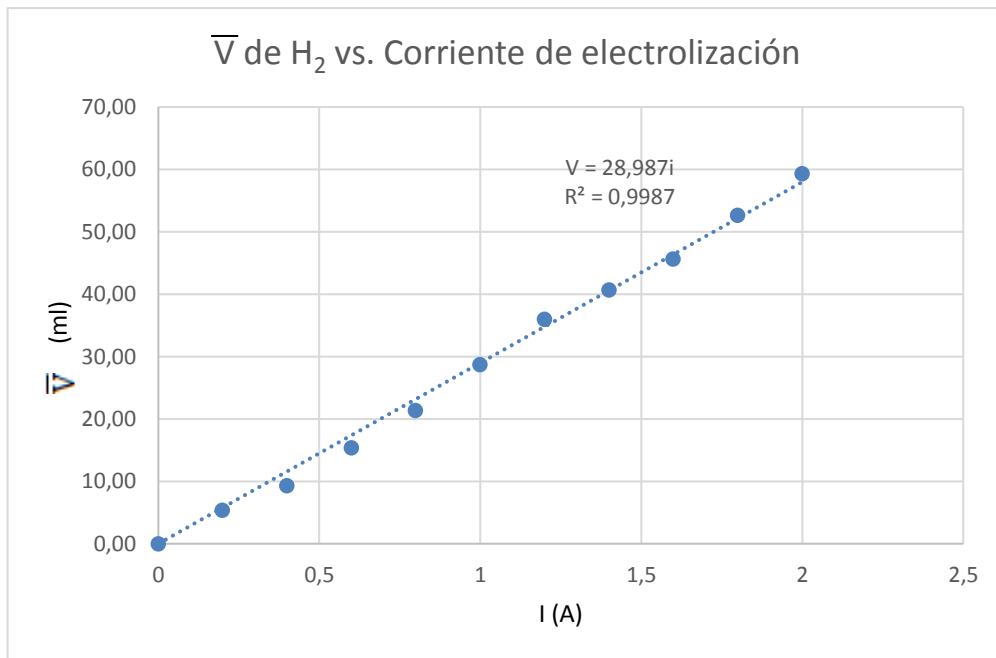


Gráfico 4-3: Resultados del experimento \bar{V} de H_2 vs. Corriente de electrólización

Realizado por: Miranda, Sonia, Quishpi, Noemi, 2021.

La gráfica 4-3 muestra que el volumen generado por el electrólizador varía en proporción directa con la corriente de electrólización, de acuerdo con la ecuación (1):

$$\bar{V} = 28.9i \quad (1)$$

3.3.5. Medición de volumen de H_2 y O_2

Con este experimento se dese medir el volumen de H_2 y O_2 generado o consumido, a una energía de electrólización constante de 1.5 A, con una variación de tiempo y mangueras abiertas.

Variables

- **Variable independiente:** Tiempo (minutos)
- **Variable dependiente:** Volumen de H_2 y O_2 generado en mililitros (ml)
- **Constante:** Energía de electrólización en amperios (A)

Tabla 4-3: Medición del volumen de vapor de agua en función del tiempo

t (minutos)	V ₁ O ₂ (ml)	V ₂ O ₂ (ml)	V ₁ H ₂ (ml)	V ₂ H ₂ (ml)
0	0	0	0	0
5	0	-2	0	2
10	0	-2	0	2
15	-0,5	-2,5	0	2
20	-2	-2,5	1	2

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

Primera repetición

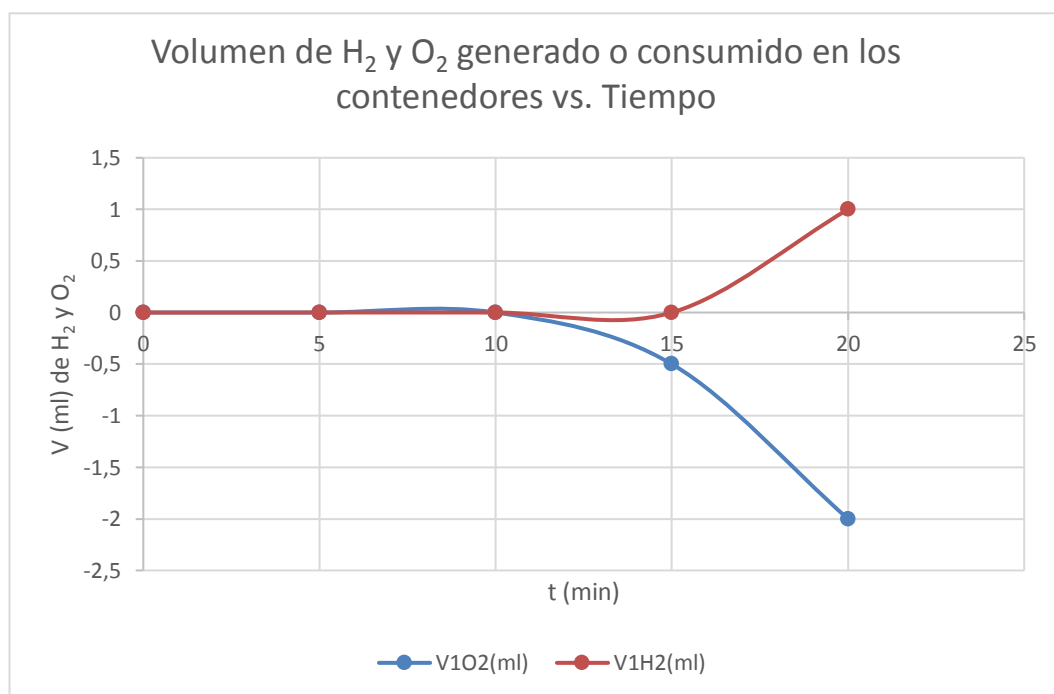


Gráfico 5-3: Resultados del experimento volumen de H₂ y O₂ generado o consumido a diferentes tiempos

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

Segunda repetición

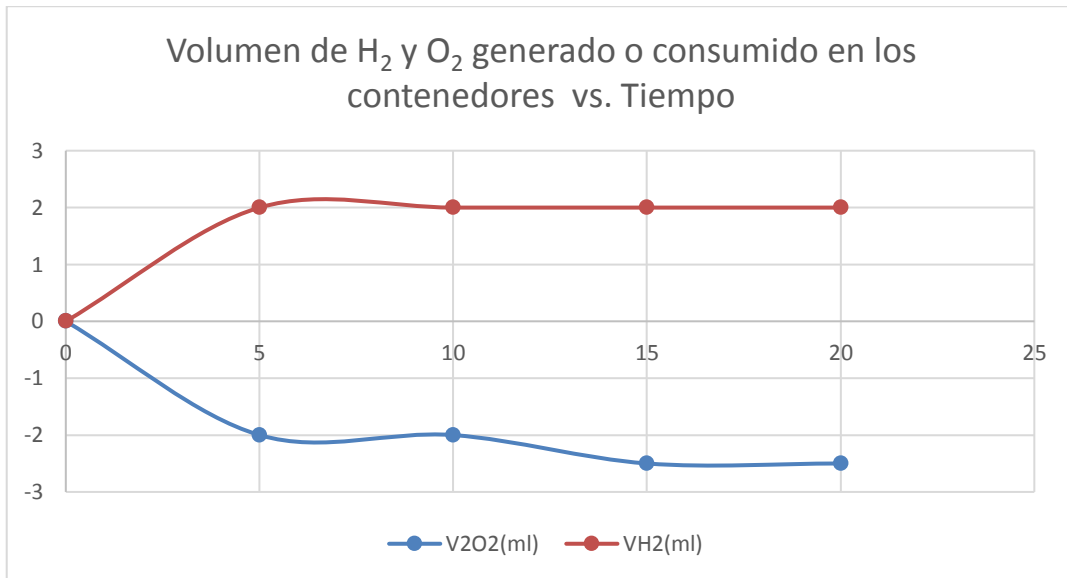


Gráfico 6-3: Resultados del experimento Volumen de H₂ y O₂ generado o consumido a diferentes tiempos

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

Las gráficas 5-3 y 6-3 muestran que, al variar el tiempo con una energía de electrolización de 1,5 constante, el O₂ disminuía lentamente, mientras el H₂ aumenta.

El aire al ser una mezcla homogénea de gases se compone de: N₂ 780,900 ppm, O₂ 209,400 ppm e H₂ 0,5 ppm (Pinos, Rosa; Silva, 2009). Por esta razón al existir una mayor cantidad de O₂ en el aire, este O₂ ingresa por el agujero del depósito de H₂, se recombinan entre sí y se lleva a cabo una reacción vigorosa que forma H₂O (Brown *et al.*, 2009). Por otro lado, el O₂ al no contar con la cantidad necesaria de H₂ en el aire, se queda en estado gaseoso y se disipa en el ambiente, de esta forma el O₂ disminuye mientras que en el contenedor del H₂ aumenta la cantidad de agua.

3.3.6. Medición de tiempo de Purga

En este experimento se debe realizar una conexión en paralelo, con una resistencia variada de 1 A y una corriente de electrolización de 1,1 a 1 A, a la vez que generamos, consumimos el hidrógeno con las mangueras cerradas.

Variables

- **Variable independiente:** Purga
- **Variable dependiente:** Tiempo de purga en el cual el sistema llega a alcanzar el punto de potencia máxima.
- **Constante:** Resistencia variable de 1 A

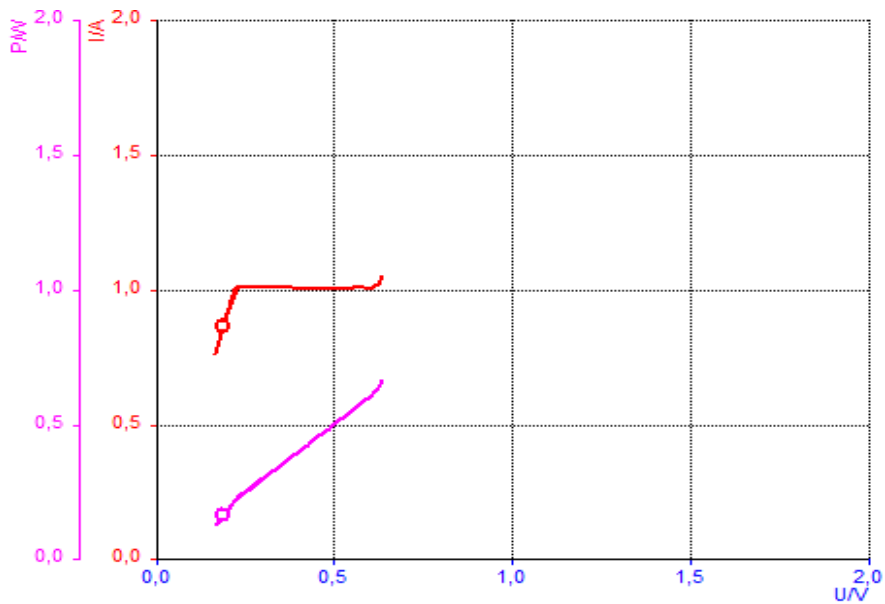


Gráfico 7-3: Tiempo en el que cae la corriente que pasa por la resistencia variable

Fuente: (LUCAS-NÜLLE GmbH, 2010).

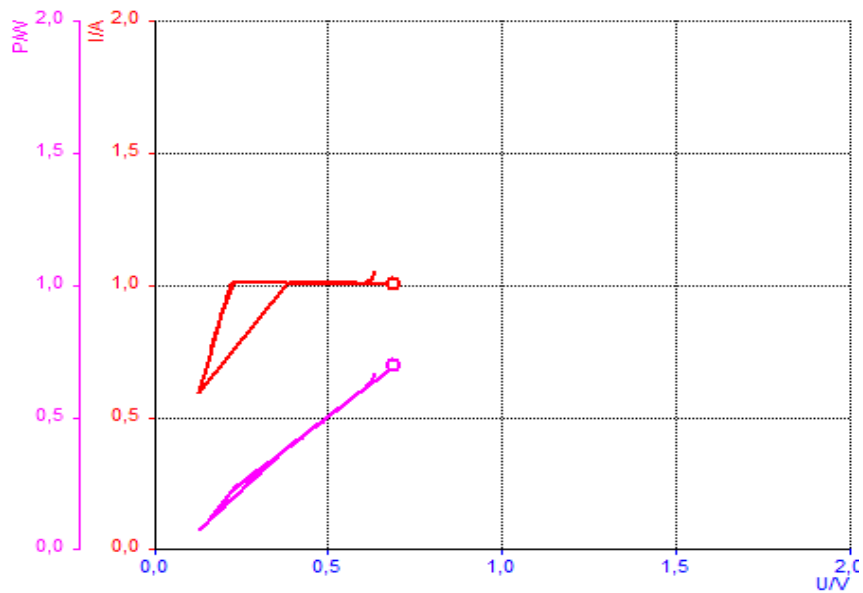


Gráfico 8-3: Resultados del experimento Medición de tiempo de Purga

Fuente: (LUCAS-NÜLLE GmbH, 2010).

La gráfica 7-3 muestra que, a medida que la potencia disminuye, la corriente que pasa por la resistencia variada también desciende hasta un valor aproximado de 0,6 A, esto sucede a los 30 min de haber iniciado el experimento. La gráfica 8-3 muestra que se necesitó una purga de 3 segundos para alcanzar el punto de potencia máxima (punto inicial).

Tabla 5-3: Medición del voltaje en función del tiempo

t (min)	Voltaje (V)
0,42	0,69
1,3	0,67
1,55	0,66
1,7	0,65
4,9	0,64
6,66	0,63
7,66	0,62
10,016	0,61
10,95	0,6
12,51	0,59
14,16	0,58
15,8	0,57
17,13	0,56
18,65	0,55
20,41	0,54
21,83	0,53
23	0,52
24,16	0,51
24,66	0,5
25,05	0,49
26,03	0,48
26,78	0,47
27,05	0,46
28,18	0,45
28,38	0,44
28,86	0,43
29,55	0,42
29,88	0,41
30	0,4
30,35	0,39
30,75	0,38
30,88	0,37
32,86	0,26
33,06	0,24
33,28	0,22

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

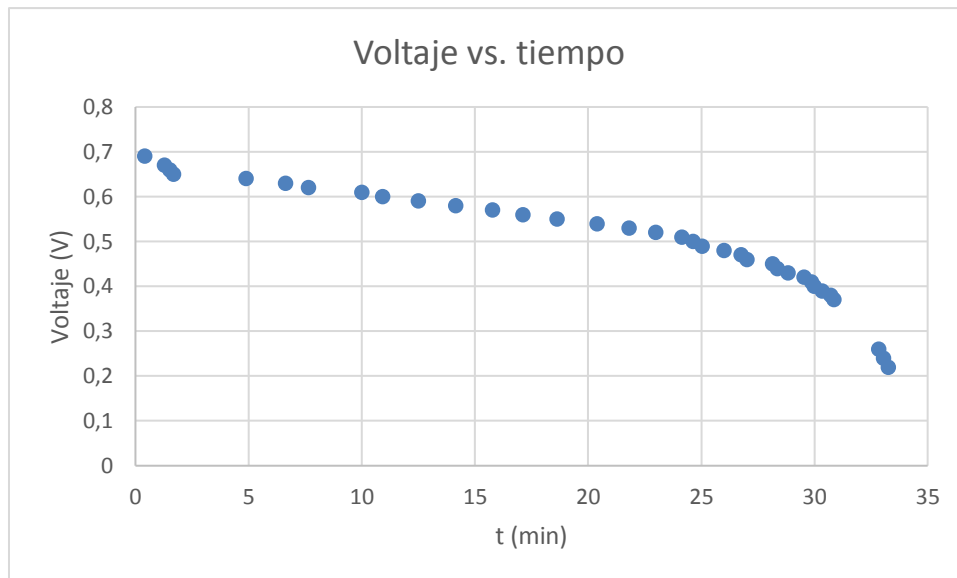


Gráfico 9-3: Resultados del experimento voltaje vs. Tiempo

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

La gráfica 9-3 muestra que el voltaje desciende a medida que transcurre el tiempo, manteniendo una relación directamente proporcional.

3.4. Experimentos

3.4.1. Tasa de fuga de hidrógeno con el prototipo "water recovery tank"

El hidrógeno es un gas conformado por moléculas muy pequeñas, por lo tanto, los contenedores de almacenamiento pierden constantemente pequeñas cantidades de hidrógeno, a esta pérdida se la conoce como tasa de fuga.

Tabla 6-3: Medición de la tasa de fuga en función del tiempo

t (min)	Volumen H ₂ (ml)
5	5
10	10
15	15
20	20

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

Al transcurrir 5 minutos el nivel del depósito de H₂ ha disminuido 5 ml. Esto quiere decir que la tasa de fuga del sistema es aproximadamente 1ml/min. Este valor es equivalente a la tasa de fuga del sistema cuando no está acoplado al prototipo "water recovery tank".

3.4.2. Comprobar el funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno alimentada con energía renovable

En este experimento se comprueba el funcionamiento de un vehículo a escala con un motor que funciona gracias a una pila de combustible de hidrógeno, además cuenta con un panel solar con un voltaje máximo de 2,3 V que sustituye el uso de la batería.

Variables

- **Variable independiente:** El tiempo de carga del panel solar y la radiación
- **Variable dependiente:** Tiempo de funcionamiento del vehículo



Figura 3-3: Pruebas para un automóvil con panel solar

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

3.4.3. Prototipo "water recovery tank"

Variables

- **Variable independiente:** La velocidad del proceso electroquímico en las pilas de H₂.
- **Variable dependiente:** La cantidad de agua recuperada.



Figura 4-3: Prototipo "water recovery tank"

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

Tabla 7-3: Medición del volumen de agua recuperada en función de la velocidad del proceso electroquímico en las pilas de H₂.

B: Tiempo de purga				
A: Corriente		10	25	Total Y _{i.}
1		0	3	9
		0	3	
		0	3	
1,5		4	3	21
		4	3	
		3	4	
Total Y_{j.}		11	19	Y... = 30

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

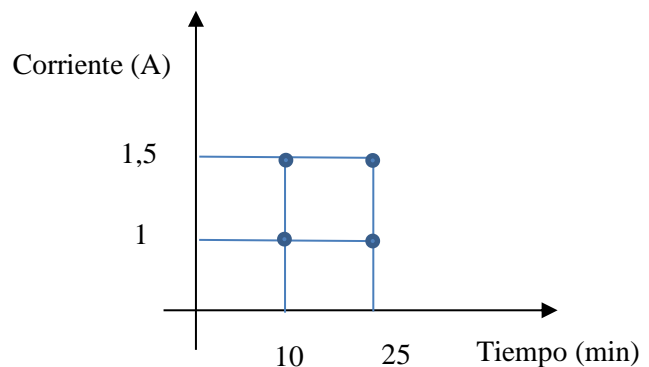
$n = 3$

$a = 2$

$b = 2$

Variables contantes

Tiempo experimento: 30 min



$$\begin{aligned}
SC_A &= \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bn} - \frac{Y^2}{N} = \sum_{i=1}^2 \frac{(9^2 + 21^2)}{2x3} - \frac{(30)^2}{2x2x3} = 12 \\
SC_B &= \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - \frac{Y^2}{N} = \sum_{j=1}^2 \frac{(11^2 + 19^2)}{2x3} - \frac{(30)^2}{2x2x3} = 5,33 \\
SC_{AB} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{Y^2}{N} - SC_A - SC_B \\
SC_{AB} &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{(0^2 + 11^2 + 9^2 + 10^2)}{3} - \frac{(30)^2}{2x2x3} - 12 - 5,33 = 8,336 \\
SC_T &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{Y^2}{N} \\
SC_T &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^3 102 - \frac{(30)^2}{2x2x3} = 27 \\
SC_E &= SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB} \\
SC_E &= 27 - 12 - 5,33 - 8,336 \\
SC_E &= 1,334
\end{aligned}$$

3.4.3.1. ANOVA del diseño factorial a x b para el prototipo "water recovery tank"

Tabla 8-3: ANOVA para el diseño factorial a x b

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	F	Valor P	F _{crítico}
A: Corriente	12	1	12	72	0,000029	5,317
B: Tiempo de purga	5,33	1	5,33	32	0,000477614	5,317
AB	8,33	1	8,33	50	0,000104953	5,317
Error	1,33	8	0,16			
Total	27	11				

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

- Análisis**

Debido a que el valor p se encuentra en la zona de aceptación y es menor al nivel de significancia 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa razón por la cual se comprobó que la corriente afecta significativamente al funcionamiento del prototipo "water recovery tank". El tiempo de purga afecta significativamente al funcionamiento del prototipo "water recovery tank" debido a que el valor p se encuentra en la zona de rechazo es decir es menor al nivel de significancia 0,05 por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Ya que valor p se encuentra en la zona de rechazo y es menor al nivel de significancia 0,05 se

rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa razón por la cual se comprobó que tanto el tiempo de purga como la corriente afectan significativamente al funcionamiento del prototipo "water recovery tank".

3.4.4. Vehículo de hidrógeno y energía renovable

Variables

- **Variable independiente:** El tiempo de carga del panel solar (5 min– 15 min) y la radiación (baja (tarde o temprano en la mañana) – alta (medio día))
- **Variable dependiente:** Tiempo de funcionamiento del vehículo



Figura 5-3: Experimentación vehículo de hidrógeno y energía renovable

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

Tabla 9-3: Medición del tiempo de funcionamiento del vehículo de H₂ en función del tiempo de carga del panel solar y la radiación.

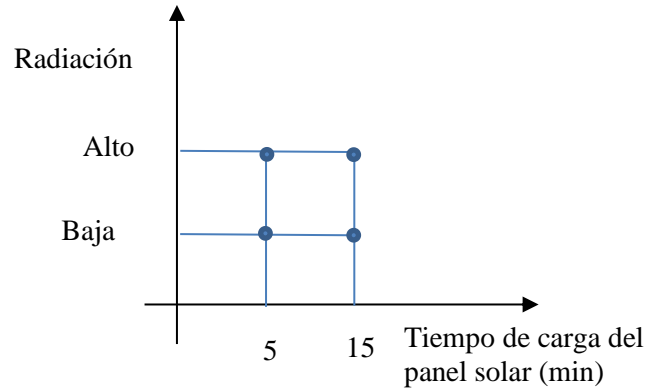
B: Radiación				
A: Tiempo de carga del panel solar		Baja	Alto	Total Y_{i.}
	5	10,66 10,74 10,33	31,73	56,10 53,48 58,74
15	41,12 39,15 40,65	120,92	179,45 140,10 167,55	487,1
Total Y_{j.}		152,65	655,42	Y... = 808,07

Realizado por: Miranda, Sonnia; Quishpi, Noemi, 2021.

$$n = 3$$

$$a = 2$$

$$b = 2$$



$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bn} - \frac{Y_{...}^2}{N} = \sum_{i=1}^2 \frac{(200^2 + 608,02^2)}{2 \times 3} - \frac{(808,07)^2}{2 \times 2 \times 3} = 13866,626$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - \frac{Y_{...}^2}{N} = \sum_{j=1}^2 \frac{(152,65^2 + 655,42^2)}{2 \times 3} - \frac{(808,07)^2}{2 \times 2 \times 3} = 21064,806$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{(31,73^2 + 120,92^2 + 168,32^2 + 487,1^2)}{3} - \frac{(808,07)^2}{2 \times 2 \times 3} - 13866,626 - 21064,806 = 4395,964$$

$$SC_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$SC_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^3 94572,714 - \frac{(808,07)^2}{2 \times 2 \times 3} = 40157,954$$

$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB}$$

$$SC_E = 40157,954 - 13866,626 - 21063,279 - 4395,964$$

$$SC_E = 832,085$$

3.4.4.1. ANOVA del diseño factorial a x b para el Vehículo de hidrógeno y energía renovable

Tabla 10-3: ANOVA para el diseño factorial a x b

Fuente de Variación	SC	GL	CM	F	Valor P	F _{crítico}
A: Tiempo de carga del panel solar	13869,96	1	13869,96	133,59	0,0000029	5,31
B: Radiación	21064,81	1	21064,81	202,89	0,00000057	5,31
AB	4395,631	1	4392,63	42,31	0,000187	5,31
Error	830,55	8	103,81			
Total	40157,95	11				

Realizado por: Miranda, Sonia; Quishpi, Noemi, 2021.

- **Análisis**

La radiación afecta significativamente al funcionamiento del vehículo de hidrógeno y energía renovable debido a que el valor p se encuentra en la zona de rechazo es decir es menor al nivel de significancia 0,05 por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Debido a que el valor p es menor al nivel de significancia 0,05 se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula razón por la cual se comprobó que el tiempo de carga del panel solar afecta significativamente al funcionamiento del vehículo de hidrógeno y energía renovable.

Ya que valor p se encuentra en la zona de rechazo y es menor al nivel de significancia 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa razón por la cual se comprobó que tanto la radiación como el tiempo de carga del panel solar afectan significativamente al funcionamiento del vehículo de hidrógeno y energía renovable.

CONCLUSIONES

- Se logró desarrollar un sistema de recuperación de agua del proceso electroquímico en la producción de hidrógeno verde; se recuperó 30 gotas de agua en total (1,5 ml) en un cuentagotas estándar, en un tiempo acumulado de dos horas con una eficiencia del 70%. Al aplicar el diseño factorial a x b, donde la corriente en amperios es el factor A y el tiempo de purga en minutos es el factor B, se encontró que el mejor tratamiento es el tres (1,5 A y 10 minutos) del cual se recuperó un promedio de 3,66 gotas.
- Con el estudio del estado del arte de las pilas de combustible, se determinó las ventajas y desventajas, su principio de funcionamiento concluyendo que todas poseen una solución electrolítica de manejo controlado y un catalizador para la generación eléctrica distribuida y calor. La pila de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM) permite la obtención directa de electricidad en donde el combustible es el H₂. Las PEM presentan varias ventajas que son: baja temperatura de funcionamiento 60-80 °C, respuesta rápida, alta eficiencia, alta densidad de potencia 5-250 kW, no producen contaminación entre otras; además, el agua producida tiene suficiente pureza para ser utilizada como agua potable.
- En base a una revisión bibliográfica se llegó a tres propuestas basadas en un atrapanieblas circular, posteriormente se optó por la propuesta "A", un cuerpo similar a un cono con tres mallas ubicadas en el centro en posición horizontal. El prototipo "water recovery tank" fue impreso con la ayuda de una impresora 3D en un material o filamento de ácido poli láctico con sus siglas "PLA", este material es fabricado a base de algunos recursos renovables como es el almidón de maíz, raíces de tapioca o caña de azúcar por lo tanto es amigable con el medio ambiente.
- Se seleccionó un vehículo a escala que funciona a base de pilas de combustible de hidrógeno, la ventaja de esta versión es que la pila de combustible es reversible por lo que la producción de H₂ se lleva a cabo en el propio vehículo. Al aplicar el diseño factorial 2², donde el tiempo de carga del panel solar es el factor A, y la radiación es el factor B, se observó que incluso en días nublados el panel solar tenía la capacidad de generar la suficiente energía para poner en funcionamiento al vehículo. Con este tratamiento se demuestra que se puede integrar los dos tipos de energía: la energía renovable (solar) y la energía del H₂ proveniente de la electrólisis del agua.

RECOMENDACIONES

- Se debe analizar el pH del agua utilizada en la pila de combustible de H₂ cada dos semanas, debido a que toda agua resultante del proceso de la electrólisis puede disolver al CO₂ existente en el aire, y convertirlo en ácido carbónico (H₂CO₃), al utilizar agua con un pH ácido, se puede corroer la superficie de la pila.
- Utilizar electroválvulas para hidrógeno, con el objetivo de evitar fugas del gas durante el proceso, para evitar que el H₂ y O₂ gaseosos se fuguen del sistema ya que pueden recombinarse con el aire y esto provoca que los niveles de agua de los contenedores aumenten o disminuyan.
- En el caso del vehículo a escala que funciona gracias a una pila de combustible de hidrógeno y un panel solar es recomendable que la membrana polimérica interna de la pila de combustible siempre permanezca hidratada hasta la mitad de su capacidad.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ, C.**, 2020. Atrapanieblas como infraestructura configuradora de barrios. [en línea], Disponible en:
http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/15678/Sánchez_CJA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- AMALIA**, 2014. PEM fuel cell. *Wikimedia Commons* [en línea]. Disponible en:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PEM_fuel_cell_diagram.jpg.
- APOSTOLOU, D.**, 2020. Assessing the operation and different refuelling cost scenarios of a fuel cell electric bicycle under low-pressure hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], vol. 45, no. 43, pp. 23587-23602. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2020.06.071. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.071>.
- ARANGUIZ, G., MORALES, F., NIETO, J. y SILVA, G.**, 2009. Diseño generativo aplicación en sistemas de atrapanieblas en el norte de Chile. *Facultad de Arquitectura y Urbanismo*, pp. 125.
- ASENSIO, P., RODRIGUEZ, L.A.C. y SÁNCHEZ, M.E.G.**, 2011. Hidrógeno y pila de combustible. *Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid*, pp. 16.
- ASENSIO, P., RODRIGUEZ, L.A.C., SÁNCHEZ, M.E.G. y UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE - ARGENTINA**, 2011. Hidrógeno y pila de combustible. *Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid* [en línea], pp. 16. Disponible en:
http://ing.unne.edu.ar/pub/celdas%7B_%7Dhidrogeno.pdf%5Cnwww.todomecanica.com.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE PILAS DE COMBUSTIBLE**, [sin fecha]. Pilas de combustible de óxidos sólidos. *APPICE* [en línea]. Disponible en: <https://appice.es/pilas-de-combustible-de-oxidos-solidos/>.
- BARBIR, F.**, 2013a. Future of Fuel Cells and Hydrogen. , pp. 469-508.
- BARBIR, F.**, 2013b. PEM Fuel Cells - Theory and Practice. , no. Dc, pp. 1-16.

- BARBIR, F.**, 2013c. PEM Fuel Cells - Theory and Practice. [en línea], no. Dc, pp. 1-16.
Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPEMFCTP3/pem-fuel-cells-theory/pem-fuel-cells-theory>.
- BROWN, T., LEMAY, E., BURSTEN, B. y MURPHY, C.**, 2009. *QUÍMICA LA CIENCIA CENTRAL*. S.l.: s.f.
- CAICEDO, J.D.P.**, 2006. El clima de Colombia durante los siglos XVI-XIX a partir de material histórico. Parte I: inventario de fuentes de información. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* [en línea], vol. 0, no. 15, pp. 75-92. [Consulta: 30 noviembre 2020]. ISSN 0121-215X. Disponible en:
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/1288>.
- CARLOS, J. y CONTRERAS, M.**, 2019. *Cambio climático y su impacto en el territorio*. S.l.: s.f. ISBN 9786076064412.
- CERECEDA, P., HERNÁNDEZ, P., LEIVA, J. y DIOS, J. De**, 2014. Editores : Agua de Niebla. *Dirección general de aguas*,
- CESAR, N.**, 2010. Electricidad producida por fuentes renovables. *Scribd* [en línea]. Disponible en: <https://www.unionfenosagas.com/es/Newsletter/NoticiaNewsletter/gas-renovable-hidrogeno-verde?p=ENERO2020#:~:text=El hidrógeno renovable%2C también conocido,electricidad producida por fuentes renovables>.
- COROMINAS, J.**, 2001. Pilas de combustible. *Alambique: Didáctica de las ciencias experimentales*, vol. 102, no. 27, pp. 115-118. ISSN 1133-9837.
- CORREA, MAX A; BARRÍA, CARLOS Q; MALUENDA, B.P.**, 2020. Hidrógeno Verde. *Energía* [en línea]. Disponible en:
https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf.
- EDUCATIONAL, H.**, [sin fecha]. RENEWABLE ENERGY SCIENCE KIT. [en línea],
Disponible en:
https://www.tiendafotovoltaica.es/WebRoot/StoreES/Shops/61359426/MediaGallery/Nueva_carpetas6/FCJJ_23_datashet_2014_05_11_EN.pdf.

ELECTROLYSIS, 2015. Electrólisis del Agua. *Wikimedia Commons* [en línea]. Disponible en:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrolysis.svg>.

ENEL, [sin fecha]. Energía Eólica y su funcionamiento. *Enel* [en línea]. Disponible en:
<https://www.enel.pe/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-eolica-y-como-funciona.html>.

ENER CITY, [sin fecha]. Beneficios Económicos Y Tributarios De La Energía Solar En Ecuador. *Enercitysa* [en línea]. Disponible en: <https://enercitysa.com/blog/beneficios-economicos-y-tributarios-de-la-energia-solar-en-ecuador/>.

ENERGÍA SOLAR, 2020. Energía Solar. *Twenergy* [en línea]. Disponible en:
<https://twenergy.com/energia/energia-solar/>.

ENTE PROVINCIAL REGULADOR DE LA ENERGÍA, 2015. Funcionamiento de las pilas de combustible a escala molecular. *Epre* [en línea]. Disponible en:
<https://epre.gov.ar/web/pilas-de-combustible/>.

FUEL CELLS BULLETIN, 2020. ZeroAvia completes first hydrogen-electric passenger plane flight. *Fuel Cells Bulletin*, vol. 2020, no. 10, pp. 6. ISSN 14642859. DOI 10.1016/s1464-2859(20)30444-2.

FUELCELL, 2004. Pilas de Combustible. *Wikimedia Commons* [en línea]. Disponible en:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fuelcell.en.JPG>.

FUENTE, V. La, SANTOS, M.D.L. y SANTANDER, D. De, 2017. Propuesta De Un Sistema De “ Atrapa - Nieblas ”, Como Fuente De Agua No Convencional En La. , no. July, pp. 19-21.

GARCÍA GÓMEZ, K., JOSÉ RINCÓN BERNAL, C. y DARÍO BANGUERO ESCOBAR, R., 2019. Producción limpia y sustentable: un análisis a las fuentes de energía renovable
Clean and sustainable production: An analysis to the renewable energy sources.
Repositorio Institucional USC [en línea]. S.l.: Universidad Santiago de Cali. [Consulta: 30 noviembre 2020]. Disponible en: <https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/1216>.

GÓMEZ, A. y QUINTEROS, J., 2020. Universidad Central del Ecuador Universidad Central del Ecuador. , no. Figura 1, pp. 2-3.

- GONZALES-LONGATT, F.**, 2016. Celdas de Combustible - Sistemas de Generacion Distribuida. *Slideshare* [en línea]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/fglongatt/capitulo-24-celdas-de-combustible-sistemas-de-generacion-distribuida>.
- GUTIÉRREZ PULIDO, H. y DE LA VARA SALAZAR, R.**, 2008. *Diseño de experimentos con mezclas*. S.l.: s.f. ISBN 9789701065266.
- H-RACER**, [sin fecha]. **H-RACER H-RACER**. [en línea], pp. 2-3. Disponible en: https://www.tiendafotovoltaica.es/WebRoot/StoreES/Shops/61359426/MediaGallery/Nueva_carpeta6/FCJJ_23_datashet_2014_05_11_EN.pdf.
- HAAS, O. y CAIRNS, E.J.**, 1999. Electrochemical energy storage. *Annual Reports on the Progress of Chemistry - Section C*, vol. 95, no. 46, pp. 163-197. ISSN 02601826. DOI 10.1039/pc095163.
- HIDALGO, I.**, 2013. Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC). *Slideshare* [en línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/InmaHidalgoGarca/mcfc>.
- HORIZON FUEL CELL TECHNOLOGIES**, [sin fecha]. FUEL CELL CAR SCIENCE KIT Battery operation instructions : , pp. 0-1.
- IGNACIO, J., ARMIJO, V., BIANCHI SOUTER, E. y DÍAZ, L.V.**, 2018. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DEMOSTRATIVA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO. . S.l.: Universidad de Chile.
- INGENIEROS**, 2014. Pilas de combustible con óxido sólido, una alternativa en estudio. *Ingenieros* [en línea]. Disponible en: <https://www.ingenieros.es/noticias/ver/pilas-de-combustible-con-oxido-solido-una-alternativa-en-estudio/4810>.
- IRENA**, 2020. *POST-COVID* [en línea]. S.l.: s.f. ISBN 9789292602451. Disponible en: file:///C:/Users/Erover7 PC/Downloads/IRENA_Post-COVID_Recovery_2020.pdf.
- JAHNKE, F.C. y DALY, J.M.**, 2014. (12) United States Patent. , vol. 2, no. 12.
- LI, W., LONG, R., CHEN, H., CHEN, F., ZHENG, X., HE, Z. y ZHANG, L.**, 2020.

Willingness to pay for hydrogen fuel cell electric vehicles in China: A choice experiment analysis. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea], no. xxxx, pp. 1-8. ISSN 03603199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2020.01.046. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.046>.

LUCAS-NÜLLE GMBH, 2010. *Sistemas de capacitación en energías renovables*. 2010. S.l.: s.f.

LUCAS Y NÜLLE GMBH CURSO UNITRAIN «ENERGÍAS RENOVABLES: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS», 2010. *Energías renovables: Sistemas fotovoltaicos*. .

MIRANDA, P.E.V.; CARREIRA, E., 2010. Brazilian Hybrid Electric Fuel Cell Bus. *Energy*, vol. 2, no. 6, pp. 1-5.

MIRANDA, E.P., 2018. *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*. S.l.: s.f. ISBN 978-0-12-814251-6.

MORATILLA, B. y LINARES, J., [sin fecha]. *El hidrógeno y la energía*. S.l.: s.f. ISBN 9788493277291.

NACIONES UNIDAS, 2015. La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. .

NET INTERLAB S.A, [sin fecha]. : ¿Qué es la electrólisis del agua y cómo se produce? | NET INTERLAB. .

NEWSLETTER UFG, 2020. *Energía Renovable*. *Unionfenosagas* [en línea]. Disponible en: <https://www.unionfenosagas.com/es/Newsletter/NoticiaNewsletter/gas-renovable-hidrogeno-verde?p=ENERO2020#:~:text=El hidrógeno renovable%2C también conocido,electricidad producida por fuentes renovables>.

O' HAYRE, R.P., CHA, S.-W. y COLELLA, W.G., 2016. *Fuel Cell Principles*. [en línea], Disponible en: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpFCFE0004/viewerType:toc/root_slug:fuel-cell-fundamentals?kpromoter=federation.

ORERA, V.M., 2007. *Hidrógeno y Pilas de combustible Hidrógeno y Pilas de Combustible*. ,

PASCUAL, J.A., NARANJO, M.F., PAYANO, R. y MEDRANO, O., 2016. TECNOLOGÍA PARA LA RECOLECCIÓN DE AGUA DE NIEBLA Juan. , vol. 4, no. 1, pp. 64-75.

PENG, L. y WEI, Z., 2020. Catalyst Engineering for Electrochemical Energy Conversion from Water to Water : Water Electrolysis and the Hydrogen Fuel Cell. *Engineering* [en línea], vol. 6, no. 6, pp. 653-679. ISSN 2095-8099. DOI 10.1016/j.eng.2019.07.028. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.028>.

PENNACCHIOTTI MONTI, I., 2010. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. *Anales de la Universidad de Chile*, vol. 0, no. 12, pp. 1-80. ISSN 0365-7779. DOI 10.5354/0365-7779.2000.2522.

PEREZ COTRINA, D., 2017. Facultad de Ingeniería Facultad de Ingeniería. *Ucv*, pp. 358.

PICHONAT, T., 2009. Cells as Promising Power Electronics. *Micro Fuel Cells*, pp. 51-97.

PINOS, ROSA; SILVA, J., 2009. *Química Ambiental*. 2009. S.l.: s.f.

POSTIGO, J.C., CHACÓN, P., GEARY, M., MARÍA, G.B., FUENZALIDA, I., DE LA CUADRA, F., LAMPIS, A., MALVARES MIGUEZ, M., PALACIO, G., TORRES, J. y CASTRO, S., 2013. Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas: una vinculación necesaria. [en línea]. S.l.: [Consulta: 30 noviembre 2020]. Disponible en: <http://www.humanas.unal.edu.co/home/facultad/>.

REPÚBLICA DEL ECUADOR, 2017. Toda una Vida 1. , pp. 1-148.

RING, D., 2007. Pila de combustible alcalina. *Wikimedia Commons* [en línea]. Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alkalinecell.svg>.

ROYCHOUDHURY, S. y MASTANDUNO, R., 2011. Balance of Plant. , pp. 517-526. DOI 10.1016/B978-0-444-53563-4.10015-X.

RUIZ, A., 2020. La pila de combustible y sus tipos. *Tecpa* [en línea]. Disponible en: <https://www.tecpa.es/pila-combustible/>.

SÁNCHEZ, J., 2012. Electrólisis del Agua. *Física y Química* [en línea]. Disponible en:

<http://elfisicoloco.blogspot.com/2013/04/electrolisis-del-agua.html>.

SÁNCHEZ, J.A., 2018. Atrapanieblas tecnología para el atrapamiento de agua, una experiencia exitosa para las políticas públicas en el distrito de Villa María del Triunfo, Lima 2018.

Universidad César Vallejo [en línea], pp. 95. Disponible en:

http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/15678/Sánchez_CJA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

SÁNCHEZ, M., [sin fecha]. Hidrometeoros. [en línea]. Disponible en:

<https://www.meteorologiaenred.com/que-es-un-hidrometeoro-y-cuales-son-los-principales-tipos.html>.

SANTIAGO, O., 2016. Tipos de pilas de combustible y su clasificación | Apilados. [en línea].

[Consulta: 14 diciembre 2020]. Disponible en: <http://apilados.com/blog/tipos-de-pilas-de-combustible-su-clasificacion/>.

TAPIERO, Y., 2011. INGENIERÍA. QUÍMICA, INTERCAMBIO IÓNICO Y

ELECTROQUÍMICA APLICADA.: Ventajas y desventajas de los procesos electroquímicos. .

THAMES & KOSMOS, 2007. Fuel cell X7 hydrogen powered car. *Fuel cell X7 hydrogen powered car*. S.l.: s.f., pp. 17.



UNESCO-WWAP, 2003. Agua para todos, agua para la vida. *United Nations* [en línea], pp. 36.

Disponible en: <http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.pdf>.

WRIGHT, V.P., 2020. World Energy Outlook. , pp. 23-28.

ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS EN LABORATORIO DE REDES INTELIGENTES Y ENERGÍAS RENOVABLES

	
A.1 Pila de combustible de H ₂	A.2 Análisis del pH del agua recuperada

ANEXO B: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE VARIANZA EXPERIMENTO WATER RECOVERY TANK

Experimento Water Recovery Tank en MS Excel			
		Tiempo purga 10	Tiempo purga 25
	Corriente baja	0	3
		0	3
		0	3
	Corriente alta	4	3
		4	3
		3	4

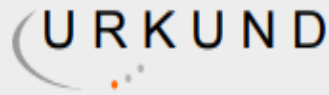
Anova: Two-Factor With Replication						
SUMMARY	Grupo 10	Grupo 25	Total			
<i>Corriente baja</i>						
Count	3	3	6			
Sum	0	9	9			
Average	0	3	1,5			
Variance	0	0	2,7			
<i>Corriente alta</i>						
Count	3	3	6			
Sum	11	10	21			
Average	3,666666667	3,333333333	3,5			
Variance	0,333333333	0,333333333	0,3			
<i>Total</i>						
Count	6	6				
Sum	11	19				
Average	1,833333333	3,166666667				
Variance	4,166666667	0,166666667				
ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	12	1	12	72	2,85111E-05	5,317655
Columns	5,333333333	1	5,333333333	32	0,000477614	5,317655
Interaction	8,333333333	1	8,333333333	50	0,000104954	5,317655
Within	1,333333333	8	0,166666667			
Total	27	11				

ANEXO C: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE VARIANZA EXPERIMENTO VEHÍCULO DE HIDRÓGENO

	Rad baja	Rad alta
Carga 5	10,66	56,1
	10,74	53,48
	10,33	58,74
Carga 15	41,12	179,45
	39,15	140,1
	40,65	167,55

Anova: Two-Factor With Replication			
SUMMARY	Rad baja	Rad alta	Total
<i>Carga 5</i>			
Count	3	3	6
Sum	31,73	168,32	200,05
Average	10,57667	56,10667	33,34167
Variance	0,047233	6,916933	624,6799
<i>Carga 15</i>			
Count	3	3	6
Sum	120,92	487,1	608,02
Average	40,30667	162,3667	101,3367
Variance	1,058633	407,2558	4632,919
<i>Total</i>			
Count	6	6	
Sum	152,65	655,42	
Average	25,44167	109,2367	
Variance	265,6042	3553,025	

ANOVA							
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit	
Sample	13869,96	1	13869,96	133,5967	2,85E-06	5,317655	
Columns	21064,81	1	21064,81	202,898	5,75E-07	5,317655	
Interaction	4392,631	1	4392,631	42,3102	0,000187	5,317655	
Within	830,5573	8	103,8197				
Total	40157,95	11					



Urkund Analysis Result

Analysed Document:	RECUPERACIÓN DE AGUA DEL PROCESO ELECTROQUÍMICO EN LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VE RDE.docx (D103325236)
Submitted:	4/29/2021 9:23:00 PM
Submitted By:	magdy.echeverria@esPOCH.edu.ec
Significance:	3 %

Sources included in the report:

TFMSilvino.pdf (D78936846)
TESIS definitiva - copia.pdf (D48451582)
Tesis sin anexos.docx (D30274540)
tesis completa.docx (D10005443)
Proaño Alison - Pilas de combustible.pdf (D62255206)
<https://twenergy.com/energia/energia-solar/>
<https://www.tecpa.es/pila-combustible/>
<http://apilados.com/blog/tipos-de-pilas-de-combustible-su-clasificacion/>
<https://core.ac.uk/download/pdf/47245094.pdf>
<https://pagina.jccm.es/museociencias/otras%20actividades%20web/material%20cnr%20web/GU%C3%8DA%20DE%20UTILIZACI%C3%93N%20LM3.pdf>
https://nanopdf.com/download/las-pilas-de-combustible-y-la-energia-del-hidrogeno_pdf
<https://core.ac.uk/download/pdf/200323089.pdf>
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/2099.1/7538/2/Anexo+I+-+El+hidrogeno.pdf>
<https://core.ac.uk/download/pdf/61915986.pdf>

Instances where selected sources appear:



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

*DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL*

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 28 / 09 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Sonia Marisol Miranda Sánchez Noemí Tatiana Quishpi Chasiluisa</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Química</i>
Título a optar: <i>Química</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

**LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE**

Firmado digitalmente por
LEONARDO FABIO MEDINA
NUSTE
Fecha: 2021.09.28 16:09:58
-05'00'



**1652-DBRA-UTP-
2021**