

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS DE
AGUA UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR Y EVALUACIÓN
DE SU USO COMO COMBUSTIBLE FUENTE DE ENERGÍA
TÉRMICA**

PRESENTADO POR:

**CHICAS PADILLA, JULIO ABNER
GUZMÁN CRUZ, WILLIAM MANUEL**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2021

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :
MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL :
ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :
PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :
ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA :
ING. SARA ELISABETH ORELLANA BERRÍOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:
INGENIERO QUÍMICO

Título:

**PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS DE
AGUA UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR Y EVALUACIÓN
DE SU USO COMO COMBUSTIBLE FUENTE DE ENERGÍA
TÉRMICA**

Presentado por:

**CHICAS PADILLA, JULIO ABNER
GUZMÁN CRUZ, WILLIAM MANUEL**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. MIGUEL FRANCISCO ARÉVALO MARTÍNEZ

SAN SALVADOR, MARZO DE 2021

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. MIGUEL FRANCISCO ARÉVALO MARTÍNEZ

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios el cual muestra su misericordia y amor brindando vida a través de su hijo y oportunidades, como en este caso la culminación de mi carrera universitaria no solo permitiéndolo si no que respaldando y dando sabiduría a lo largo del trayecto.

A mi familia, mi padre Julio Cesar Chicas por brindarme un apoyo crucial a lo largo de mi vida dando un ejemplo, afecto, amor y sustento junto con mi madre Verónica Padilla quien significo una fuente de ánimo para seguir adelante y no rendirme en todos mis propósitos, mi hermana Verónica Chicas y mis sobrinos Jared y Daniela quienes representan una parte importante de mis esfuerzos y que con mucho cariño están siempre para apoyarme. También agradezco al resto de mi familia que con palabras de aliento siempre me apoyan sobre todo a Carolina Hidalgo mi prima quien fue la que me cuido y enseñó con mucho amor desde que nací hasta que tuve razonamiento propio. Agradezco la vida de mi primo Gabriel Palacios que descansa en la presencia de Dios y con quien empezamos la idea de toda la familia de ser algún día ingenieros.

A mis compañeros de universidad con quienes trabajamos para salir adelante como lo son mi compañero de tesis, mis compañeros de trabajo de organización estudiantil, y mis compañeros amigos de la universidad.

A la ASEIAS y ASEIQA por brindarme la mejor etapa de vida universitaria dándome la oportunidad de crecer profesionalmente y como persona pudiendo ayudar a mis compañeros desde muchas iniciativas año con año.

A la Unidad de Ciencias Básicas de la FIA por darme la oportunidad como instructor de laboratorio, así como al vicedecanato y decanato de la FIA. Además, brindar apoyo para la realización de la fase experimental de este trabajo de graduación.

A los docentes que ayudaron a formarme en este arduo proceso, todos desde que inició sobre todo a mi último docente, nuestro asesor de tesis ingeniero Francisco Arévalo, así como a muchos otros que aportaron grandemente al crecimiento profesional como el ingeniero Aníbal Erazo, ingeniera Delmy Rico e ingeniera Tania Torres, así como los demás respetables docentes de la EIQA.

A todos desde lo más profundo de mis pensamientos y corazón ¡GRACIAS!

Julio Chicas

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por darme la vida, la sabiduría, la oportunidad de estudiar y culminar esta carrera. A nuestra madre la virgen María por haberme ayudado con su intersección ante Jesucristo en mi etapa de estudiante con lo que más necesité.

A mi madre Rosa María Cruz por el apoyo incondicional que me dio durante el desarrollo de mi carrera. A mi hermana Cristina Isabel Guzmán, que siempre me apoyó. A mi padre José Manuel Guzmán que, aunque no se encontraba en el país, siempre estuvo pendiente de mí.

A mi compañero de trabajo de graduación Julio Abner Chicas por la amistad y unidad profesional en esta última etapa de nuestra carrera.

A todos los profesores que a lo largo de la carrera ayudaron a forjar el conocimiento necesario para hacer esto posible y en especial al Ing. Miguel Francisco Arévalo por su asesoría y dirección en el trabajo de graduación.

Y a todas las personas de que de alguna forma me ayudaron a lograr esta meta, MUCHAS GRACIAS

William Guzmán

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se diseña y realiza un experimento de producción de gas hidrógeno obtenido a partir de electrólisis de agua haciendo uso de energía eléctrica proveniente de un sistema fotovoltaico además de Hidróxido de Sodio para generar una solución electrolítica que permita el paso de la corriente. El trabajo se realiza con el fin de encontrar alternativas de sustitución a combustibles térmicos sobre todo derivados del petróleo con el fin de aportar soluciones a la generación de gases de efecto invernadero que provocan el calentamiento global. El experimento se realizó a diferentes concentraciones de la solución y a diferentes temperaturas para evaluar el desempeño del rendimiento de la reacción y poder generar condiciones de operación para posteriormente adjudicar un costo de producción a cada una de ellas tomando como parámetro la cantidad de volumen de hidrógeno formada en una unidad de tiempo la cual posteriormente se trabaja en masa por unidad de tiempo para tener un dato más concreto. Una vez se calcula el rendimiento de producción se pasa su equivalente a rendimiento energético habiendo medido los flujos de corriente durante el experimento y comparando estos con datos obtenidos de la ley de Faraday de lo que teóricamente es necesario, se calcula una eficiencia de la electrólisis que varió de un 20% a un 87% cuyo valor depende de los factores antes mencionados de temperatura y concentración.

Luego de la fase de diseño y experimento se hizo un análisis de los resultados más favorables en cuanto a una ponderación de costos las cuales arrojaron resultados de costos de \$4.47 a \$20.63 USD valores que incluyen comparaciones con la utilización de energía eléctrica proveniente de la red de distribución eléctrica comercial posteriormente el precio más bajo se comparó con los precios actualizados de los combustibles derivados del petróleo y con énfasis en aquellos de tipo gas se calculó un rango de 9% a 101% más caro a excepción del precio del gas metano en el cual fue el único en el cual el hidrógeno resulto ser más barato.

Finalmente se realiza una evaluación económica general haciendo uso del método beneficio-costos el cual es utilizado para evaluar proyectos con fines sociales como en este caso podría ser el impacto ambiental que este podría generar. El análisis nos arroja resultados mayores a 1 lo cual significa que es rentable no solo ambientalmente si no que económicamente también y que a pesar de ser más caro que un combustible comercial derivado del petróleo no generará pérdidas y podrá contribuir como una solución a mejorar la problemática ambiental actual.

ÍNDICE

ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
OBJETIVOS.....	2
ALCANCES.....	3
LIMITACIONES.....	3
JUSTIFICACION.....	4
INTRODUCCIÓN.....	5
CAPITULO I: FUNDAMENTO TEORICO.....	6
1.1. Situación climática actual.....	6
1.1.1. Causas del calentamiento global.....	7
1.1.2. Efectos del calentamiento global.....	7
1.1.3. Acuerdos Internacionales para detener el calentamiento global.....	9
1.2. Energías Renovables.....	11
1.2.1. Energía hidráulica.....	12
1.2.2. Biomasa.....	12
1.2.3. Geotermia.....	13
1.3. Energías no renovables.....	14
1.3.1. Petróleo.....	14
1.4. Matriz energética.....	15
1.4.1. Matriz energética nacional y de generación eléctrica de El Salvador.....	15
1.5. Hidrógeno y sus aplicaciones.....	21
1.5.1. Características generales del hidrógeno.....	21
1.5.2. Características energéticas.....	23
1.5.3. Aplicaciones del Hidrógeno.....	25
1.5.4. Métodos de producción del hidrógeno.....	26
1.6. Generación de energía eléctrica por paneles solares.....	27
1.6.1. Principios del efecto fotovoltaico.....	27
1.6.2. Funcionamiento de los paneles solares.....	28
1.6.3. Incidencia solar en El Salvador y potencial fotovoltaico.....	28
1.7. Electrolización del agua para obtener hidrógeno.....	33
1.7.1. Condiciones para que ocurra la electrólisis.....	33
1.7.2. Condiciones para que operen las celdas.....	34
1.7.3. Tipos de celdas.....	34
1.7.4. Características de los elementos de la celda.....	38
1.7.5. Resultados característicos de la electrólisis.....	38
1.8. Electrólisis de salmuera.....	38

1.8.1. Proceso Anódico y proceso catódico	39
1.9. Medidas de seguridad y almacenaje para el hidrógeno	40
1.9.1. Medidas de seguridad para su manipulación	40
1.9.2. Medidas de seguridad para su almacenamiento	44
CAPITULO II: METODOLOGÍA PARA PRODUCIR HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS DE AGUA UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR.....	46
2.1. Método de investigación y tipo de estudio	46
2.2. Metodología para crear el diseño de la fase experimental.....	48
2.3. Determinación de variables experimentales	51
2.3.1. Matriz de pruebas ajustando las variables de control.....	54
2.4. Metodología para realizar la electrólisis	56
2.4.1. Metodología de cuantificación de gases producidos.....	58
2.5. Diseño de sistema de electrólisis	60
2.5.1. Selección de electrolito	60
2.5.2. Selección de electrodos	60
2.5.3. Equipo de electrólisis	61
2.6. Sistema de paneles solares	62
2.6.1. Factores influyentes en el uso de paneles solares	62
2.6.2. Control de flujo energético proporcionado por los paneles solares	64
2.6.3. Acoplamiento de sistema de paneles solares	66
2.7. Medidas de seguridad	68
2.7.1. Generalidades del gas hidrógeno	68
2.7.2. Efectos potenciales para la salud.....	69
2.7.3. Medidas de precaución.....	69
2.7.4. Equipo para la etapa experimental de la obtención de hidrógeno.....	70
CAPITULO III: ETAPA EXPERIMENTAL.....	72
3.1. Preparaciones previas	72
3.2. Proceso de producción de gases a temperatura constante.....	74
3.3. Proceso de producción de gases a temperatura variable.....	82
3.3.1. Pruebas para bajas concentraciones a temperatura ambiente.....	89
CAPITULO IV: EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	95
4.1. Análisis de resultados experimentales	95
4.1.1. Producción de hidrógeno a diferentes concentraciones (T amb)	95
4.1.2. Producción de Hidrógeno a concentraciones bajas temperatura ambiente	97
4.1.3. Producción de hidrógeno a distintas temperaturas	99

4.2. Balance de materia y energía del proceso.....	102
4.2.1. Balance de masa.....	103
4.2.2. Balance de energía.....	105
4.3. Determinación de costos de producción del hidrógeno.....	106
4.3.1. Potencia eléctrica.....	107
4.3.2. Solución de hidróxido de sodio.....	108
4.3.3. Aumento de temperatura.....	110
4.3.4. Comparación de costos según parámetros de producción.....	111
4.4. Evaluación económica.....	114
4.4.1. Evaluación económica: Comparaciones generales.....	115
4.4.2. Evaluación económica: Método beneficio costo.....	118
4.5. Escalamiento Industrial aproximado de la metodología propuesta.....	122
4.5.1. Bombas.....	125
4.5.2. Tuberías y accesorios.....	125
4.5.3. Compresores.....	126
4.5.4. Tanques de almacenamiento.....	128
4.5.5. Paneles solares.....	129
4.5.6. Controlador de carga.....	129
4.5.7. Sistema para electrólisis.....	131
4.5.8. Calentador de agua solar.....	132
4.5.9. Tanque homogeneizador.....	133
OBSERVACIONES.....	134
CONCLUSIONES.....	135
RECOMENDACIONES.....	136
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	138
BIBLIOGRAFÍA.....	140
ANEXO A.....	142
ANEXO B.....	148

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Emisión de gases de efecto invernadero por parte de las industrias	9
Figura 1.2	Matriz Energética acumulada de El Salvador hasta 6/10/19 (CNE, 2019)	16
Figura 1.3	Matriz acumulada de El Salvador para los últimos 3 años hasta 2019 (CNE, 2019)	16
Figura 1.4	Matriz acumulada de El Salvador para los últimos 3 años (cont.) (CNE, 2019)	17
Figura 1.5	Generación mensual en Mwh para energía hidroeléctrica (CNE, 2019)	17
Figura 1.6	Generación mensual en Mwh para Energía Geotermia (CNE, 2019)	18
Figura 1.7	Generación mensual en Mwh para Diesel (CNE, 2019)	18
Figura 1.8	Generación mensual en Mwh para Bunker (CNE, 2019)	19
Figura 1.9	Generación mensual en Mwh para Biomasa (CNE, 2019)	19
Figura 1.10	Generación mensual en Mwh para Energía Solar fotovoltaica (CNE, 2019) ...	20
Figura 1.11	Generación en Mwh de energías Renovables y no Renovables (CNE, 2019) ..	20
Figura 1.12	Consumo de hidrógeno a nivel mundial (Brenda Guzmán, 2011)	25
Figura 1.13	Mapa de incidencia solar horizontal Centro América	30
Figura 1.14	Mapa de incidencia solar normal Centro América	30
Figura 1.15	Potencial Fotovoltaico EL Salvador	31
Figura 1.16	Irradiación Normal Directa	31
Figura 1.17	Irradiación Solar Horizontal El Salvador	32
Figura 1.18	Configuración de un electrolizador PEM	35
Figura 1.19	Conexión Unipolar del electrolizador alcalino	36
Figura 1.20	Conexión Bipolar del electrolizador alcalino	37
Figura 1.21	Funcionamiento de un electrolizador alcalino	37
Figura 1.22	Curso de una típica electrólisis de salmuera en solución neutra	40
Figura 2.1	Pasos para el desarrollo del trabajo de investigación a través de un enfoque cuantitativo basado en el método científico para un trabajo experimental	47
Figura 2.2	Diagrama de la metodología para realización del diseño del experimento	50
Figura 2.3	Demandas energéticas del proceso electrolítico en función de la temperatura. (Priego, 2009)	53
figura 2.4	Procedimiento del proceso experimental	57
Figura 2.5	Vistas del electrolizador unipolar de cubeta a implementar	62
Figura 2.6	Espectro solar. ©Hogarsense.es	62
Figura 2.7	Incidencia solar en días despejados y nublados, CNE (2011)	64
Figura 2.8	Diagrama de flujo de energía para el experimento	65
Figura 2.9	Diagrama general de Interconexión de elementos de red eléctrica del experimento	68
Figura 3.1	Equipo para realización de pruebas	72
Figura 3.2	Preparación pruebas a bajas concentraciones	89
Figura 3.3	Ausencia de burbujeo a concentración al 0% P/V	90
Figura 3.4	Burbujeo poco visible a las concentraciones de 0.02 %, 0.06% y 0.1% P/V ...	90
Figura 3.5	Poco burbujeo a concentración 0.5% P/V	90
Figura 3.6	Burbujeo notable para concentración de 1% P/V	90
Figura 3.7	Burbujeo moderado para concentración de 5%	90
Figura 3.8	Abundante burbujeo concentraciones de 10% y 15% P/V	90

Figura 4.1	Tiempo de producción de 100ml de H ₂ a diferentes concentraciones, temperatura ambiente.....	95
Figura 4.2	Rendimiento de producción de gramos de H ₂ por hora a diferentes concentraciones, temperatura ambiente.....	96
Figura 4.3	Potencia consumida y suministrada para producir 100ml H ₂ /h	96
Figura 4.4	Eficiencia energética de producción de H ₂ a diferentes concentraciones, temperatura ambiente.....	97
Figura 4.5	Rendimiento de producción de hidrógeno a bajas concentraciones T amb	98
Figura 4.6	Rendimiento de producción de hidrógeno en un rango amplio de concentraciones a T amb	98
Figura 4.7	Eficiencia en la producción a bajas concentraciones a temperatura ambiente..	99
Figura 4.8	Tiempo de generación de 100ml de H ₂ a diferentes temperaturas.....	99
Figura 4.9	Rendimiento de producción de gramos de H ₂ a diferentes temperaturas para diferentes concentraciones.....	100
Figura 4.10	Potencia consumida y suministrada al electrolizador	101
Figura 4.11	Eficiencia de la potencia suministrada y consumida.....	102
Figura 4.12	Esquema del proceso de flujo de masa y energía realizado para la electrólisis	103
Figura 4.13	Área de influencia de empresas distribuidoras.....	108
Figura 4.14	Gráfico de costos de proceso de producción.....	113
Figura 4.15	Comparativa de almacenamiento de hidrógeno	117
Figura 4.16	Costos adicionales de producción y venta	118
Figura 4.17	Diseño de planta productora de Gas Hidrógeno propuesto y elaborado en base a sistema en estudio	123
Figura 4.18	Bomba de diafragma	125
Figura 4.19	Tuberías de acero inoxidable 316 (Aleación Tubos, 2020)	126
Figura 4.20	Especificaciones de tubería acero inoxidable 316 (Aleación Tubos, 2020) ...	126
Figura 4.21	Compresor Orkan para aumento de presión a 200bar (Direct Industry, 2020)	127
Figura 4.22	Características para compresor Orkan (Direct Industry, 2020)	127
Figura 4.23	Cilindros para almacenamiento de Hidrógeno (Alibaba, 2020).....	128
Figura 4.24	Descripción de cilindros para almacenaje de gases (Alibaba, 2020).....	128
Figura 4.25	Controlador de carga para estabilizar corriente (Direct Industry, 2020)	130
Figura 4.26	Electrolizador alcalino (Alibaba, 2020)	131
Figura 4.27	Especificaciones técnicas electrolizador (Alibaba, 2020).....	131
Figura 4.28	Calentador de agua solar (Made in China, 2020).....	132
Figura 4.29	Especificaciones de calentador de agua solar (Made in China, 2020).....	132
figura 4.30	Especificaciones de tanque homogeneizador (Alibaba, 2019)	133
Figura 4.31	Tanque homogeneizador para preparación de Sln de NaOH (Alibaba, 2019)	133

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Poder calorífico de algunos combustibles (Hortal, 2012)	24
Tabla 1.2 Comparación en los métodos más comunes de producción del hidrógeno	27
Tabla 2.1 Matriz de toma de datos para eficiencia controlada por la concentración del electrólito a temperatura ambiente.....	55
Tabla 2.2 Matriz de toma de datos para eficiencia controlada por la temperatura de la solución.....	55
Tabla 2.3 Procedimiento para medir gases generados.....	58
Tabla 2.4 Especificaciones de paneles solares a utilizar (ENF SOLAR, 2019).....	66
Tabla 2.5 Especificaciones de regulador de voltaje a utilizar (Victron energy, 2019).....	67
Tabla 3.1 Material y equipo a utilizar.....	72
Tabla 3.2 Pasos para preparar el sistema eléctrico	73
Tabla 3.3 Pasos para preparar el sistema eléctrico (continuación).....	74
Tabla 3.4 Preparación solución para parte A.....	74
Tabla 3.5 Marcha de ejecución del experimento parte B	75
Tabla 3.6 Resultados experimentales para variación de concentraciones temperatura ambiente A.....	77
Tabla 3.7 Resultados experimentales para variación de concentraciones temperatura ambiente B	78
Tabla 3.8 Proceso de producción a temperatura variable.....	82
Tabla 3.9 Proceso de producción a temperatura variable (continuación).....	83
Tabla 3.10 Resultados prueba temperatura variable 20% p/v A	83
Tabla 3.11 Resultados prueba temperatura variable 20% p/v B.....	83
Tabla 3.12 Resultados prueba temperatura variable 25.4% p/v A	84
Tabla 3.13 Resultados prueba temperatura variable 25.4% p/v B.....	84
Tabla 3.14 Resultados prueba temperatura variable 33.4% p/v A	84
Tabla 3.15 Resultados prueba temperatura variable 33.4% p/v B.....	85
Tabla 3.16 Resultados experimentales para concentraciones bajas a T ambiente A.....	91
Tabla 3.17 Resultados experimentales para concentraciones bajas a T ambiente B	91
Tabla 4.1 Pliego tarifario para altas demandas a partir de julio 2020	108
Tabla 4.2 Costos por la producción de hidrógeno 33.4% P/V	111
Tabla 4.3 Costos por la producción de hidrógeno 25.4% P/V	112
Tabla 4.4 Costos por la producción de hidrógeno 20.0% P/V	112
Tabla 4.5 Equivalencia Hidrógeno – Energía.....	114
Tabla 4.6 Comparación de capacidad energética del hidrógeno frente a otras alternativas combustibles.....	114
Tabla 4.7 Precios internacionales cotizados de diferentes combustibles	115
Tabla 4.8 Comparaciones frente al precio calculado del hidrógeno.....	116
Tabla 4.9 Desglose de valores para evaluación costo/beneficio	121

ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El constante incremento de la demanda energética desde mediados del siglo xx, provoca un mayor consumo de combustibles fósiles lo que genera que las emisiones de gases de efecto invernadero aumenten contribuyendo al calentamiento global. Existe un alto consumo de derivados del petróleo para motores de combustión, cocinas, calderas y otros que después de la combustión generen gases de efecto invernadero y gases que disminuyen la calidad del aire sobre todo en ciudades con alta densidad poblacional como lo es el área metropolitana de San Salvador. Además, no existen puntos de recarga para transporte que utiliza hidrógeno ya sea para motores de combustión o para motores eléctricos a base de hidrógeno lo que impide que se desarrollen estas tecnologías que contribuyan a disminuir el cambio climático y la dependencia de los precios del combustible debido al alto coste de la energía eléctrica que requiere el uso de esas tecnologías.

Sin embargo, estudios recientes como *“Producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica”* de 2012 en Salta, Argentina han sido capaces de proponer nuevas soluciones ante el uso de combustibles fósiles usando hidrógeno.

Recientemente el auge de las energías renovables permitido por la variación en los precios del petróleo, el intento por frenar el deterioro del medio ambiente, la alta incidencia solar en la región de nuestro país y la masificación de tecnologías verdes, es una oportunidad para desarrollar modificaciones innovadoras a los procesos de manufactura, que ayuden a solucionar las problemáticas ambientales y generar retorno de capital invertido.

Por lo tanto, es necesario implementar a la brevedad de lo posible investigaciones que aprovechen recursos abundantes como lo es la energía solar y de esa forma reducir el costo de combustibles que contribuyen a una sociedad sostenible como lo es el hidrógeno.

OBJETIVOS

GENERAL

- a) Producir hidrógeno por electrólisis de agua utilizando energía solar y evaluar su uso como combustible fuente de energía térmica.

ESPECIFICOS

- a) Implementar un prototipo de proceso que aproveche la energía solar en la electrólisis del agua para producir hidrógeno.
- b) Evaluar la viabilidad técnica de la conversión de la energía eléctrica a partir de la energía solar en los paneles solares a volumen de hidrógeno obtenido en la electrólisis del agua.
- c) Comparar el coste de producción de hidrógeno con los de hidrocarburos gaseosos.

ALCANCES

- a) Se montará un equipo básico de electrólisis cuyos electrodos estén alimentados de electricidad proveniente de paneles solares.
- b) Se diseñará y realizará un experimento haciendo usos de paneles solares de 100W 12V DC Policristalinos, cuyos resultados serán escalados teóricamente para su posible producción industrial, haciendo un análisis energético del proceso.
- c) Se evaluará económicamente la producción de hidrógeno a través de métodos de selección de alternativas como el beneficio/costo de manera general.

LIMITACIONES

- a) Los electrodos a utilizar responderán a materiales conductores evitando los de alto costo (como el platino o el iridio los cuales son resistentes a la corrosión continua que podría generar las pruebas) y en su lugar ocupar materiales disponibles más accesibles económicamente y para usos de tiempo corto (acero inoxidable, recubrimiento de aluminio o acero galvanizado, etc.)
- b) La cantidad de paneles se verá limitada a máximo dos y consecuentemente la producción de hidrógeno esto para evitar manejar cantidad peligrosas del gas al producir más corriente eléctrica con más paneles.
- c) Se comparará el costo de producción del gas hidrógeno con el costo de producción de gas natural de propano y butano, así como otros derivados del petróleo en segunda instancia.

JUSTIFICACION

La generación de gases de efecto invernadero por el uso excesivo de combustibles fósiles tomando en cuenta que son recursos no renovables agotables y la dependencia de la sociedad de estos provoca el calentamiento global del planeta generando cambios en la temperatura, además de disminuir la calidad de aire que respiramos, siendo el problema a estudiar en esta investigación. Este problema ha venido tomando importancia desde mediados del siglo XX afectando principalmente a la población humana además de la flora y fauna, acrecentado durante las últimas 4 décadas donde la explotación de los hidrocarburos aumentó debido a que la demanda de energía creció exponencialmente, viendo sus efectos de consumo y contaminación en zonas de alta densidad poblacional principalmente en el caso de nuestro país, en la capital y cabeceras departamentales.

El uso de energías renovables es una buena forma de evitar la contaminación causada por el uso de combustibles fósiles, siendo una de ellas el hidrógeno gaseoso como combustible que no emite gases de efecto invernadero, se puede producir a partir de energías renovables y puede ser producido a partir de fuentes inagotables por lo que se han generado investigaciones en países como Argentina, España o Alemania además de otros pocos sobre *“Producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica”* la cual representa soluciones pero tienen deficiencias de aplicabilidad a nuestro país porque son aplicadas a la incidencia solar del lugar en que se genera la investigación además de ser con datos desfasados y con patentes de ese mismo país lo cual obliga a nuestro país y universidad producir su propio conocimiento sobre el tema adaptado al entorno y condiciones climáticas, económicas y tecnológicas que su posible implementación involucre.

El Salvador posee una alta incidencia solar a comparación de los demás países centroamericanos por lo que aprovechar esta energía para producir hidrógeno nos daría una clara ventaja en el mercado energético aparte que las tecnologías de paneles solares han reducido sus precios debido a ese mismo hecho que ha generado su producción en masa para múltiples proyectos actuales como el proyecto “Bósforo” que planea generar hasta 100 megavatios de energía dando un ejemplo del actual aprovechamiento de la incidencia solar antes mencionada.

Como estudiantes y prontamente profesionales de Ingeniería Química nos motiva el desarrollo del país, de la universidad y la protección al medioambiente por lo que se ha formulado esta investigación que tiene un gran potencial en su aplicación.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda incesante por alternativas de producción de energías que suplan la demanda actual que posee la civilización humana, ha conllevado a investigaciones que a lo largo del tiempo han concretizado todas las formas actuales de producción de energía en sus diversas formas principalmente la energía mecánica, la energía eléctrica y la energía térmica, las cuales representan las necesarias mayormente para mantener la sociedad funcionando y produciendo de acuerdo a sus necesidades. Para abastecer esta necesidad de energía, desde finales del siglo XIX se ha incrementado significativamente el uso desmesurado del carbón y de los derivados de petróleo lo que ha conllevado a consecuencias contaminantes del medioambiente y afectación de la salud de la vida en general principalmente la humana como por ejemplo el uso del plomo como aditivo en los combustibles el cual es altamente nocivo respirarlo de los gases de combustión y que terminó como juicio a favor de quitarlo en los años 70 del siglo pasado. Uno de los principales problemas del alto consumo de combustibles fósiles son los gases de efecto invernadero ya que aparte del monóxido de carbono también expulsan compuestos azufrados los cuales reaccionan con el ozono para formar trióxido de azufre formando posteriormente lluvias acidas y disminuyendo el ozono contribuyendo al calentamiento global que ahora se experimenta y que está ocasionando cambios significativos en la temperatura, estaciones, vientos y demás fenómenos ambientales que envuelven al ser humano en todo su desarrollo.

La producción de energías que sustituyan a estas fuentes y que no conlleven emitir estos gases de efecto invernadero han logrado hitos como en Inglaterra de poder mantener a flote su país sin el consumo de carbón mineral a partir de este año o como en Costa Rica de haber sustituido sus fuentes de energía con el uso de energías renovables en su totalidad. Para poder mantener el ritmo actual de vida que lleva el ser humano es necesario una fuente que supla la demanda energética, que no desequilibre el costo económico y que sea sostenible en el tiempo no contribuyendo a dañar el medioambiente o hacerlo con menor impacto respecto al que ya se está generando. El hidrógeno es la alternativa al alcance que cumple con estas características.

De la forma en que investigaciones que se han realizado y han concluido en lo antes expuesto es necesario para nuestro país y sobre todo para la Universidad de El Salvador el generar este tipo de conocimiento para contrarrestar los efectos que el calentamiento global y la economía mundial puedan generar en estos próximos años, a pesar de que existen investigaciones previas relacionadas con el tema no existen de propiedad intelectual de la UES ni de dominio gubernamental, ni actualizadas al coste actual para producción por lo que en este documento se tratará sobre lo relacionado a la producción de hidrógeno por electrólisis de agua a base de energía solar tratando de aportar una solución a las problemáticas expuestas.

1. CAPITULO I: FUNDAMENTO TEORICO

1.1. Situación climática actual

El clima es la estadística del tiempo atmosférico. Se mide evaluando los patrones de variación en temperatura, humedad, presión atmosférica, viento, precipitación, cantidad de partículas atmosféricas y otras variables meteorológicas en una región dada sobre períodos largos de tiempo. El periodo habitual para hacer la media de estas variables es de 30 años, según lo define la Organización Meteorológica Mundial. Atendiendo a la definición del quinto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), un cambio climático es una variación del estado del clima, identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades (por ejemplo, más o menos fenómenos meteorológicos extremos), que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares (que suponen variaciones en la radiación solar recibida por la Tierra), erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. En el contexto de la política medioambiental, el término se usa para referirse específicamente al cambio climático antropogénico. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como "cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables ". La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales. El IPCC ha publicado cinco informes que confirman la evidencia de los cambios en el clima y la correlación directa con la actividad humana debido, fundamentalmente, de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provocados por el uso de combustibles fósiles y las alteraciones en el uso del suelo. En un informe del IPCC con fecha de 6 de octubre de 2018, estima que las actividades humanas han causado aproximadamente 1.0 ° C de calentamiento global por encima de los niveles preindustriales. Es probable que el calentamiento global alcance 1.5 ° C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual de unos 0.2°C por década. En muchas regiones terrestres se está experimentando un calentamiento superior a la media anual global (sería el caso de la mediterránea). El incremento de temperaturas se asocia al incremento del llamado "Efecto invernadero". Algunos gases presentes en la atmósfera - vapor de agua, dióxido de carbono, metano, ozono, óxidos de nitrógeno ...) permiten el paso de radiación solar de onda corta (visible y ultravioleta), pero retrasan la salida de la radiación de onda larga (infrarroja, es decir, calor) emitida por la superficie terrestre en retener y devolver parte de este calor de nuevo a la superficie. Esto se traduce en un aumento de la temperatura que se conoce con el nombre de efecto invernadero, proceso natural que ha hecho posible el desarrollo de la vida en nuestro planeta y que provoca que la temperatura media de la Tierra sea de 15°C y que las diferencias de temperatura entre el día y la noche sean menos acusadas. En ausencia de tales gases, se calcula que la temperatura media en la superficie terrestre sería de unos -18 °C (33° C menos). (GOVERN DE LAS ILLES BALEARS, 2020)

1.1.1. Causas del calentamiento global

Los científicos han dedicado décadas a entender lo que causa el calentamiento global. Han examinado los ciclos naturales y los eventos que tienen influencia sobre el clima. Sin embargo, la cantidad y patrón de calentamiento que se ha medido no puede explicarse únicamente mediante estos factores. Según la ONU, la única forma de explicar este patrón es incluir el efecto de los gases de invernadero (GEI) emitidos por los humanos. Para recopilar toda la información que respalde el cambio climático, las Naciones Unidas formaron un grupo de científicos llamados el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). El IPCC se reúne cada varios años para revisar los últimos hallazgos científicos y escribir un informe que resuma todo lo que se conoce sobre el calentamiento global. Cada informe representa un consenso o acuerdo, entre cientos de científicos destacados. Una de las primeras cosas que aprendieron los científicos es que existen varios gases de efecto invernadero responsables del calentamiento y los humanos los emiten en una variedad de formas. La mayoría provienen de la combustión de combustibles fósiles de coches, fábricas y producción de electricidad. El gas responsable de la mayoría del calentamiento es el dióxido de carbono, también conocido como CO₂. Otros gases que contribuyen a este efecto son el metano que liberan los vertederos y la actividad agrícola (especialmente los sistemas digestivos de animales de pastoreo), óxido nitroso de los fertilizantes, gases utilizados para la refrigeración y los procesos industriales y la pérdida de bosques que, de lo contrario, podrían almacenar el CO₂ (United Nations for the Climate Change, 2018).

Los diferentes gases de efecto invernadero poseen capacidades de retención de energía muy diferentes. Algunos de ellos pueden retener aún más energía que el CO₂. Una molécula de metano produce más de 20 veces el calentamiento de una molécula de CO₂. El óxido nitroso es 300 veces más poderoso que el CO₂. Otros gases, como los clorofluorocarbonos (que han sido prohibidos en la mayor parte del mundo porque también degradan la capa de ozono), tienen un potencial de retención de calor que es miles de veces mayor que el CO₂. Sin embargo, dado que sus concentraciones son mucho menores que el CO₂, ninguno de estos gases aumenta tanto el calor en la atmósfera como el CO₂. Para comprender los efectos de todos estos gases juntos, los científicos tienden a hablar sobre todos los gases de efecto invernadero en términos de la cantidad equivalente de CO₂. Desde 1990, las emisiones anuales han aumentado unos 6 billones de toneladas métricas de “dióxido de carbono equivalente” en todo el mundo, un aumento de más del 20% (National Geographic, 2010).

1.1.2. Efectos del calentamiento global

El planeta se está calentando, desde el Polo Norte al Polo Sur, y en todas las áreas intermedias. Globalmente, el mercurio ya ha subido más de 1 grado Fahrenheit y aún más en las sensibles regiones polares. Y los efectos del aumento de la temperatura no llegarán en un futuro lejano. Se están produciendo justo ahora. Se observan los síntomas por todos lados y algunos de ellos son sorprendentes. El calor no solo está derritiendo los glaciares y el hielo del mar, también está cambiando los patrones de precipitaciones y haciendo que los animales se trasladen (National Geographic, 2010).

En la actualidad ya son visibles algunos impactos del aumento de la temperatura:

- a) El hielo se está derritiendo en todo el mundo, especialmente en los polos incluyendo los glaciares montañosos, las láminas de hielo que cubren el oeste de la Antártida y Groenlandia y el hielo del mar Ártico.
- b) El investigador Bill Fraser ha seguido el descenso de los pingüinos Adélie en la Antártida donde su número ha descendido de 32.000 parejas reproductoras a 11.000 en 30 años.
- c) El aumento del nivel del mar durante este último siglo ha sido más rápido.
- d) Algunas mariposas, zorros y plantas alpinas se han trasladado más al norte o a zonas más frías y elevadas.
- e) La media de las precipitaciones (lluvia y nieve) ha aumentado en todo el globo.
- f) Los escarabajos del abeto han experimentado un boom en Alaska gracias a 20 años de veranos cálidos. Los insectos han devorado 4 millones de acres de abetos.

Estos son otros efectos que podrían darse a finales de este siglo si continúa el calentamiento:

- a) Se espera que el nivel de los mares aumente entre 18 y 59 centímetros al final de este siglo y si los polos continúan derritiéndose, podrían aumentar entre 10 y 20 centímetros adicionales.
- b) Es probable que los huracanes y algunas otras tormentas se hagan más fuertes.
- c) Las especies que dependen unas de otras pueden perder la sincronización. Por ejemplo, las plantas podrían florecer antes de que los insectos que las polinizan sean activos.
- d) Las inundaciones y las sequías se harán más frecuentes. La lluvia en Etiopía, donde las sequías ya son habituales, podría disminuir un 10% durante los próximos 50 años.
- e) Algunas enfermedades se extenderán, como la malaria llevada por los mosquitos.
- f) Los ecosistemas cambiarán, algunas especies se moverán más al norte o tendrán más éxito; otras no podrán trasladarse y podrían extinguirse. El científico investigador de la vida salvaje Martyn Obbard ha averiguado que, desde mediados de los años 80, con menos hielo donde vivir y pescar, los osos polares están considerablemente más delgados. El biólogo de osos polares Ian Stirling ha descubierto un patrón similar en la Bahía de Hudson. Él teme que, si el hielo del mar desaparece, los osos polares también desaparecerán. (National Geographic, 2010).

1.1.3. Acuerdos Internacionales para detener el calentamiento global



Figura 1.1 Emisión de gases de efecto invernadero por parte de las industrias
Fuente: (Ecointeligencia, 2015), contaminación antropogénica

La **figura 1.1** representa una realidad de las industrias: emiten grandes cantidades de gases y la mayoría de ellos gases de efecto invernadero, por eso desde hace décadas existe una creciente sensibilización respecto del impacto medioambiental de las actividades humanas que se concretan en el cambio climático. Para dar respuesta a esta circunstancia y marcar una hoja de ruta sostenible surge lo que se conoce como el Protocolo de Kioto. Este protocolo sobre Cambio Climático es el resultado más significativo del esfuerzo colectivo y global para buscar un marco conjunto que permita luchar contra el cambio climático. De esta manera se establecen unos límites cuantificados y obligatorios de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para los países que lo ratifican, y que son jurídicamente vinculantes para éstos. Un extracto del protocolo citado textualmente:

“Las partes (...) se asegurarán individual o conjuntamente de que sus emisiones antropogénicas agregadas, expresadas en dióxido de carbono equivalente, de los gases de efecto invernadero (...) no excedan de las cantidades atribuidas a ellas (...) con miras a reducir el total de sus emisiones de esos gases a un nivel inferior en no menos del 5% al de 1990 en un período de compromiso comprendido entre 2008 y 2012.

Todas las partes (...) formularán, aplicarán, publicarán y actualizarán periódicamente programas nacionales y, en su caso, regionales que contengan medidas para mitigar el cambio climático y medidas para facilitar una adaptación adecuada; tales programas guardarán relación, entre otros, con los sectores de la energía” (United Nations for the Climate Change, 2018).

Presenta como objetivo global la reducción de un 5% en las emisiones respecto de 1990 (cubre los 6 principales GEI), focalizado mediante un compromiso de los 38 países industrializados incluidos en el anexo uno del protocolo con objetivos jurídicamente vinculantes y calendarios de cumplimiento. No se han fijado objetivos para países en vías de desarrollo (United Nations for the Climate Change, 2018).

Los plazos marcados son muy claros:

- a) 2005: avances significativos en la reducción.
- b) 2008-2012: período de compromiso.
- c) A partir de 2012: período post-Kioto.

Los 6 gases de efecto invernadero considerados son: dióxido de carbono (CO₂, gas metano (CH₄ y óxido nitroso (N₂O), y los otros tres son gases industriales fluorados, hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆). Para que el Protocolo entrara en vigor se establecieron 2 requisitos indispensables:

- a) El número de países que lo ratificaran fuera de un mínimo de 55;
- b) Las emisiones de aquellos países que hubieran ratificado el Protocolo superaran el 55% de las emisiones totales de los países del Anexo Uno en 1990.

Tras la ratificación de Rusia, el Protocolo entró en vigor el 16 de febrero de 2005, afectando a todos aquellos países que lo hayan ratificado (164 países que generan el 61.6% de las emisiones del planeta). Como escollo de este acuerdo señalar que hay 4 países que no firmaron el protocolo, por lo cual sus emisiones no se regularon con este acuerdo: Kazajistán, Croacia, Australia y Estados Unidos. Estados Unidos es el primer generador de CO₂ del mundo, por lo que los esfuerzos de los firmantes no tienen respuesta por parte del que más contamina. La Unión Europea se comprometió a la reducción en 2010 de un 8% de sus emisiones de GEI respecto de 1990. Este objetivo se repartió entre los Estados miembros, asignando a cada uno un objetivo concreto. Con la ratificación del Tratado se establece en la Unión Europea primero un período de tres años (2005-2007) de toma de contacto, seguido de un período de cinco años bajo el Comercio Internacional de Emisiones de Kioto (2008-2012). En esta primera fase de implantación, el Protocolo sólo afecta al CO₂ como GEI en grandes instalaciones industriales y de producción de energía (46% de las emisiones totales de la Unión Europea). En concreto:

- a) Actividades energéticas (refinerías, coquerías e instalaciones de combustión con una potencia térmica nominal superior a los 20 MW).
- b) Producción y transformación de metales férreos.
- c) Industrias minerales (cemento, vidrio y cerámica).
- d) Fabricación de papel y pasta de papel.

Fue en la COP 18 (Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) sobre cambio climático donde ratificó el segundo período de vigencia del Protocolo de Kioto desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020. La duración de este segundo período del Protocolo es de 8 años, con metas concretas al 2020. Sin embargo, este proceso denotó un

débil compromiso de los países industrializados, tales como Estados Unidos, Rusia, y Canadá, los cuales decidieron no respaldar la prórroga. La puesta en marcha de Kioto ha permitido una reducción del 22.6% en las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990 en 37 países industrializados y la UE, cuando el compromiso inicial era de una disminución del 5% (Estévez, 2015).

1.1.3.1. Acuerdo de París:

En la COP 21 de París, en diciembre de 2012, las Partes de la CMNUCC alcanzaron un acuerdo histórico para combatir el cambio climático y acelerar e intensificar las acciones e inversiones necesarias para un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono. El Acuerdo de París se basa en la Convención y, por primera vez, hace que todos los países tengan una causa común para emprender esfuerzos ambiciosos para combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos, con un mayor apoyo para ayudar a los países en desarrollo a hacerlo. Como tal, traza un nuevo rumbo en el esfuerzo climático mundial. El objetivo central del Acuerdo de París es reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático manteniendo el aumento de la temperatura mundial en este siglo muy por debajo de los 2 grados centígrados por encima de los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5 grados centígrados. Además, el acuerdo tiene por objeto aumentar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático y lograr que las corrientes de financiación sean coherentes con un nivel bajo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El Acuerdo también prevé un marco mejorado de transparencia para la acción y el apoyo. El acuerdo de París exige a todas las Partes que hagan todo lo que esté en su mano por medio de contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC por sus siglas en inglés) y que redoblen sus esfuerzos en los próximos años. Esto incluye la obligación de que todas las Partes informen periódicamente sobre sus emisiones y sobre sus esfuerzos de aplicación. También habrá un inventario mundial cada cinco años para evaluar el progreso colectivo hacia el logro del propósito del acuerdo, y para informar sobre nuevas medidas individuales de las Partes. El Acuerdo de París quedó abierto a la firma el 22 de abril de 2016 – Día de la Tierra – en la sede de las Naciones Unidas en Nueva York. Entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, 30 días después de que se cumpliera el llamado “doble criterio” (ratificación por 55 países que representan al menos el 55 % de las emisiones mundiales). Desde entonces, más países han ratificado y siguen ratificando el Acuerdo, y alcanzan un total de 125 Partes a principios de 2017. (United Nations for the Climate Change, 2018).

1.2. Energías Renovables

Las energías renovables son todas aquellas que provienen de una fuente natural, son recursos limpios y casi inagotables. Existe una gran variedad de energías renovables, y a grandes rasgos sus distintos tipos se pueden distinguir en función de la energía final conseguida a partir de ellas: energía eléctrica, energía térmica y biocarburantes. Existen diferentes fuentes de energía renovable, según los recursos naturales utilizados para la generación de energía (Asociación de Empresas de Energías Renovables, 2017).

1.2.1. Energía hidráulica

Se conoce como energía hidráulica, energía hídrica o hidroenergía a la obtenida del aprovechamiento de la energía cinética y/o potencial de las corrientes, caídas o saltos de agua. Es una forma de energía largamente aprovechada en la historia de la humanidad y a diferentes escalas, ya que puede transformarse en numerosas otras formas de energía útil. En líneas generales la energía hidráulica se considera segura, renovable y limpia, dado que no agota el agua que utiliza, ni subproduce sustancias tóxicas o contaminantes. Sin embargo, suele tener un impacto medioambiental considerable dado el impacto que las instalaciones pueden tener, sobre todo a gran escala, como es el caso de las represas hidroeléctricas, que modifican el caudal de los ríos, inundan terrenos secos y pueden incluso cambiar la calidad del agua. Desde hace siglos el cauce de los ríos se aprovechó con molinos y rotores para aprovechar su fuerza y convertirla en energía mecánica, ya sea para moler granos o trigo, o para generar electricidad. La fuerza del agua, su fluidez y su abundancia hacen de estos mecanismos un recurso idóneo para la humanidad. Las centrales hidroeléctricas son el caso más conocido de aprovechamiento de la energía hidráulica, para en este caso generar energía eléctrica. Esto se lleva a cabo mediante el emplazamiento de la central en alguna caída de agua natural, cauce de río o, en caso de no tener la altura necesaria, mediante la construcción de una represa hidroeléctrica. La lógica de estos emplazamientos es aprovechar la energía potencial gravitatoria del agua o la intensidad de su corriente, para hacer que el líquido mueva una turbina hidráulica de manera constante, generando así nueva energía que es luego transmitida a un alternador, para obtener electricidad. Dicha energía eléctrica entonces puede ser transmitida a través de la red a los hogares y comercios que la requieran (Raffino, concepto.de, 2018).

1.2.2. Biomasa

La biomasa es la materia orgánica que se utiliza como fuente de energía. Esta materia puede ser proveniente de animales o de plantas, incluyendo residuos orgánicos. La biomasa es más económica que los tipos convencionales de energía, que se producen a partir de combustibles fósiles. Además, es una fuente de energía renovable, más segura y más limpia que los combustibles tradicionales ya que por su forma de combustión emite menos gases. La biomasa suele utilizarse para la calefacción de espacios cerrados, para calentar agua o para generar electricidad o calor. Se la usa tanto en el ámbito doméstico como en el industrial (Raffino, concepto.de, 2019).

1.2.2.1. Tipos de biomasa

Se pueden identificar dos tipos diferentes de biomasa, teniendo en cuenta qué elementos se utilizan para su producción:

Biomasa residual. Se genera a partir de los residuos producidos por ciertas actividades humanas. Algunos de sus beneficios son que ayuda a bajar el número de vertederos, reduce la contaminación y las probabilidades de incendio, y es una opción económica. Dentro de la biomasa residual se identifican dos tipos diferentes:

- a) **Cultivos energéticos.** La energía se produce a partir de cultivos que fueron producidos especialmente para ello. Estos cultivos se caracterizan por su resistencia y por su gran capacidad de adaptación a terrenos inhóspitos. En este grupo se encuentran el sorgo, la caña de azúcar, los cereales, la patata, entre otros.

- b) Excedentes agrícolas. Los granos que no fueron utilizados como alimento para animales o personas se usan como biocombustibles o para la generación de electricidad. Algunos excedentes que se utilizan son cáscaras de almendras, huesos animales o los restos de una poda natural.

Se produce en ecosistemas naturales, sin la intervención del ser humano. Se pueden utilizar residuos de plantaciones, ramas, coníferas, leñas, frondosas o los restos de un aserradero. Para no perjudicar al medio ambiente, no se deben utilizar de manera extensiva.

1.2.3. Geotermia

La energía geotérmica es la energía que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor interno de la Tierra, que globalmente se puede considerar continua e inagotable a escala humana. Un yacimiento geotérmico es una zona del subsuelo donde el recurso geotérmico es susceptible de ser aprovechado por el hombre. El yacimiento geotérmico se clasifica de acuerdo con el nivel energético del recurso que contienen. Se pueden clasificar de la siguiente manera:

De alta temperatura:

Existen en las zonas más activas de la corteza de la Tierra a temperaturas superiores a 150°C. Son yacimientos de los cuales se puede extraer bastante calor para producir energía eléctrica a partir de vapor de agua. Se localizan principalmente en zonas con gradientes geotérmicos (relación entre la variación de temperatura y la profundidad) elevados y se sitúan a profundidades muy variables.

Por término medio temperatura:

Generalmente alcanzan temperaturas entre 100 y 150°C, lo cual permite su aprovechamiento para producción de electricidad, pero con un rendimiento menor que los de alta temperatura. El aprovechamiento también puede ser directo en forma de calor para sistemas de calefacción urbanos o usos industriales. Se localizan en áreas con un contexto geológico y estructural favorable y un gradiente superior a la media.

De baja temperatura:

Alcanzan temperaturas entre 30 y 100°C. Su utilización se centra en usos térmicos en sistemas de calefacción urbanos, en procesos industriales y en balnearios. Se localizan habitualmente en zonas con un contexto geológico favorable con presencia de acuíferos profundos, aunque el gradiente puede ser próximo al gradiente medio. De muy baja temperatura. Son los yacimientos unos metros por debajo de la superficie del suelo (unos 2 metros aproximadamente) la temperatura es inferior a los 30°C (15°C a 19°C). Se suelen utilizar como intercambiador térmico en sistemas de climatización mediante bomba de calor. Estos yacimientos se pueden localizar en cualquier punto, ya que el gradiente geotérmico sólo condiciona la eficiencia del sistema (Instituto Catalán de Energía, 2020).

1.3. Energías no renovables

De manera opuesta a estas energías se encuentran las energías no renovables, en muchos casos se hace referencia a los combustibles fósiles que en general tienen su origen en el petróleo, carbón, gas y otras fuentes de energía que eventualmente se agotarán sus despensas. Estos son recursos naturales que al ser explotados y mal manipulados generan grandes cantidades de contaminantes para el medio ambiente. Los combustibles fósiles son aquellos materiales naturales que tardaron millones de años en formarse, por ello son muy contados y cuando se acaben las reservas de los mismos entonces habrá que buscar otras fuentes alternativas de energía (Centro de estudios cervantinos, 2020).

1.3.1. Petróleo

1.3.1.1. Origen del petróleo

Los crudos de petróleo y los gases naturales son mezclas de moléculas de hidrocarburos (compuestos orgánicos de átomos de carbono e hidrógeno) que contienen de 1 a 60 átomos de carbono. Las propiedades de estos hidrocarburos dependen del número y de la disposición de los átomos de carbono e hidrógeno en sus moléculas. La molécula básica de hidrocarburo consta de 1 átomo de carbono unido a 4 átomos de hidrógeno (metano). Todas las demás variedades de hidrocarburos de petróleo se forman a partir de esta molécula. Los hidrocarburos que tienen hasta 4 átomos de carbono suelen ser gases; si tienen entre 5 y 19, son generalmente líquidos, y cuando tienen 20 o más, son sólidos. Además de hidrocarburos, los crudos de petróleo y los gases naturales contienen compuestos de azufre, nitrógeno y oxígeno, junto con trazas de metales y otros elementos. Se cree que el petróleo y el gas natural se formaron a lo largo de millones de años por la descomposición de la vegetación y de organismos marinos, comprimidos bajo el peso de la sedimentación. Al ser el petróleo y el gas más ligeros que el agua, ascendieron y llenaron los huecos creados en estas formaciones superpuestas. El movimiento ascendente cesó cuando el petróleo y el gas alcanzaron estratos densos e impermeables superpuestos o roca no porosa. El petróleo y el gas llenaron los huecos de los mantos de roca porosa y los yacimientos subterráneos naturales, como las arenas saturadas, situándose debajo petróleo, más pesado, y encima el gas, más ligero. Originalmente, estos huecos eran horizontales, pero el desplazamiento de la corteza terrestre creó bolsas, denominadas fallas, anticlinales, domos salinos y trampas estratigráficas, donde el petróleo y el gas se acumularon en yacimientos (Kraus, 2012).

El petróleo de pizarras bituminosas, o querógeno, es una mezcla de hidrocarburos sólidos y otros compuestos orgánicos que contiene nitrógeno, oxígeno y azufre. Se extrae, por calentamiento, de una roca llamada pizarra bituminosa, con un rendimiento de entre 68 y 227 litros de petróleo por tonelada de roca. Prospección y producción son los términos comúnmente aplicados a la parte de la industria del petróleo que se ocupa de la exploración para descubrir nuevos yacimientos de petróleo y gas natural, la perforación de pozos y la extracción de los productos a la superficie. En el pasado, el petróleo que rezumaba de forma natural a la superficie se recogía para utilizarlo en medicina, revestimientos protectores y como combustible para lámparas. Hay noticias de incendios en la superficie terrestre producidos por emanaciones de gas natural. Hasta el año de 1859 no se desarrollaron métodos de perforación y

obtención de petróleo en grandes cantidades con fines comerciales. El petróleo y el gas natural se encuentran en todo el mundo, tanto bajo tierra como bajo el agua, según se indica a continuación:

- a) Cuenca intercontinental del hemisferio occidental (Costa del Golfo de Estados Unidos, México, Venezuela)
- b) Oriente Próximo (península arábiga, Golfo Pérsico, Mar Negro y Mar Caspio) Indonesia y Mar de la China Meridional
- c) África septentrional y occidental (Sahara y Nigeria)
- d) América del Norte (Alaska, Terranova, California y región centro continental de Estados Unidos y Canadá)
- e) Extremo Oriente (Siberia y China)
- f) Mar del Norte (Kraus, 2012).

1.4. Matriz energética

La matriz energética es una representación cuantitativa de la totalidad de energía que utiliza un país, e indica la incidencia relativa de las fuentes de las que procede cada tipo de energía: nuclear, hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica o combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón. La matriz energética es útil para realizar análisis y comparaciones sobre los consumos energéticos de un país a lo largo del tiempo, o para comparar con otros países, y es una herramienta fundamental para la planificación. Tal como existen dos tipos de fuentes de energía como se le ha clasificado en renovables y no renovables, también las hay de matrices: primarias y secundarias. La primera alude a las diversas energías en el estado en que se extraen de la naturaleza. Las fuentes de energía secundarias, en cambio, incluyen los diversos productos energéticos elaborados a partir del procesamiento de las energías primarias (Educ.ar, 2020).

1.4.1. Matriz energética nacional y de generación eléctrica de El Salvador

La institución encargada de evaluar la matriz energética nacional y de generación eléctrica es el consejo nacional de energía (CNE) este organismo de estado tiene el deber de presentar al público en general los balances de energía y gráficos de la matriz energética nacional, en estos datos se encuentra la matriz acumulada hasta el año 2019. En el país las principales fuentes de energía existentes son: Hidroeléctrica, Geotermia, Biomasa principalmente bagazo de caña, Diésel, Bunker y energía fotovoltaica.

A continuación, se presenta el desglose de la matriz energética nacional (Fig. 1.2). A manera de comparación se muestra la matriz de generación eléctrica de El Salvador de los últimos 3 años hasta 2019 (Fig. 1.3) y (Fig. 1.4), esto con el fin de observar como las energías renovables se van abriendo paso cada año, sobre todo el significativo crecimiento anual de la generación de energía solar fotovoltaica que es un elemento incluyente en el estudio de esta investigación.

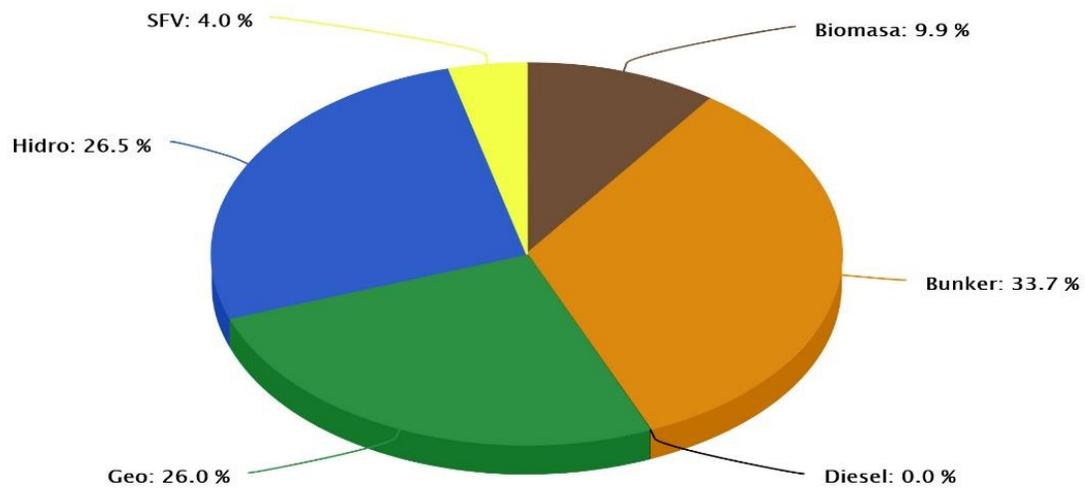


Figura 1.2 Matriz Energética acumulada de El Salvador hasta 6/10/19 (CNE, 2019)

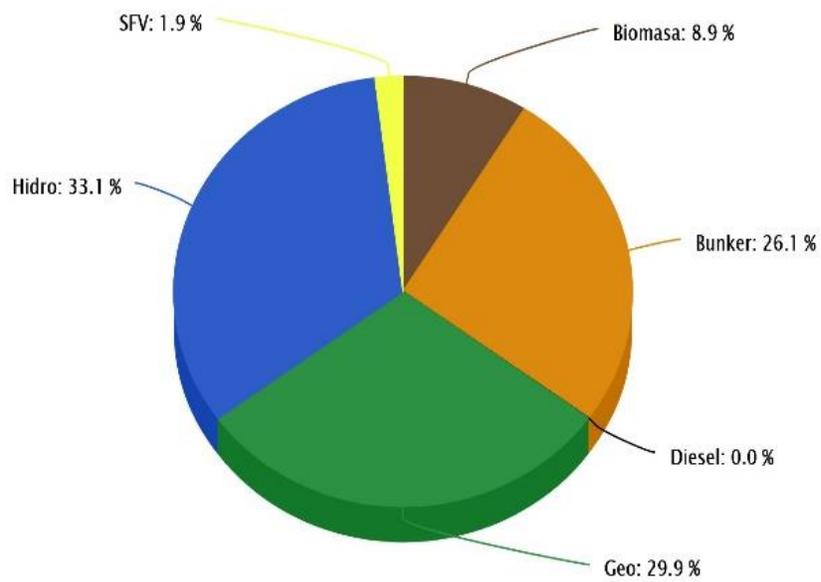


Figura 1.3 Matriz acumulada de El Salvador para los últimos 3 años hasta 2019 (CNE, 2019)

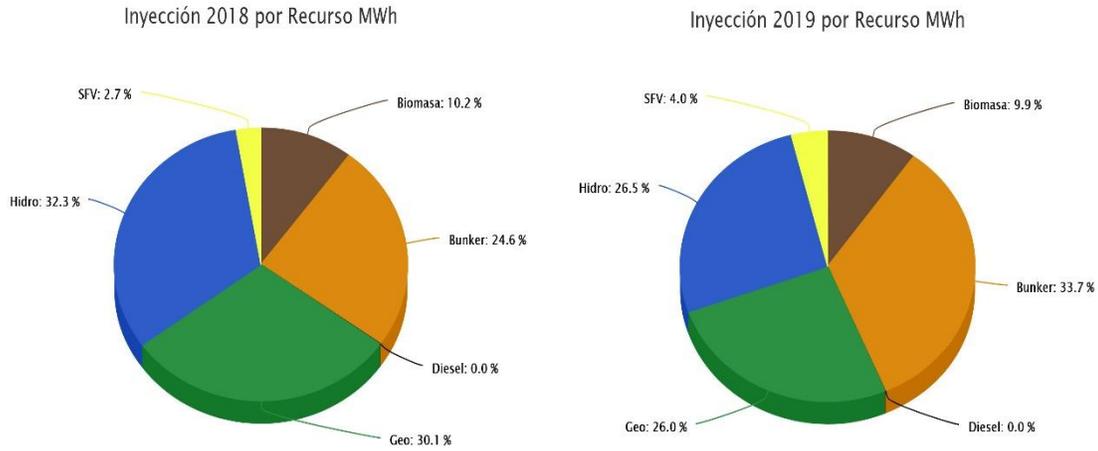


Figura 1.4 Matriz acumulada de El Salvador para los últimos 3 años (cont.) (CNE, 2019)

1.4.1.1. Energía hidroeléctrica

A continuación, se presentan los gráficos de la generación mensual para la matriz de generación de energía eléctrica para diversos años. La siguiente gráfica es la generación en MWh mensual de energía hidroeléctrica desde el año 2014 hasta 2019 (Fig. 1.5).

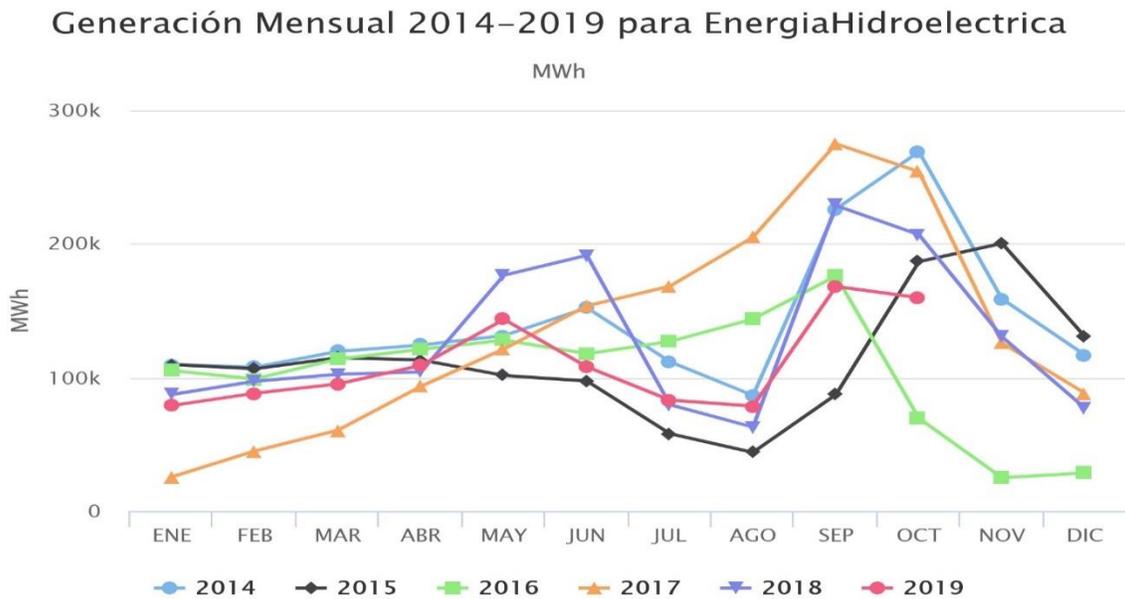


Figura 1.5 Generación mensual en Mwh para energía hidroeléctrica (CNE, 2019)

1.4.1.2. Energía Geotérmica

Generación en mwh mensual de energía Geotérmica desde el año 2014 hasta 2019 (Fig. 1.6).

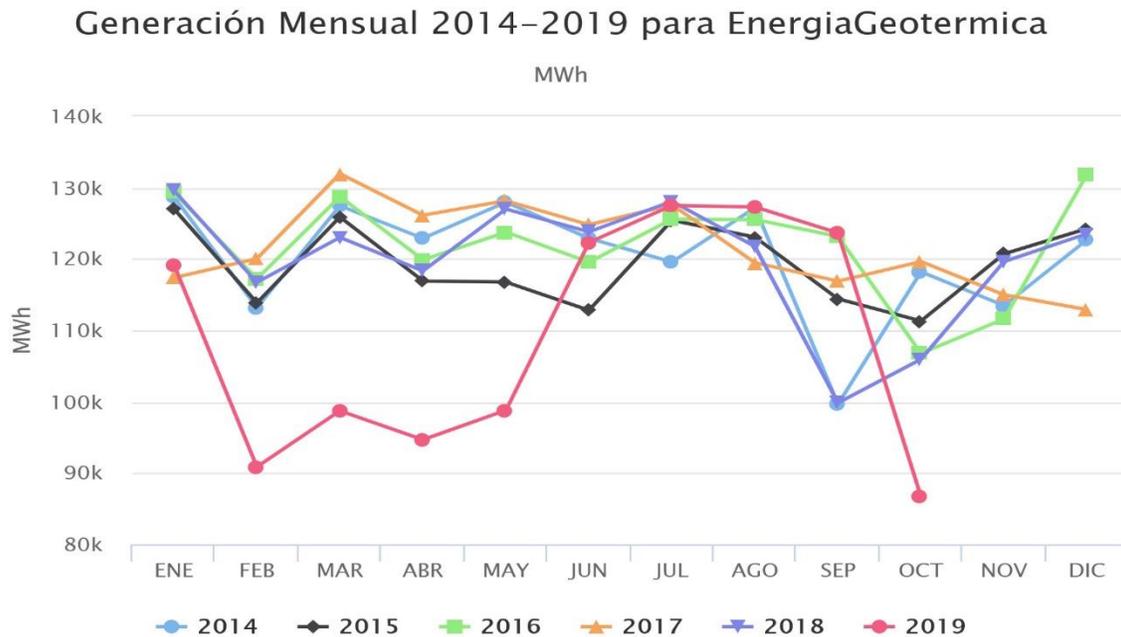


Figura 1.6 Generación mensual en Mwh para Energía Geotermia (CNE, 2019)

1.4.1.3. Diésel

Generación en mwh mensual de energía eléctrica proveniente de diésel desde el año 2014 hasta 2019 (Fig. 1.7).



Figura 1.7 Generación mensual en Mwh para Diesel (CNE, 2019)

1.4.1.4. Bunker

Generación en mwh mensual de energía eléctrica proveniente de bunker desde el año 2014 hasta 2019 (Fig. 1.8).



Figura 1.8 Generación mensual en Mwh para Bunker (CNE, 2019)

1.4.1.5. Biomasa

Generación en mwh mensual de energía eléctrica proveniente de biomasa desde el año 2014 hasta 2019 (Fig. 1.9).



Figura 1.9 Generación mensual en Mwh para Biomasa (CNE, 2019)

1.4.1.6. Energía Solar fotovoltaica

Generación en mwh mensual de energía solar fotovoltaica desde el año 2014 hasta 2019 (Fig. 1.10).

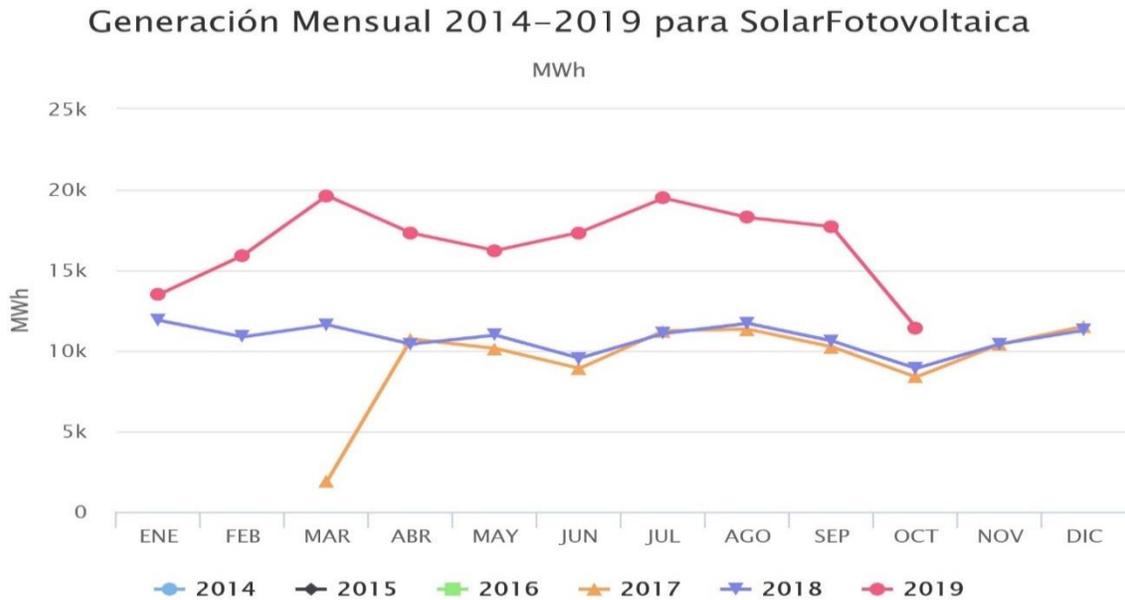


Figura 1.10 Generación mensual en Mwh para Energía Solar fotovoltaica (CNE, 2019)

1.4.1.7. Energías Renovables y no Renovables acumulada desde 2016

En el siguiente grafico se muestra una comparativa de generación entre energías renovables contra energías no renovables (Fig. 1.11).

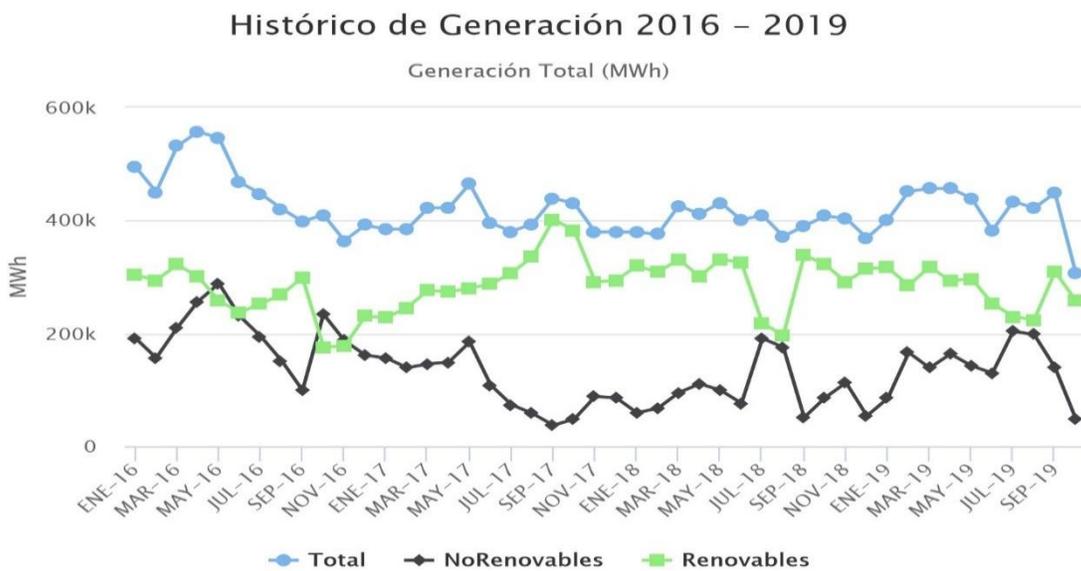


Figura 1.11 Generación en Mwh de energías Renovables y no Renovables (CNE, 2019)

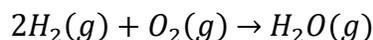
Las gráficas anteriores dejan las siguientes conclusiones:

- a) La energía hidroeléctrica presenta una amplia variación de producción en función de las temporadas de lluvias, sin embargo, es la que más produce y se puede disponer de ella siempre (Figura 1.5).
- b) La energía geotérmica aporta en gran medida sin embargo depende de reservorios que pueden presentar actividades térmicas variantes y se agotaran en pocas décadas, vemos la poca actividad que tuvo en 2019 (Figura 1.6).
- c) El diésel sirve para cubrir necesidades específicas de la demanda, vemos una gran actividad cuando la energía geotérmica e hidroeléctrica baja su generación de energía media (Figura 1.7).
- d) El bunker disminuyó en los últimos 3 años su consumo, justo cuando entraron en crecimiento las energías renovables sobre todo de la de biomasa (Figura 1.8).
- e) La biomasa presenta un incremento de producción todos los años y puede deberse a que los ingenios azucareros que son los que más de esta energía generan aumentan su capacidad de instalada en ese período, sin embargo, estas tendrán un límite de aumento regido por el límite de disposición de bagazo luego de la zafra, siendo solo un momento en el año su máxima capacidad (Figura 1.9).
- f) La producción de energía fotovoltaica es la estadística que por la importancia de su uso en esta investigación es clave su análisis. Vemos que a partir de su generación, la matriz energética aumentó significativamente a 10,000 Mwh en un año y luego en otros 10,000 Mwh el siguiente año y para este año se está disponiendo de otra planta FV por lo que prevé un aumento significativo en otros 10,000 Mwh aproximadamente. Desde que se inyectó este tipo de energía a la red el consumo de energías renovables empezó a crecer y a sustituir paulatinamente al bunker (Figura 1.10).
- g) La última gráfica muestra como las energías renovables aportan significativamente a la matriz energética, estando cerca de tener una matriz energética suficiente para alimentar la demanda actual solo con energías renovables (Figura 1.11).

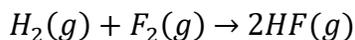
1.5. Hidrógeno y sus aplicaciones

1.5.1. Características generales del hidrógeno

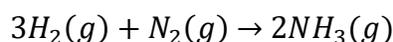
El hidrógeno es un elemento único, que no pertenece a grupo alguno de la tabla periódica. Algunas versiones de la tabla periódica lo colocan como miembro de los metales alcalinos, algunos como miembro de los halógenos; otras lo colocan en ambos lugares; y unas cuantas lo colocan aislado. Al tener una electronegatividad mayor que la de los metales alcalinos y menor que la de los halógenos, es razonable colocar al hidrógeno a la mitad del camino entre los dos grupos. La molécula de hidrógeno (dihidrógeno) es un gas incoloro e inodoro que se licua a -253°C y solidifica a -259°C . El hidrógeno gaseoso no es muy reactivo, en parte a causa de la elevada energía del enlace covalente H-H ($436 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$). Este enlace es más fuerte que los que el hidrógeno forma con la mayor parte de los demás no metales; por ejemplo, la energía del enlace H-S es de sólo $347 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Recuerde que sólo cuando las energías de enlace de los productos son similares a las de los reactivos, o mayores, es probable que ocurran reacciones espontáneas. Una de esas reacciones es la combustión de dihidrógeno con dióxígeno para producir agua. Si hidrógeno y oxígeno gaseosos se mezclan y se produce una chispa, la reacción es explosiva:



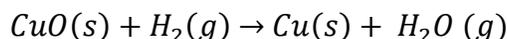
La reacción tiene que ser impulsada por la entalpía porque hay una reducción en la entropía. Si sumamos las energías de enlace, se puede notar que el fuerte enlace O-H ($464 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) hace a la reacción termodinámicamente factible. El dihidrógeno reacciona con los halógenos, y la rapidez de reacción disminuye al bajar en el grupo. La reacción con diflúor es violenta; el producto es fluoruro de hidrógeno:



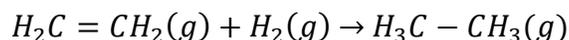
La reacción del dihidrógeno con dinitrógeno es muy lenta en ausencia de un catalizador.



A altas temperaturas, el dihidrógeno reduce muchos óxidos metálicos al metal elemental. Así, el óxido de cobre (II) se reduce a cobre metálico:



En presencia de un catalizador (por lo regular paladio o platino en polvo), el dihidrógeno reduce dobles y triples enlaces carbono-carbono para dejar enlaces sencillos. Por ejemplo, el eteno, C_2H_4 se reduce a etano, C_2H_6 :



Propiedades del Hidrógeno.

- a) Estado. A $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm ($101,325 \text{ kPa}$) está en estado gaseoso.
- b) La temperatura de fusión (1 atm): $-259,2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- c) La temperatura de ebullición (1 atm): $-252,77 \text{ }^\circ\text{C}$.
- d) La masa atómica: $MH = 1,007940 \text{ kg/kmol}$.
- e) La masa molecular: $MH_2 = 2,01588 \text{ kg/kmol}$.
- f) La constante de difusión: $D = 0,61 \text{ cm}^2/\text{s}$.
- g) El calor específico a presión constante: $c_p = 28,623 \text{ kJ}/(\text{kmol K})$.
- h) El calor específico a volumen constante: $c_v = 20,309 \text{ kJ}/(\text{kmol K})$.
(Hortal, 2012).

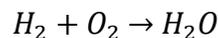
El dihidrógeno como combustible

La reacción del dihidrógeno con el dióxígeno es exotérmica y produce $286 \text{ kJ}\cdot\text{mol}$. Además, su único producto es el agua. Por ello, existe un gran interés por conocer las posibilidades del hidrógeno como combustible. Hasta ahora, la aplicación más importante ha sido los vuelos espaciales. Los tres motores principales de un transbordador espacial utilizan esta reacción, y el tanque de combustible externo contiene más de $5 \times 10^5 \text{ L}$ de oxígeno líquido y cerca

de 1.4×10^6 L de hidrógeno líquido. Puesto que el hidrógeno siempre es el gas de más baja densidad a cualquier presión, se requeriría un volumen enorme de hidrógeno líquido. Puesto que el hidrógeno siempre es el gas de más baja densidad a cualquier presión, se requeriría un volumen enorme de hidrógeno para operar vehículos más convencionales como los automóviles. Transportar hidrógeno como gas comprimido requeriría recipientes con paredes muy gruesas y este requisito incrementaría sustancialmente la masa del vehículo, y por lo tanto el consumo de combustible. El hidrógeno líquido sería más eficiente, pero tiene que almacenarse a una temperatura por debajo -253°C . La evaporación sería un problema grave. La absorción reversible de dihidrógeno se introduce por bombeo en un tanque lleno de una aleación que absorbe hidrógeno. El paso de una corriente eléctrica por el metal libera el hidrógeno gaseoso, que luego se pasa a un motor de combustión interna tradicional. El dihidrógeno al parecer tiene un mayor potencial para almacenamiento y suministro de energía para toda una ciudad. Las horas de máxima producción de los métodos de generación de energía como el viento, el agua y las olas, no coinciden con las horas de máxima demanda. Se necesitan formas de almacenar la energía eléctrica producida a media noche y regenerarla en los periodos de más alta demanda. Esto puede lograrse electrolizando una solución de hidróxido de sodio o de potasio. Si se añade agua a la celda, la producción de gas puede ser continua porque el hidróxido de metal alcalino no se consume en el proceso. El dihidrógeno y dióxígeno se almacenan y luego, cuando aumenta la demanda de electricidad, se puede realizar el proceso inverso en una celda de combustión o una planta termoeléctrica, donde el hidrógeno y el oxígeno gaseosos se recombinan para formar agua, con la liberación de energía eléctrica. Esta tecnología de baterías ya es usada en plantas piloto y trenes a base de electricidad e hidrógeno. (Rayner-Canham, 2000)

1.5.2. Características energéticas

La idea básica de utilizar el H_2 como vector energético radica en su alto contenido energético y en que el residuo de su proceso de combustión es el agua. (Hortal, 2012).



El poder calorífico inferior, PCI (si en la combustión se produce agua vapor) y superior (PCS) (si en la combustión se produce agua líquida) es

PCI=33,35 kWh/kg

PCS=39,41 kWh/kg

Estos valores se pueden comparar con los de otros combustibles (**tabla 1.1**):

Tabla 1.1 Poder calorífico de algunos combustibles (Hortal, 2012)

Sustancia	Poder calorífico (kWh/kg)
Hidrógeno	33,35 (inferior)
Carbono	9,42
Metano	13,9 (inferior)
Gasolina	12,1 (inferior)
Gas-oil	11,9 (inferior)

La obtención del hidrógeno es el punto primero y principal del proceso de utilización de este elemento como vector energético. El hidrógeno no se encuentra libre en la naturaleza, salvo contadas y raras excepciones; sin embargo, es uno de los elementos más abundante porque se encuentra combinado con el oxígeno formando el agua de los mares, ríos, lagos y océanos. También se encuentra en muchos minerales y en los hidrocarburos que son los componentes esenciales del petróleo. Al no existir libre en la naturaleza se deberá obtenerlo a partir de las sustancias que lo contienen. Al hablar de procesos es inevitable referirnos a rendimientos, eficiencias, etc. (Hortal, 2012).

El hidrógeno no es fuente primaria de energía, no es un combustible que se pueda extraer directamente de la tierra como el gas natural. La fuente más común de hidrógeno es el agua y se obtiene por la descomposición química en oxígeno e hidrógeno a partir de la acción de una corriente eléctrica (electrólisis) que puede ser generada por fuentes de energía renovable (solar fotovoltaica, eólica, etc.). Este proceso divide el agua, produciendo oxígeno puro e hidrógeno. El hidrógeno obtenido puede ser comprimido y almacenado en tanques por varios meses hasta que se lo necesite. El hidrógeno representa energía almacenada, se puede quemar como cualquier combustible para producir calor, impulsar un motor, o producir electricidad en una turbina. Lo novedoso de esta tecnología es que la producción de hidrógeno es realizada a partir de fuentes de energías renovables. La celda de combustible utiliza de una manera más limpia y más eficiente el hidrógeno, recombina el hidrógeno y el oxígeno para producir energía eléctrica, obteniendo como único subproducto agua pura. Actúa como un electrolizador funcionando al revés (Brenda Guzmán, 2011).

Las celdas de combustible en la actualidad son mucho más caras que los motores de combustión, pero se espera que se hagan más baratas a medida que se desarrollen nuevas tecnologías. Los sistemas de celda de combustible tienen un costo aproximado de U\$S 5000/kilovatio. El costo tendrá que rebajarse hasta U\$S 1.500 o menos para competir con las otras tecnologías para la generación de energía eléctrica (Hidrógeno y celdas combustibles - Por Richard Engel, Centro de Investigación de Energía Schatz, Arcata, California, EUA y Alejandra Basualto, Universidad de Chile). Son más eficientes que los motores de combustión interna (las celdas de combustible pueden llegar a una eficiencia de 50% para aplicaciones

móviles, mientras que los motores diésel a 35% y los bencineros a 25%) y no generan emisiones tóxicas. Las celdas de combustible de mayor tamaño existentes en el mercado generan cerca de 2 MW de potencia (Brenda Guzmán, 2011).

1.5.3. Aplicaciones del Hidrógeno

Todos los países lo usan en cohertería espacial. Se usa desde hace más de un siglo como reductor de metales (elimina el oxígeno indeseable de los aceros en la colada, al combinarse con el mismo y formar agua). Industria del vidrio, alimenticia (margarinas, etc.), como combustible en motores de combustión interna, FC o Celdas de Combustible, para cromatógrafos como elemento de contraste. Ampliamente usado en la industria petroquímica en múltiples aplicaciones, como obtención de urea (fertilizante), hidrogenación de aceites y combustibles, materias grasas, etc. Una de las más interesantes aplicaciones que se le puede dar al H₂ como combustible limpio es su uso en motores de vehículos terrestres como automóviles, camiones, ómnibus, moto elevadores, locomotoras y en motores de aviones y buques (Brenda Guzmán, 2011).

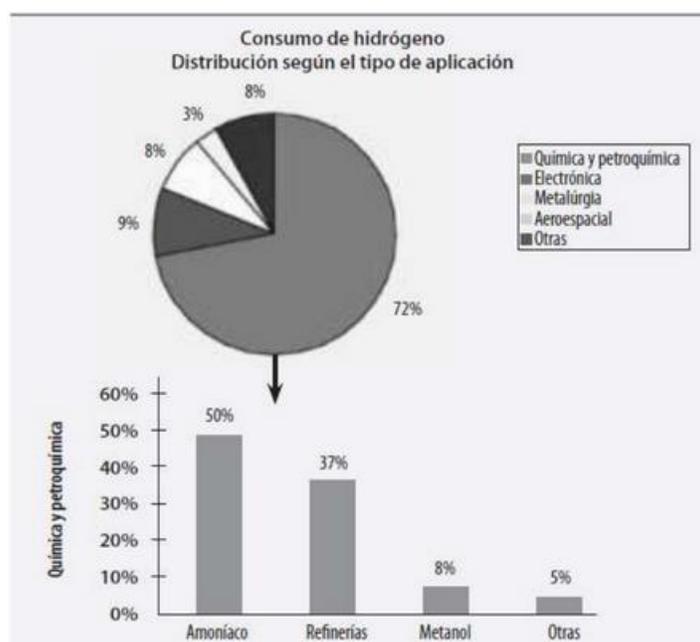


Figura 1.12 Consumo de hidrógeno a nivel mundial (Brenda Guzmán, 2011)

Otro empleo muy apropiado es en la generación eléctrica estacionaria en lugares aislados o en centros urbanos como generación propia o cogeneración, donde por distintos motivos se desee prescindir de la red eléctrica del lugar, sea por seguridad, por calidad del servicio o una combinación de ambos factores. En este caso los generadores más modernos son Celdas de Combustible o motores de combustión interna especialmente adaptados para H₂. Algunas importantes compañías de nivel mundial ya producen motores alternativos diseñados específicamente para H₂ también se plantea su utilización como almacenes de electricidad eólica o solar para utilizarla cuando le conviene a la red y no sólo cuando está disponible, como sucede en la actualidad (Brenda Guzmán, 2011).

1.5.4. Métodos de producción del hidrógeno

El hidrógeno molecular no está presente en reservas naturales convenientes, aunque está en la atmósfera en forma muy poco concentrada. Además, es producido por algunos microbios en un ciclo biológico. La mayoría del hidrógeno en la tierra está en la molécula de agua (H₂O). También está presente en los combustibles fósiles. Éste puede ser producido usando combustibles fósiles a través de reformación de gas natural o de gasificación de carbón. También puede ser producido mediante electrólisis usando electricidad y agua, consumiendo aproximadamente 50 KW/h de electricidad para cada kilogramo de hidrógeno. La energía nuclear puede ser ocupada de varias formas para la producción del hidrógeno. Otra opción puede ser la energía solar (Brenda Guzmán, 2011).

El actual impacto ambiental que genera la producción de hidrógeno puede ser comparado con alternativas, tomando en cuenta no solamente la emisión y eficiencia de la producción de hidrógeno, sino también la de la generación de electricidad a través de las celdas de combustible. Hay un hecho que tiene que ser tomado en cuenta sobre el proceso de consumo de energía en el proceso de manufacturación del hidrógeno. Éste requiere un portador de hidrógeno como el agua o combustibles fósiles. La producción a través de éstos últimos genera dióxido de carbono, mientras que la electrólisis requiere electricidad que en su mayoría es generada usando combustibles convencionales (combustibles fósiles o energía nuclear). Fuentes de energías alternativas o renovables como el viento, la energía solar o la biomasa pueden ser usadas, sin embargo, son más caras que las convencionales (Brenda Guzmán, 2011).

A continuación, se comparan los procesos de generación de hidrógeno.

Electrólisis: La electrólisis podría ser el casi único enlace práctico entre las energías renovables y el hidrógeno. Las energías solar, eólica, atómica e hidráulica pueden ser ocupadas para generar hidrógeno sin contaminar el medio ambiente. El proceso que se ocupa para esto es la electrólisis. La electrólisis genera hidrógeno a partir de agua y energía eléctrica.

Reformación de Gas Natural: La reformación de gas natural es el método más eficiente para la generación del hidrógeno. En estos momentos es el más usado debido a esto y a su bajo costo en comparación con la electrólisis. El método consiste en extraer el hidrógeno del gas natural a través de procesos químicos. El problema de este método es que se emiten gases contaminantes como el dióxido de carbono

Biomasa: La biomasa es una opción de generación relativamente eficiente. Mediante procesos parecidos a la reformación de gas natural se puede llegar a eficiencias bastante altas, cercanas al 80%, sin embargo, al igual que en la generación a través de gas natural, no es evitable la emisión de CO₂ (Brenda Guzmán, 2011).

Tabla 1.2 Comparación en los métodos más comunes de producción del hidrógeno

Modo de generación	Descripción
Electrólisis	<ul style="list-style-type: none"> a) Se puede producir a partir de energías renovables que generen energía eléctrica b) Se evita la emisión de CO₂ c) Materia prima el agua
Reformación del gas natural	<ul style="list-style-type: none"> a) Método más eficiente de generación en términos de producción b) De más bajo costo c) Generación alta de CO₂ en su producción
Biomasa	<ul style="list-style-type: none"> a) Eficiencias altas de producción, pero no tan altas como el reformado de gas natural b) Generación alta de CO₂ c) Parte de una fuente de energía renovables

1.6. Generación de energía eléctrica por paneles solares

1.6.1. Principios del efecto fotovoltaico

Las celdas solares convierten directamente la luz solar en electricidad, debido al efecto fotovoltaico. La luz está compuesta de fotones con diferentes energías. Cuando un fotón con energía suficiente choca con un átomo de algún material, por ejemplo, el silicio, el átomo absorbe la energía del fotón y un electrón del material queda en un estado excitado por la energía absorbida, lo que permite, en algunos casos, que se mueva libremente. Si en lugar de uno son varios los electrones que circulan libremente, puede producirse una corriente eléctrica bajo ciertas condiciones y, por lo tanto, generarse electricidad a partir de energía solar. Para producir el efecto fotovoltaico se utilizan materiales semiconductores, es decir, aquellos que no son buenos conductores de la electricidad, como el cobre y la plata, y que tampoco sean buenos aislantes, como el corcho o la cerámica. Un ejemplo de semiconductor son los materiales que se emplean en los transistores que posee cualquier radio. El silicio, por ejemplo, es un material semiconductor. En los materiales semiconductores existe una región que separa a la banda de valencia, en la cual los electrones están ligados al núcleo atómico, de la banda de conducción, en la que los electrones pueden circular libremente. Dicha región se denomina banda prohibida. En los materiales aislantes ésta es mayor de 5 eV (electrón-volt) y en los semiconductores, como el silicio es de 1.1 eV. Para lograr la conducción se requiere que los electrones de la banda de valencia pasen a la de conducción, y una forma de lograrlo es que los fotones de los rayos solares proporcionen la energía que se requiere para que los electrones salten la banda prohibida. Si a un material semiconductor se le introduce una pequeña proporción de otro material, lo cual se denomina una impureza, se puede conseguir que se tenga un electrón de más o de menos en la banda prohibida. Si esto ocurre cerca de la banda de conducción, el material se denomina tipo n (por negativo). Y si el electrón de más o de menos está cerca de la banda de valencia, el material se llama tipo p (por positivo). Al juntar un semiconductor tipo n con uno tipo p, se presenta el efecto fotovoltaico, es decir, habrá un flujo de huecos (falta de electrones) hacia el lado del semiconductor n y uno de electrones hacia el lado del semiconductor p. Los fotones provenientes del Sol llegan a la

celda solar y la radiación absorbida generará electrones en la banda de conducción y huecos en la de valencia. Con ello, se generará una corriente eléctrica del lado positivo al negativo y habrá un voltaje. De esta forma, si se conecta una resistencia entre los dos electrodos (positivo y negativo) se presentará un flujo de corriente. En resumen, cada celda solar tiene tres capas y dos electrodos. La capa que está expuesta al Sol debe aprovechar al máximo la radiación solar por unidad de área y por esta razón el electrodo negativo está formado por pequeñas tiritas de un material conductor (pág. 28-32, Brenda Guzmán, 2011).

1.6.2. Funcionamiento de los paneles solares

El funcionamiento de los paneles solares se basa en el efecto fotovoltaico, que se produce cuando, sobre materiales semiconductores convenientemente tratados, incide la radiación solar produciendo electricidad. En el momento en que queda expuesto a la radiación solar, los diferentes contenidos en la luz transmiten su energía a los electrones de los materiales semiconductores. Estos, en ese momento, pueden romper la barrera de potencial de la unión P-N y salir así del semiconductor a través de un circuito exterior. Estas células fotovoltaicas se combinan de muy diversas formas para lograr tanto el voltaje como la potencia deseados. De este modo, se puede conseguir que la energía solar se acabe convirtiendo en energía que se puede consumir. No en vano, entendemos por célula fotovoltaica al módulo más pequeño de material semiconductor con unión P-N y con capacidad igualmente de producir electricidad. Mientras, el panel fotovoltaico es el conjunto de células sobre el soporte adecuado y que posee los recubrimientos que le protegen de agentes atmosféricos (Ruiz G. , 2020).

1.6.3. Incidencia solar en El Salvador y potencial fotovoltaico

Constantemente se están desarrollando mejores tecnologías para aumentar la eficiencia de la electrólisis del agua para separar sus moléculas constituyentes en oxígeno e hidrógeno y de esta manera utilizar el hidrógeno como combustible o como generador de energía eléctrica directamente en una pila de hidrógeno. Estos dos usos benefician al medio ambiente y a las energías renovables ya que al usarlo como combustible sustituye a los derivados del petróleo evitando las emisiones de gases de efecto invernadero y al usarlo como fuente de energía eléctrica con una pila de hidrógeno se puede evitar el uso de baterías que generen contaminantes cuando su vida útil se ve terminada. Inevitablemente se tiene que clasificar el hidrógeno como una fuente secundaria de energía debido a que necesita de energía eléctrica o solar si se quiere obtener mediante un proceso que no involucre el reformado de derivados del petróleo para obtener hidrógeno. La utilización de energía eléctrica proveniente de la red eléctrica instalada para el caso de la electrólisis y el uso de materiales sofisticados y caros para hacer la separación de los átomos del agua mediante un proceso foto catalítico (solo con energía solar sin necesidad de energía eléctrica) ocasionan una viabilidad económica escasa para la implementación de este tipo de tecnología. Las tecnologías actuales involucran el uso de paneles solares para obtener parte de la energía eléctrica necesaria para la electrólisis, así como el uso de materiales catalizadores de elevado costo como electrodos de Platino, Iridio y otros, ya sea como catalizadores en el proceso de electrólisis o como catalizadores en el proceso de separación foto catalítica. La principal materia prima para este proceso es el agua la cual al estar pura necesita de un electrólito para poder conducir energía eléctrica si se quiere seguir el proceso de electrólisis lo que ocasiona que se requiera una inversión en agua para esta implementación. Como se ha demostrado en capítulos anteriores el hidrógeno ya

ha sido investigado respecto a su producción mediante la utilización de energías renovables con el potencial fotovoltaico la cual por motivos de inicio del desarrollo comercial que los paneles solares tienen ese enfoque se veía poco rentable, sin embargo a la actualidad las tecnologías han evolucionado en eficiencia y reducción de precios por lo que es pertinente traer a este marco las ventajas y desventajas que presenta el aprovechamiento de la energía solar y sobre todo para ser aplicada en la electrólisis del agua para la producción de hidrógeno (Brenda Guzmán, 2011).

En las figuras siguientes se puede observar como en el país existe una ventaja de incidencia solar frente a otros países en la región centroamericana lo que indica que El Salvador es propenso a poder desarrollar en gran manera el potencial de explotación solar que posee y daría un incentivo para producir hidrógeno a partir de este tipo de energía (SOLARGIS, 2019).

Las siguientes dos imágenes (**figura 1.13 y figura 1.14**) pueden interpretarse según los conceptos de radiación directa, horizontal y potencial fotovoltaico. En la primera imagen observamos la radiación solar horizontal la cual es aquella que es mayor en verano por no haber difusión ni reflexión de la radiación, en otras palabras, en la época donde naturalmente el sol irradia más al no haber nubosidades, no hay formación de nieve en las montañas ni crecimiento de cuerpos de agua como ríos lagos y otros, lo cual representa una amplia ventaja de temporadas frente a otros países. En la segunda imagen observamos la radiación directa en Centro América que muestra que El Salvador se encuentra en un área donde el sol irradia muchos más que en el territorio de otros países incluso más que Costa Rica quien tiene una gran cantidad de producción de energías renovables (CNE, 2019).

En las siguientes tres imágenes a partir de la **figura 1.15** hasta la **figura 1.17** después de ver las de Centro América, están representadas la situación de irradiación de El Salvador. En la primera observamos el amplio potencial fotovoltaico que tiene el país pudiendo aprovechar hasta 5 KWh/m² en la zona del norte de Santa Ana y de hasta 4.8 KWh/m² en la zona central del país. Hay que recordar que entre más alto este el terreno mayor es la incidencia solar sin embargo también el terreno tiene que ser lo más llano posible esa es la razón por la que las zonas montañosas no poseen la misma radiación solar que una planicie. Los últimos dos mapas explican el porqué de ese potencial ya que en la irradiación solar directa muestra como los lugares con mayor potencial reciben más energía y en el mapa de irradiación solar horizontal se ve representado como en verano las planicies se ven afectadas. Cabe destacar que oriente recibe cantidad considerable mayor de irradiación por ser terreno llano, estar cerca del mar (reflexión), y estar más cerca del ecuador, lo cual reuniendo esos factores podemos observar que la radiación llega hasta los 6.2 KW/m². Durante el invierno el sol tiene menor incidencia en la radiación horizontal pero la radiación difusa cobra mayor importancia ya que si un panel solar está colocado en dirección sur en un día nublado puede recibir hasta 1.5 veces más de radiación que un panel solar a plena 12 horas del mediodía, pero nublado. La dirección sur se debe a que nosotros nos encontramos en latitud norte del planeta por lo que para lograr la mayor cantidad de rayos difusos de rayos provenientes del sol se direcciona al centro del planeta (el Ecuador), que se encuentra al sur de nuestro país. Esto sirve para ser tomado en cuenta en una estación fotovoltaica permanente o una simple instalación residencial para uso reducido (CNE, 2019).



Figura 1.14 Mapa de incidencia solar normal Centro América

Fuente: (SOLARGIS, 2019)



Figura 1.13 Mapa de incidencia solar horizontal Centro América

Fuente: (SOLARGIS, 2019)

SOLAR RESOURCE MAP

PHOTOVOLTAIC POWER POTENTIAL EL SALVADOR

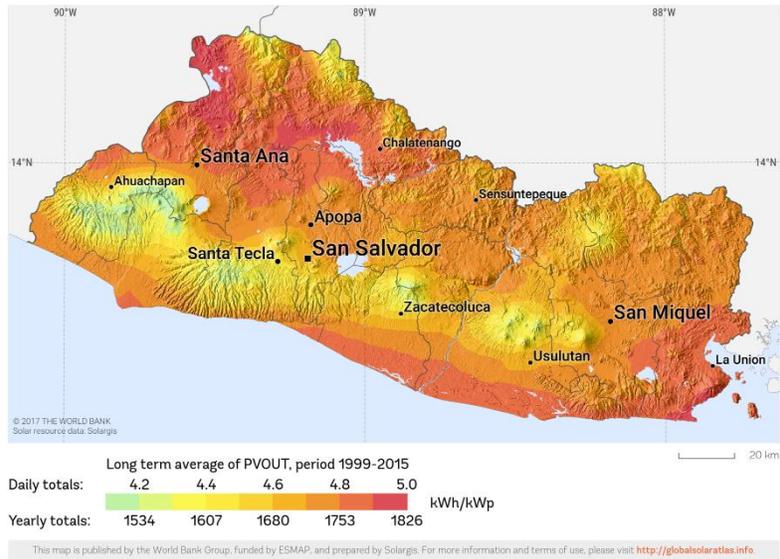


Figura 1.15 Potencial Fotovoltaico EL Salvador
Fuente: (SOLARGIS, 2019)

SOLAR RESOURCE MAP

DIRECT NORMAL IRRADIATION EL SALVADOR

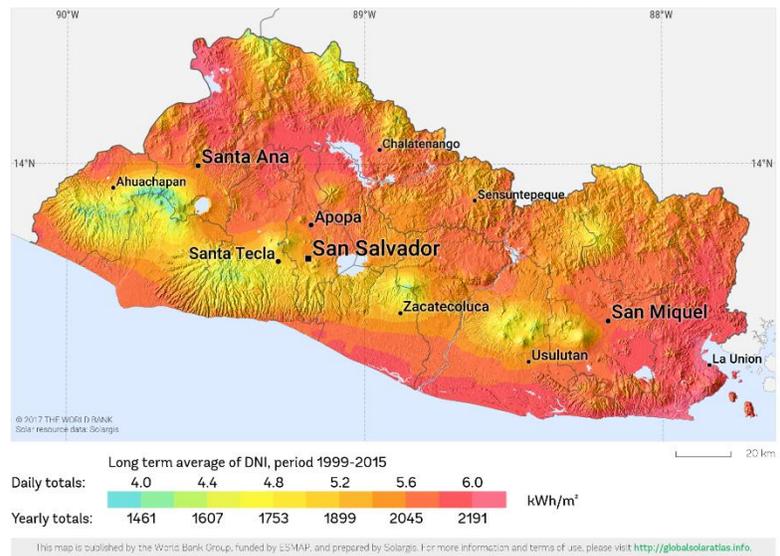


Figura 1.16 Irradiación Normal Directa
Fuente: (SOLARGIS, 2019)

GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION EL SALVADOR

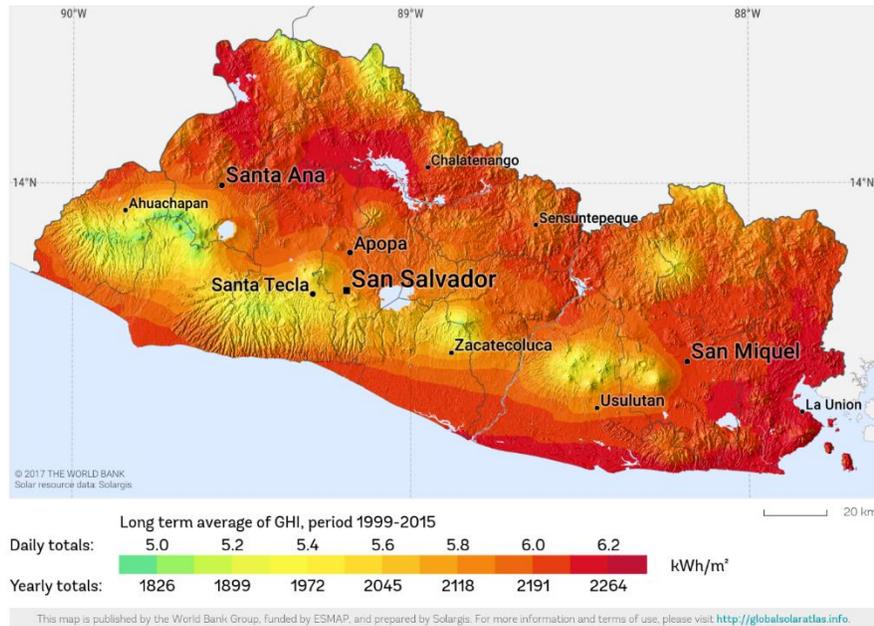


Figura 1.17 Irradiación Solar Horizontal El Salvador

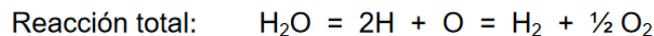
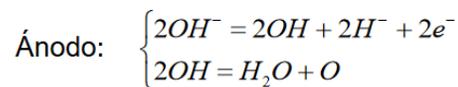
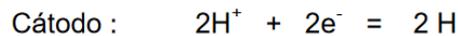
Fuente: (SOLARGIS, 2019)

Finalmente repasando las tecnologías actuales que aprovechan el hidrógeno producido; estas tecnologías abarcan dos grandes usos las cuales son usar el hidrógeno como fuente de combustible para generar energía calorífica o energía mecánica y usar el hidrógeno como batería al incorporarla a una pila de hidrógeno para producir energía eléctrica la cual puede ser usada para luego producir otros tipos de energía según se requiera. En el caso de ser utilizado como fuente de combustible para calor, actualmente se utiliza para ser quemado en calderas como una mezcla con otros gases combustibles o como gas puro lo cual no es del todo viable económicamente hablando ya que el hidrógeno es una energía secundaria y necesita de otro tipo de energía para ser producido, de la misma forma se utiliza para soldaduras debido a su alto poder calorífico; en el caso de ser usado como combustible para generar energía mecánica existen motocicletas y carros cuyos motores de combustión están acoplados para trabajar con hidrógeno y el problema en estos casos es que no se produce hidrógeno en cualquier parte para que estos transportes puedan ser recargados lo que limita al usuario no alejarse de las fuentes de recarga; en el caso de que el hidrógeno es utilizado como sustituyente a una pila para tener energía eléctrica los equipos constan de una membrana semipermeable y un catalizador para arrancar los electrones del átomo de hidrógeno para recolectarlos en un circuito eléctrico que aproveche esta corriente como lo es un motor eléctrico que pone en marcha un transporte como un carro de motor eléctrico una motocicleta e incluso un barco o un tren como es el caso de Alemania.

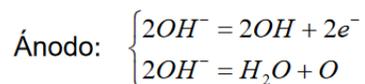
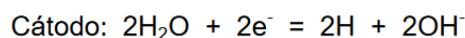
1.7. Electrolización del agua para obtener hidrógeno

1.7.1. Condiciones para que ocurra la electrólisis

Si se examina la Reacción Electroquímica primaria para la obtención de Hidrógeno y Oxígeno, el compuesto que se electroliza es el agua. Sin embargo, agua pura no se puede utilizar como fuente electrolítica, debido a su muy pequeña conductividad. Por lo cual se adiciona a ésta, determinadas cantidades de un Ácido Oxácido o de una base. La Tensión de Descomposición de la mayoría de los Ácidos Oxácidos y de las Bases, colocadas entre dos electrodos de platino, es alrededor de 1.69 Voltios. Esto indica que la reacción total debe ser la misma, cual quiera que sea el soluto. Las pequeñas diferencias observadas son atribuidas a pequeñas diferencias en las sobretensiones de las semirreacciones, las cuales si dependen del soluto. En una solución acuosa de un Ácido Oxácido o de una Base, siempre estarán presentes tres especies iónicas: Hidrógenos y Oxhidrilos en ambos casos, y en el anión del Ácido o el Catión de la base en cada uno. Las reacciones en una solución ácida serán las siguientes (Mendoza, 2004):



Las reacciones en una solución alcalina son las siguientes (Mendoza, 2004):



En consecuencia, los productos finales de la reacción son los mismos, independientemente del pH de esta. El único electrólito que es considerado en la producción electrolítica industrial de Hidrógeno y Oxígeno es el Hidróxido de Sodio; en menor escala se considera el Hidróxido de Potasio. La tendencia a usar soluciones básicas se debe sobre todo a que su ataque sobre los materiales de construcción de las celdas, (recipientes, electrodos y diafragmas), es menor que el ataque ácido. Lo anterior se prefiere, a pesar de que la conductividad obtenida con un electrólito alcalino es considerablemente menor que la obtenida con un electrólito ácido, (Ácido Sulfúrico, por ejemplo). A pesar también de que la soda cáustica, cuando se usa en celdas abiertas, tiende a reaccionar con el Dióxido de Carbono de la Atmósfera acumulando Carbonato de Sodio en el electrólito, el cual disminuye aún más la conductividad del baño y ocasiona condiciones de corrosividad sobre los materiales de construcción (Mendoza, 2004).

1.7.2. Condiciones para que operen las celdas

Se pueden resumir en las siguientes, las condiciones de operación de las celdas, que deben ser cuidadosamente definidas a efecto de mantener lo más bajo posible el voltaje de la celda para tratar de tener el menor consumo de energía posible:

- a) La elección de los materiales de electrodos. Estos deben ser seleccionados de tal manera que tengan buena resistencia a la acción del electrólito y a la acción del gas. Lo anterior se traduce en disminución de pérdidas de energía debidas a sobretensión.
- b) A mayor temperatura de operación, la sobretensión y la resistencia específica del electrólito se hace menor.
- c) Se debe determinar correctamente la concentración del electrólito. Se deben determinar las concentraciones y las temperaturas de los electrólitos de tal manera que, a concentración y temperatura determinadas, se obtenga la máxima conductividad específica. Las temperaturas normales de operación oscilan entre 70 y 80°C. Para estas temperaturas, las conductividades de los Hidróxidos de Sodio y Potasio muestran un máximo a concentraciones de 25 % y 27-50 % respectivamente. A esta temperatura y en las concentraciones citadas, la resistencia es la misma para ambos electrólitos. Los problemas de corrosión son también aproximadamente iguales. Lo anterior quiere decir que las ventajas de utilizar Soda o Potasa son iguales. Sin embargo, a pesar de que su precio es mayor, la Potasa presenta la ventaja de que su presión de vapor en las concentraciones indicadas es menor que la presión de vapor de la Soda a 23% ambas a la misma temperatura de operación. Esta ventaja se manifiesta en que usando potasa se reducen los problemas de recuperación de condensados en las corrientes gaseosas, disminuyendo los costos del agua destilada o desmineralizada utilizadas en la electrólisis, pues se disminuyen las pérdidas de agua.
- d) Se debe tratar de que el desprendimiento de gases y burbujas de vapor sea rápido.
- e) La distancia entre electrodos debe ser elegida convenientemente para disminuir la resistencia interna de la celda. Este está en conexión con la condición anterior de desprendimiento de gases en los electrodos (Mendoza, 2004).

1.7.3. Tipos de celdas

1.7.3.1. Electrolizadores PEM

La electrólisis PEM (PEME) es también conocida como SPE: «Solid Polymer Electrolyte» o PEM: «Polymer Electrolyte Membrane», representan un sistema que incorpora una membrana sólida conductora de protones, la cual no es conductora de electricidad. El agua de alimentación requerida para el proceso de electrólisis puede ser suministrada en cualquiera de los electrodos. La configuración principal de un PEME se muestra en la **Figura 1.18** Además de la celda electrolítica, un electrolizador debe tener una fuente de alimentación con regulador de tensión, un sistema de almacenamiento de agua, bomba de circulación de agua, separadores agua-gas para hidrógeno y opcionalmente para oxígeno, intercambiador de calor, controles e instrumentación, incluidos los de seguridad. La electrólisis del agua basada en electrolizadores PEM, ofrece una serie de ventajas, tales como la seguridad ecológica, la alta pureza del gas (más del 99,99 % para el hidrógeno) y la posibilidad de producir gases com-

primidos (hasta 200 bar) de presión para el almacenamiento directo sin necesidad de consumos de energía adicionales. Los electrolizadores PEM se consideran los dispositivos más atractivos para acelerar la transición hacia la economía del hidrógeno. En los electrolizadores (PEM), el electrolito alcalino es reemplazado por una membrana de intercambio de iones (indicado en color verde en la **Figura 1.18**), que hace las veces de separador y de electrolito participando de forma activa en el proceso de disociación de la molécula de agua, lo cual simplifica el diseño significativamente como se puede apreciar a continuación, en donde también se observa como el oxígeno se produce en la pared del ánodo y el hidrógeno en la pared del cátodo (Viviana A. Venturino, 2011).

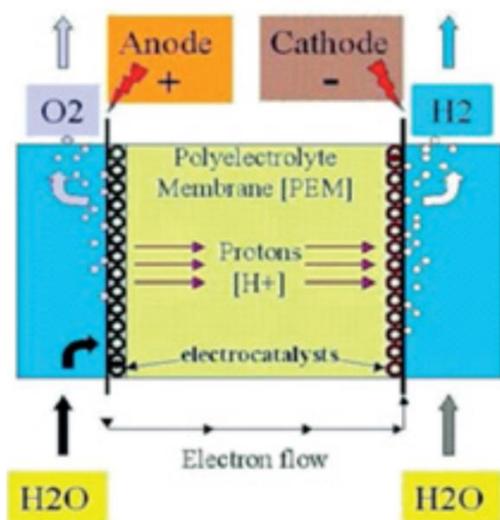


Figura 1.18 Configuración de un electrolizador PEM

Fuente: Viviana A. Venturino, M. V. (2011). Caracterización de electrolizadores.

El rendimiento del sistema anterior es una función principalmente del comportamiento de la membrana y los catalizadores. Esto resulta crucial bajo operación a alta densidad de corriente, lo cual es necesario para aplicaciones a escala industrial. Estos electrolizadores pueden trabajar a varias centenas de bares (Viviana A. Venturino, 2011).

1.7.3.2. Electrolizadores alcalinos:

Un electrolizador alcalino emplea una solución alcalina, normalmente hidróxido de potasio (KOH) o Hidróxido de Sodio (NaOH), como electrolito. En la configuración monopolar las celdas electrolíticas están conectadas eléctricamente en paralelo, los cátodos de todas las celdas electrolíticas están conectados entre sí y al igual que los ánodos, pero tanto ánodos como cátodos están físicamente separados (ver **figura 1.19**). La configuración bipolar es aquella en que las celdas electrolíticas están conectadas en serie, el ánodo de una celda se conecta al cátodo de la siguiente celda, es esta configuración el ánodo y el cátodo se montan juntos separados por un aislante eléctrico usualmente cerámico, es la configuración que suelen usar

los electrolizadores que operan a sobrepresión (ver **Figura 1.20**). La **Figura 1.21** muestra la configuración básica de una celda electrolítica alcalina. Así, ánodo y cátodo se encuentran separados por un diafragma cerámico o de poli sulfonato, el cual permite fluir a la corriente, pero es impermeable a los gases. La celda está llena de un electrolito. Durante la electrólisis, se forma oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo. Los iones hidroxilo y el ion metálico disueltos en el agua atraviesan el diafragma portando la carga eléctrica. Cuando un ion hidroxilo llega al ánodo se separa en agua líquida y oxígeno gaseoso liberando un electrón que es recogido por el ánodo debido a la diferencia de potencial inducida por la fuente de tensión continua colocada entre los electrodos. Los electrones, cuando llegan al cátodo se combinan con las moléculas de agua líquida separándolas en hidrógeno gaseoso e iones hidroxilo que se ven obligados a migrar otra vez hacia el ánodo por la acción del campo eléctrico (Viviana A. Venturino, 2011).

En resumen, las configuraciones Unipolar y Bipolar se podrían definir como:

- a) **Conexión Unipolar de Electrodo**s. Los electrodos funcionan exclusivamente como ánodos o como cátodos. En consecuencia, todos los cátodos están conectados a una sola barra conectada al polo negativo y todos los ánodos están conectados a otra sola barra conectada al polo **positivo**.

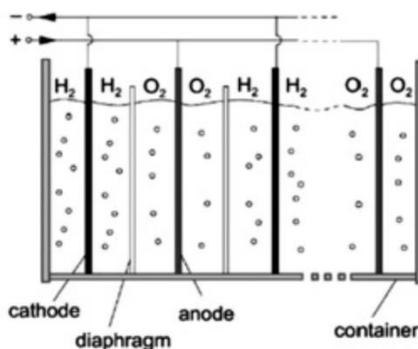


Figura 1.19 Conexión Unipolar del electrolizador alcalino
 Viviana A. Venturino, M. V. (2011). Caracterización de electrolizadores.

- b) **Conexión Bipolar de Electrodo**s. Hay un número de electrodos en cada celda, los cuales actúan como ánodos por un lado y como cátodos por el otro. Los únicos electrodos que están conectados a la fuente de energía son los electrodos terminales.

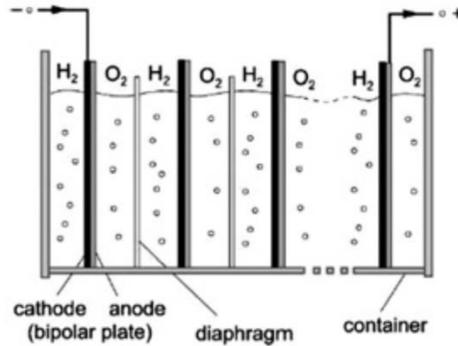


Figura 1.20 Conexión Bipolar del electrolizador alcalino
 Viviana A. Venturino, M. V. (2011). Caracterización de electrolizadores.

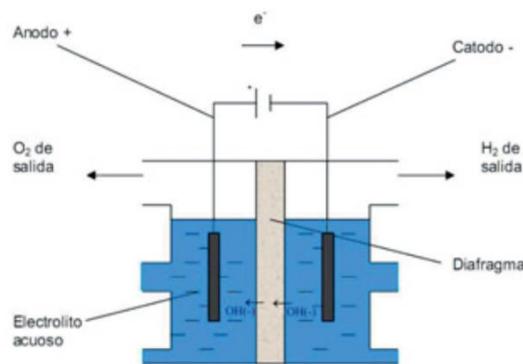


Figura 1.21 Funcionamiento de un electrolizador alcalino
 Viviana A. Venturino, M. V. (2011). Caracterización de electrolizadores.

Ventajas de las Conexiones Unipolares y Bipolares

- a) Las conexiones Bipolares en Filtros Prensa necesitan menos espacio para una capacidad de producción y consumo de energía determinados.
- b) Las conexiones Bipolares proporcionan circulaciones más activas del electrolito, de tal manera que la densidad de la corriente puede considerarse mayor.
- c) Las conexiones Bipolares, debido a sus mayores densidades de corriente, son más adecuadas cuando la producción de Hidrógeno va asociada con la producción de agua pesada, debido a que la separación de Deuterio y Tritio es mayor a densidades de corriente mayores.
- d) Las conexiones bipolares en Filtros-Prensa permiten operaciones a presiones por encima de la atmosférica; de tal manera que no se necesitan reforzadoras para compensar las pérdidas de presión a través de las líneas de descarga de gases.
- e) Las conexiones Bipolares disminuyen en un mínimo las pérdidas por evaporación y la acción del Dióxido de Carbono Atmosférico sobre el electrolito. Este problema es patente en las Celdas Unipolares tipo Campana, donde el sello de agua formado por la campana provoca inevitables pérdidas por evaporación y permiten

la acción del CO₂ atmosférico sobre el electrolito.

- f) Las conexiones bipolares, disminuyen las pérdidas de voltaje ocasionadas por las demasiadas ramificaciones en las conexiones unipolares; pues en las bipolares, solamente están conectados a las fuentes los electrodos terminales, mientras que, en las unipolares, cada bus conecta con cada electrodo. En la práctica lo anterior se traduce en ahorro de material de cableado, (cobre) (Mendoza, 2004).

1.7.4. Características de los elementos de la celda

Algunas de las características más importantes para tomar en cuenta en la mayor parte de celdas son:

- a) Celdas: Construidas generalmente de Acero
 - b) Ánodos: Construidas generalmente de aleaciones Ni-Ag
 - c) Cátodos: Construidos generalmente de Acero, Algunas veces, el Acero es recubierto con una capa de Cobalto, pero esto no justifica su alto costo con respecto a las ventajas obtenidas.
 - d) Diafragmas; Construidos generalmente de Asbestos, Algunas veces, el asbesto se refuerza con una malla de Ni.
- (Mendoza, 2004).

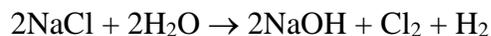
1.7.5. Resultados característicos de la electrólisis

Las sustancias envueltas en una electrólisis típica son:

- a) Hidrógeno: Se obtiene Hidrógeno de una pureza de 99.5 –99.9%. Se acompaña de cantidades relativamente pequeñas de vapor de agua.
 - b) Oxígeno: Se obtiene Oxígeno de una pureza de 98 -99.8%. Se acompaña generalmente de cantidades pequeñas de vapor de agua.
 - c) Electrolito: Soda o Potasa Cáustica. Muy pocas veces. Ácido Sulfúrico. El agua utilizada es Agua Destilada o Agua Desmineralizada, A medida que transcurre la operación hay un enriquecimiento de esta agua en Deuterio.
- (Mendoza, 2004).

1.8. Electrólisis de salmuera

La electrólisis de la Salmuera tiene lugar de acuerdo a la reacción siguiente:



Para la descomposición electrolítica de 58.5 gramos de ClNa en 35.5 gramos de Cloro y 25 gramos de Sodio se necesitan 96500 Coulombios, o lo que es lo mismo, 96500 amp-seg. El potencial de descomposición necesario es de 2.21 voltios, que resultan de la suma de los potenciales aislados de Cloro en Cloruro y de Hidrógeno en Álcali respectivamente: $1.59 + 0.82 = 2.21$ voltios De lo anterior se deduce que para separar un equivalente de Cloro se necesitan: $96500 \text{ amp-seg} \times 2.21 \text{ voltios} = 215265 \text{ Watt-seg} = 215 \text{ Kw-seg}$ Para separar en consecuencia 1.00 kg. de Cloro se necesitan: $215 \text{ Kw-seg}/35.5 \text{ grs. Cloro} \times 1000 \text{ grs.}$

Cloro/Kg. Cloro x 1 Kw-hr/5600 Kw-seg= 1.66 Kw-hr/Kg. Cu Como se sabe, este valor es menor que el necesario para la práctica, debido principalmente a los factores de: Sobretensión y Rendimiento de Corriente, el cual es menor que 10056 debido a la eficiencia de los rectificadores y a la gran capacidad de reacción de los iones Cloro y Sodio, los cuales, al separarse, provocan reacciones secundarias que hacen posible la formación de los productos principales. Cloro y Lejía Sódica (Mendoza, 2004).

1.8.1. Proceso Anódico y proceso catódico

Los procesos anódico y catódico en las celdas Cl-Soda son afectados por los materiales utilizados como electrodos, la concentración del electrólito, la pureza del electrólito, la densidad de corriente, la construcción de las celdas y otros factores. En el ánodo se descarga Cloro, y en condiciones favorables, puede reaccionar con el agua para formar iones ClO⁻ o HClO libre, el cual, por oxidación espontánea formara Cloritos, Cloratos y Oxígeno. La electrólisis puede verificarse en dos tipos de Celdas: a) Celdas de Diafragma (Hooker, Allen-Moore, Vorce) b) Celdas con Cátodo de Mercurio (Sorensen, Krebs, Castner) En las celdas de Mercurio, los iones Sodio se descargan catódicamente, formando aleaciones catódicas. En las celdas de diafragma con cátodo metálico, el hidrógeno se descarga preferentemente al sodio, debido al bajo valor del sobrevoltaje de hidrógeno con dicho material catódico, y consecuentemente, hay evolución de gas Hidrógeno. Los iones Sodio y los iones oxhidrilos remanentes de la ionización del agua por el desprendimiento del hidrógeno, se unen para formar el producto catódico, NaOH. Si una solución de Cloruro de Sodio se electroliza bajo condiciones tales que la densidad de corriente a los electrodos se mantenga constante (se regula el voltaje para mantener dicha condición), los productos de electrodo se mantienen separados, y no se hacen adiciones de sal, habrá formación de Hipoclorito. El ion Cloro disminuye en concentración debido a que forma la molécula de Hipoclorito aumentando la concentración de este último. El Ácido Hipocloroso está solo ligeramente ionizado, (constante de ionización igual a 3.7×10^{-8} a 20°C). Si la corriente se mantiene, se necesitarán mayores voltajes de celda y mayores polarizaciones anódicas, el ion Hipocloroso se descargará, habrá evolución de Oxígeno y se formarán Cloratos (Mendoza, 2004).

A medida que la concentración del ion Cloro disminuye, con electrólisis continuada, mayores proporciones de corriente serán utilizadas en la producción de Cloratos. La alta movilidad iónica del ion Hidrógeno causará su rápida migración del área anódica, de tal manera que la acidez, ayudada por la formación del Ácido Hipocloroso, se mantendrá baja. El incremento de la evolución de oxígeno, puntos críticos de descarga del ion Oxidriilo, y otra serie de fenómenos asociados, como los citados en el párrafo anterior, hacen que las condiciones teóricas y de operación de una electrólisis de salmuera, sean de muy grande complejidad. Ello puede verse en la figura siguiente (1.22), donde se muestra el curso de una típica electrólisis de salmuera en solución neutra, con un electrólito formado por una solución saturada de ClNa a la cual se le agrega 0.2% de Cromato de Potasio; la electrólisis se verifica a 12°C, con una densidad de corriente anódica de 0.45 amp/pulg². Las líneas sólidas representan electrodos ánodos de platino-platinizado. Las líneas punteadas representan electrodos de platino esponjoso (Mendoza, 2004).

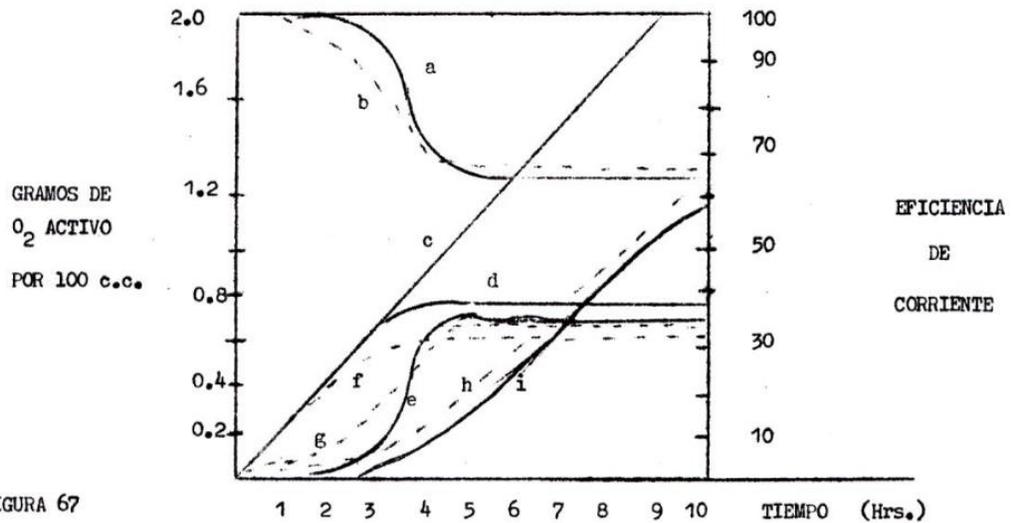


FIGURA 67

- | | |
|--|-------------------------|
| a- Eficiencia de corriente de producción de oxígeno activo | f- Hipoclorito -Oxígeno |
| b- Eficiencia de corriente. | h - Clorato-Oxígeno |
| c- Curva teórica de oxígeno activo | i- Clorato-Oxígeno |
| d- Hipoclorito -Oxígeno | |
| e y g - Evolución de Oxígeno | |

Figura 1.22 Curso de una típica electrólisis de salmuera en solución neutra
Mendoza, E. E. (2004).

1.9. Medidas de seguridad y almacenaje para el hidrógeno

1.9.1. Medidas de seguridad para su manipulación

Para la manipulación segura del hidrógeno, es importante conocer sus propiedades y las medidas de seguridad necesarias. En este consejo de seguridad se describen las propiedades más relevantes para su seguridad, y proporciona consejos prácticos para trabajar con seguridad con este gas. Es un complemento, y no reemplaza, la normativa nacional o internacional (Linde, 2012).

a) Propiedades físicas

El hidrógeno es más ligero de los gases (la densidad es de 84 g/m^3 a una temperatura de 15°C y 1 bar). Es por eso que el hidrógeno al escaparse inmediatamente se elevará hacia arriba y se acumulan en los techos o zonas similares. El hidrógeno se almacena en forma de gas en cilindros o tanques a temperatura ambiente a alta presión (hasta 300 bar), o se almacena o se transporta casi sin presión en forma de hidrógeno criogénico líquido en recipientes aislados.

La liberación de la presión de hidrógeno a temperatura normal tiene como resultado - a diferencia de otros gases - en un ligero aumento de la temperatura. La temperatura se eleva desde 20 hasta 25 ° C cuando la presión cae desde 175 hasta 1 bar. Este aumento de la temperatura no es suficiente para hacer que el hidrógeno escapado se encienda por sí mismo, ya que la temperatura de ignición se encuentra a 600 ° C (Linde, 2012).

El hidrógeno líquido (LH₂) es un líquido muy ligero (densidad de 70 g / litro a una temperatura de -253 ° C). LH₂ se evapora muy rápidamente a temperatura normal, con la creación de unos 845 litros de hidrógeno gaseoso por cada 1 litro LH₂. Inmediatamente después de la evaporación del hidrógeno gaseoso es todavía muy frío y tiene aproximadamente el mismo peso que el aire. Esa es la razón por la que se extiende casi horizontalmente. Sin embargo, se calienta muy rápido. Su densidad es continuamente reducida y tiende a extenderse hacia arriba. A la temperatura del hidrógeno líquido todos los líquidos y gases - a excepción de helio - son sólidos. Es por eso que todas las demás sustancias tienen que ser mantenidos lejos de las instalaciones del LH₂. Una mezcla de aire sólido y LH₂ tiene características explosivas. La baja temperatura del hidrógeno líquido hace que el aire atmosférico condense en el exterior de las piezas de la instalación que no hayan sido aisladas. A través de la evaporación parcial del nitrógeno del aire líquido, podría llegar a ser enriquecido con oxígeno y al entrar en contacto con sustancias combustibles, actuar como un agente inflamable (Linde, 2012).

b) Propiedades químicas:

El hidrógeno cuando se combina con el aire o el oxígeno y se enciende puede quemarse y convertirse en agua. El hidrógeno también puede reaccionar con otros agentes oxidantes, por ejemplo, cloro o gas de la risa. Cuando el hidrógeno se combina con un agente oxidante y luego se enciende, el proceso de combustión puede ser explosivo. Si este proceso se lleva a cabo en una sala cerrada, con un aumento rápido de presión, puede ser muy destructivo, y tiene lugar a causa del calor generado (Linde, 2012).

Los niveles de concentración en el que el hidrógeno puede reaccionar con el aire a presión normal y temperatura normales, en comparación con otros gases combustibles, es muy amplia (el límite inferior de explosividad (LEL) es del 4 % vol, siendo el límite superior de explosividad (UEL) del 75,6 % vol). Las mezclas de Hidrógeno / aire se encienden a través de las fuentes de ignición que contienen muy baja la energía. La menor cantidad de energía necesaria para encender el hidrógeno es 0.019 mJ que sólo es 1/10 de la de gas propano. Por ejemplo, partículas de herrumbre, que han sido transportados por una corriente rápida de hidrógeno puede desarrollar la chispa de encendido a través de la carga electrostática o por golpear un objeto. Debido a que es difícil de demostrar que la explicación anterior es la causante de la ignición, se cree injustamente que el hidrógeno es capaz de auto - encenderse. Una llama de hidrógeno es muy clara y no se puede ver la luz del día. Otras indicaciones deben ser utilizadas, por ejemplo, un trozo de papel en el área afectada. Por supuesto, el hidrógeno líquido tiene las mismas propiedades químicas como el hidrógeno gaseoso. Sin embargo, la capacidad de reaccionar con el oxígeno se reduce un poco debido a las bajas temperaturas (Linde, 2012).

c) Efectos fisiológicos / Protección medioambiental:

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido y por lo tanto no puede ser percibido con los sentidos humanos. El hidrógeno no es tóxico. Cuando es inhalado en grandes concentraciones causará la asfixia. No se debe permitir la presencia en ese ambiente, debido al peligro de explosión. Por esta razón la protección respiratoria no es relevante cuando se trabaja con el hidrógeno. Hidrógeno criogénico en forma líquida o gaseosas (evaporado) puede causar quemaduras criogénicas al entrar en contacto con la piel. Lo mismo ocurre cuando la piel entra en contacto con cualquier tubería sin aislar o equipos que contengan hidrógeno líquido (Linde, 2012).

El hidrógeno no impone un peligro para el medio ambiente. No daña la capa de ozono y no contribuye al efecto invernadero. El escape de la combustión gas de hidrógeno es agua y no dióxido de carbono u hollín (Linde, 2012).

d) Características de las mezclas de gas que contengan hidrógeno:

Las mezclas de gases no se separan bajo la influencia de la gravedad. Cuando, por ejemplo, una mezcla de hidrógeno / argón se escapa en una sala, el hidrógeno no se acumula en el techo y el argón no se acumula en el suelo. La mezcla se mueve hacia arriba en su conjunto, cuando es más ligero que el aire, y hacia abajo cuando es más pesado que el aire. Al hacer esto se mezcla continuamente en el aire. Las mezclas de hidrógeno con helio o nitrógeno son siempre más ligeras que el aire. Las mezclas de Hidrógeno / argón - de hasta el 71% vol de argón. - son más ligeras que el aire y con un contenido más alto de argón más pesado que el aire. Las mezclas de Hidrógeno / gas inerte son mezclas combustibles cuando su contenido de hidrógeno está por encima de ciertos niveles. Los valores correspondientes se han estandarizado en la norma ISO 10156. Se especifica que las mezclas de hidrógeno / nitrógeno con más de 5,7 vol. % H₂ y las de hidrógeno / helio y de hidrógeno / argón con más de 2,9 vol. % H₂ son combustibles. Los valores indicados son valores teóricos y están, en el criterio seguro “y se utiliza para clasificar una mezcla de gas de acuerdo con la normativa. Los valores de umbral actual de combustibilidad, que han sido identificados en los experimentos para un contenido de hidrógeno es algo mayor en las mezclas de hidrógeno / gas inerte (Linde, 2012).

e) Evitar atmósferas explosivas en las salas y al aire libre:

Es posible evitar la acumulación de una atmósfera explosiva en las zonas aledañas instalaciones de hidrógeno por:

- i.** La construcción de plantas de hidrógeno con áreas bien ventiladas,
- ii.** Asegurándose de que las plantas de hidrógeno se encuentran a prueba de fugas y permanecen de esa manera.

Las instalaciones de hidrógeno se tratarán de ser instaladas en el exterior, para que el escape de hidrógeno puede escapar a la atmósfera sin peligro. Si esto no es posible, por lo menos el recipiente de almacenamiento de hidrógeno debe estar instalado fuera. Las líneas de escape de las válvulas de seguridad o bombas de vacío, deben dan al exterior. Las aberturas de escape no se encontrarán bajo salientes, en las aberturas de los edificios o en las proximidades

de un área de admisión de aire. Las aberturas de escape deben estar claramente marcadas para que en caso de trabajos en caliente en los alrededores, todo el mundo sea consciente de las precauciones necesarias que deben tomar. Las líneas de suministro de hidrógeno deben tener una válvula de cierre al entrar en un área bajo techo. El hidrógeno en el interior de instalaciones no se usarán bridas ciegas o conexiones roscadas, con el fin de evitar la fuga de gas en la sala. Las salas con instalaciones de hidrógeno tendrán una efectiva ventilación natural o forzada. El contenido de hidrógeno en la sala puede ser controlado a través de un sistema de alerta (explosímetro). Se debe prestar especial atención a las salas muy pequeñas, como por ejemplo habitáculos de instalaciones de mezclas de gas o aparatos de medición de hidrógeno. Las partes en este tipo de habitáculos que contienen hidrógeno tienen que ser definitivamente a prueba de fugas, por ejemplo, mediante el uso de conexiones permanentes de la tubería. El habitáculo debe estar equipado con aberturas de ventilación para que el hidrógeno pueda escapar. Las conexiones de las tuberías en las instalaciones de hidrógeno, siempre que sea posible, estarán de forma permanente soldadas, porque esto asegura estanqueidad de larga duración. Esta recomendación es especialmente seguro para las tuberías de hidrógeno instaladas bajo la tierra o en zonas no accesibles, como por ejemplo en un canal. Cuando los tubos que pueden ser separados están conectados con accesorios roscados o bridas, se utilizará equipos a prueba de fugas. En conexiones de las tuberías que están roscadas, se deben usar accesorios de compresión. Comprobación de fugas en las instalaciones de hidrógeno primero se debe hacer con un gas no inflamable, como el nitrógeno o el helio. Sólo después de que las fugas evidentes han sido reparadas, una segunda prueba de fugas se debe hacer con el uso de hidrógeno a una presión de trabajo. Una instalación de hidrógeno con las fugas se sabe que no es segura. La instalación tiene que ser despresurizada, purgada y reparada (Linde, 2012).

f) Evitar la ignición causada por fuentes de ignición en las salas y el exterior:

La planta de hidrógeno y la instalación incluyendo los alrededores se clasificarán para el riesgo de atmósferas explosivas, consulte la norma DIN EN 1127-1, DIN EN 60079-10 u otras regulaciones relevantes. La clasificación sirve de orientación sobre las precauciones necesarias para evitar la ignición. Sin embargo, el consejo general debe considerar lo siguiente:

- i. Los equipos eléctricos no se utilizarán o bien serán instalados si no se dispone de su clasificación de uso para atmósferas explosivas.
- ii. Trabajar con fuego (soldadura, corte, soldering, molienda) sólo está permitida si el área de trabajo está libre de hidrógeno. Esto debe ser verificado con un explosímetro, en ningún caso con una llama abierta. Al realizar el trabajo con el fuego es importante tener en cuenta, que la soldadura y las chispas pueden volar hasta a 10 m del lugar de origen.
- iii. Los trabajos de ensamblaje no están permitidos cuando el hidrógeno se está fugando, porque incluso cuando se utilizan herramientas libres de chispa, todavía hay un riesgo de ignición (Linde, 2012).

g) Prevenir las mezclas explosivas en instalaciones de hidrógeno:

No es aceptable tener una mezcla explosiva en una instalación de hidrógeno. Estas mezclas son fácilmente inflamables, por ejemplo, mediante calor de fricción al operar una válvula o por medio de partículas de óxido que han sido transportadas. Incluso el calentamiento del gas que ha sido causado por el choque de presión de flujo rápido de hidrógeno, dentro de una sección llena de aire de la instalación puede causar una ignición (Linde, 2012).

El aire y el oxígeno tienen que mantenerse lejos de instalaciones de hidrógeno. Esto es posible si la instalación no tiene relación con aire o el oxígeno que contienen los sistemas. Si las conexiones existen, por ejemplo, en equipos de soldadura que funcionan con hidrógeno y oxígeno, tienen que ser instaladas válvulas de retención para asegurarse que no es posible para uno de los gases de entrar en la línea del otro. Los compresores de hidrógeno deben estar equipados con alarma de baja presión de succión y alarma de oxígeno, para asegurar que no se puede crear una mezcla explosiva de hidrógeno / oxígeno (Linde, 2012).

Si el hidrógeno se combina con el aire o el oxígeno para un proceso técnico especial, sólo se hará bajo los requisitos previos supervisados muy de cerca - manteniendo la correcta concentración y la presión máxima admisible y la ausencia de fuentes de chispa. Antes de poner en funcionamiento las instalaciones de hidrógeno, el aire tiene que ser eliminado, por ejemplo, mediante el bombeo de vacío o purga. El método más seguro es purgando con nitrógeno, si el contenido de oxígeno en la instalación es del 1% vol. Si es una mezcla combustible de argón / hidrógeno o mezclas de gases (nitrógeno / hidrógeno) que se utilizan para la soldadura de los envases, el aire también tiene que ser eliminado a través de la purga con el fin de evitar una explosión en el contenedor. También cuando se cierre, la instalación de hidrógeno tiene que ser purgada de hidrógeno a través de bombeo de vacío o purga. El contenido de hidrógeno tiene que ser reducido al 1 % vol. antes que la instalación se abra. Si cuando cierre la instalación, partes de ésta siguen estando bajo presión, el hidrógeno tiene que ser cuidadosamente retirado de la parte que se encuentra bajo presión, por ejemplo, a través de un doble bloqueo con una válvula de purga, desconexión, etc. En todos los procesos de depuración, es importante recordar, que la purga de gas seguirá el camino de menos resistencia. Por lo tanto, se debe prestar especial atención a las vías muertas. Puede ser necesario ver si todas las válvulas han asumido el control de posición necesario. (Válvulas que parecen estar abiertas no siempre permiten el paso y válvulas que se cierran no siempre son a prueba de fugas.) (Linde, 2012).

1.9.2. Medidas de seguridad para su almacenamiento

a) Corrosión, materiales:

El hidrógeno no es corrosivo. A la temperatura normal los habituales materiales metálicos - acero, cobre, latón, aluminio - son adecuados para el hidrógeno. Algunos tipos de acero pueden ser dañados por el hidrógeno bajo ciertas circunstancias, por ejemplo, cuando los defectos de producción (agrietamientos, incrustaciones) están presentes. Es por eso que los materiales utilizados en las instalaciones de hidrógeno tienen que ser elegidos por los expertos, que están familiarizados con el funcionamiento en condiciones específicas. Aparte de los materiales metálicos, el caucho y el plástico también se puede utilizar para instalaciones de hidrógeno. El hidrógeno es un gas muy "flexible". Las moléculas pequeñas pueden encontrar

su camino en los materiales o ajustadas fisuras, que podrían ser impermeables para otros gases. Los materiales de fundición no deben utilizarse para el hidrógeno, debido a su porosidad podría ser la causa de las fugas (Linde, 2012).

Debido a su baja temperatura, el hidrógeno líquido puede causar la fragilidad de caucho, plástico y acero al carbono. Debido a esto la ductilidad de estos materiales pueden ser extremadamente reducida. Es por eso que estos materiales no son adecuados para su uso en instalaciones de LH₂ (Linde, 2012).

b) Fuga de hidrógeno o un incendio de hidrógeno:

Si el hidrógeno se está escapando sin intención, el suministro de gas tiene que ser cortado por el cierre de los controles necesarios. No debe ser intentado reparar la fuga mientras que el hidrógeno se escapa, por el peligro de una ignición. Si una gran cantidad de hidrógeno ha fugado a la atmósfera, existe un grave peligro de una explosión. El personal tiene que salir de la sala, que luego tiene que estar muy bien ventilada. Con el fin de probar la efectividad de la ventilación, un chequeo de medición debe llevarse a cabo. Si el escape de hidrógeno se ha prendido fuego, puede ser extinguido por el cierre de las líneas de suministro de hidrógeno. Si esto no funciona, no intente apagar el fuego en las salas con los agentes de extinción debido a que el flujo continuo de hidrógeno presenta un riesgo de explosión. En tal caso, uno tiene que dejar que el fuego se consuma hasta que el hidrógeno se quemó y el fuego se apague por su cuenta. Puede que sea necesario refrigerar las áreas con agua fresca que podría estar en peligro por el fuego (ejemplo, los cilindros de gas). Cuando el proceso de combustión está casi terminado, la instalación afectada se debe purgar con nitrógeno para asegurar que no hay retroceso en el interior (Linde, 2012).

c) Manipulación segura de cilindros de hidrógeno:

Regulaciones nacionales contienen diversos requisitos en la manipulación de cilindros de gas. También se debe tener en cuenta la manipulación de cilindros y bloques de hidrógeno: las válvulas de los cilindros y bloques sólo se abren cuando el reductor de presión, con juntas en buen estado, han sido cuidadosamente conectados. Los puntos de conexión deben ser evaluados para verificar que no haya fugas. Las válvulas del cilindro y el bloque se cierran cuando no estén en uso con el fin de evitar la fuga de gas en las conexiones. Si la válvula del cilindro o bloque tiene una fuga o cuando el escape de hidrógeno no se puede detener mediante el cierre de la válvula, el contenedor de hidrógeno tiene que ser transportado fuera y dejarlo que se vacíe. Las reparaciones de cilindros de hidrógeno o bloques, así como las válvulas, sólo pueden ser llevadas a cabo por el proveedor de gas (Linde, 2012).

d) Evitar el abuso:

El hidrógeno no se debe utilizar para el llenado de globos de juguete, debido al peligro de una explosión. El hidrógeno no debe ser utilizado como energía para los sistemas neumáticos, por ejemplo, de pintura en aerosol o por procesos similares. El hidrógeno no debe inhalarse intencionalmente en grandes dosis. El efecto sofocante puede comenzar después de la inhalación de una respiración profunda (Linde, 2012).

2. CAPITULO II: METODOLOGÍA PARA PRODUCIR HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS DE AGUA UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR

2.1. Método de investigación y tipo de estudio

Se escoge la electrólisis para producir hidrógeno ya que a comparación de los principales métodos de su obtención en el cual es un producto secundario, en este método vendría siendo producto primario logrando una alta pureza de Hidrógeno y Oxígeno lo cual facilitará su tratamiento de resultados sabiendo que los únicos gases desprendidos en cada una de las terminales de los electrodos del electrolizador estarán presentes solo oxígeno e hidrógeno.

Debido a que tanto el oxígeno como el hidrógeno se consideran gases difíciles de licuar no es viable su almacenamiento a menos que se utilicen sistemas de compresión y almacenaje de alta seguridad lo que elevaría el costo económico de su producción e investigación, así como el riesgo de seguridad en la manipulación y transporte lo que al mismo tiempo implica capacitación especializada extra lo cual no es objetivo de esta investigación. Consecuente a que no se almacenará su producción será cuantificada in-situ (en el lugar y momento de producción) a través de métodos volumétricos sencillos.

Para la presente investigación tomando en cuenta la base teórica vista en el Capítulo I se plantea un problema, una propuesta de investigación para encontrar una posible solución y fundamentado en esto una hipótesis de resultados la cual viene siendo formulada de la siguiente manera:

“Al optimizar las condiciones de electrolización del agua y aprovechar el aumento de la producción de energías renovables es viable considerar implementar el desplazamiento de los combustibles térmicos a base de carbón por combustibles de hidrógeno”

En la figura 2.1 se muestra el diagrama de la metodología de trabajo de investigación indicando las diferentes etapas según el color de los recuadros, en dónde se puede observar que el presente capítulo de trabajo “Desarrollo del diseño de la investigación” corresponde a la etapa tres donde se definen el método a utilizar y las variables de control que tendrá la fase experimental.

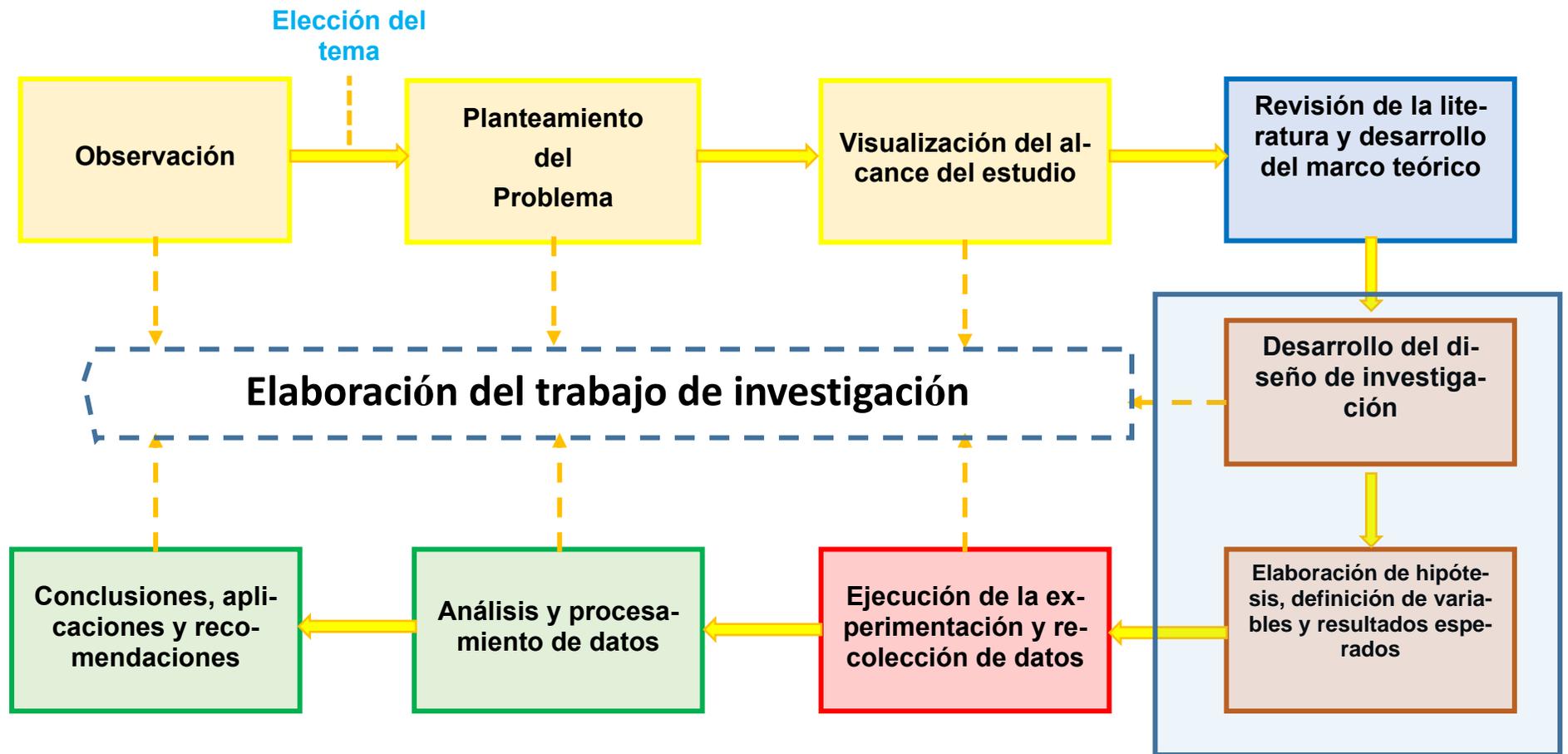


Figura 2.1 Pasos para el desarrollo del trabajo de investigación a través de un enfoque cuantitativo basado en el método científico para un trabajo experimental

Fuente: Metodología de la investigación, (UES-FIA-EIQIA-AIN-115, 2019)

2.2. Metodología para crear el diseño de la fase experimental

Para poder elaborar el presente capítulo se seguirán una serie de pasos sistemáticos que nos permitirán desarrollar el experimento de producción de hidrógeno haciendo uso de energía eléctrica proveniente de paneles solares, de una manera confiable, tomando todos los factores que pueden influir significativamente en los resultados y controlándolos a necesidad según sean los objetivos de este trabajo. Es por eso que resulta necesario definir objetivos y condiciones que cimenten el trabajo a realizar. Se establecen de la siguiente manera:

Objetivo general de la metodología:

Establecer un mecanismo óptimo basado en la teoría para ser implementado en la práctica, comprobando la hipótesis propuesta a través de un posterior análisis y procesamiento de los resultados obtenidos por el experimento.

La elaboración del diseño responde al siguiente orden y consideraciones:

a) Determinar variables experimentales

Habiendo plasmado una definición del problema, investigando una base teórica y finalmente abordando una hipótesis, se plantean los posibles fenómenos que interactúan durante la experimentación y en base a esto se definen variables que pueden ser controladas a la necesidad requerida para la investigación.

b) Fijar variables de control en una matriz de prueba.

Después de determinar las variables que afectan el experimento y aquellas que pueden ser controladas para lograr los objetivos del presente trabajo, es importante establecer un orden de medición y variación, es por eso que se arreglarán sus cambios en una matriz de pruebas que permite llevar los datos en una forma sistematizada.

c) Determinar el proceso y los pasos para realizar la prueba

Cuando las variables a controlar y a medir estén definidas en un orden, se puede partir de esa base para generar un procedimiento de experimentación sabiendo la finalidad y su base teórica.

d) Metodología para cuantificar los gases después de producirlos

Cuando el proceso de experimentación esté definido y se tenga control de las variaciones posibles, los resultados obtenidos necesitan ser medidos por lo que se diseñará una forma de que los datos producidos puedan ser cuantificados y cualificados de una manera confiable para su posterior análisis.

e) Diseño del sistema físico del electrolizador

Una vez que el proceso requerido esté determinado se adecuará el diseño del electrolizador a las necesidades descritas anteriormente para cumplir con los pasos del experimento.

f) Determinación de factores que podrían influir en las variaciones de energía eléctrica

Ya planteado el proceso para obtener los resultados requeridos es necesario revisar los factores circunstanciales respecto a la circulación de la energía requerida ya que es importante revisar las condiciones óptimas para realizar el experimento.

g) Diseñar control de flujo energético proporcionado al electrolizador

Conociendo los factores y cómo influyen en la generación y entrega de energía se diseñará un control para evitar tener fluctuaciones de condiciones en la realización del experimento.

h) Disposición de medidas de seguridad en el proceso de producción y medición

Durante todo el procedimiento de ejecución del experimento será importante tener en cuenta las medidas de precaución. La razón por las que se diseñaran hasta el final es porque se tomaran en cuenta todo lo necesario para realizar el experimento y en base a eso se generaran las medidas.

i) Proceder a la siguiente etapa: Ejecución del experimento

Cuando todos los pasos anteriores estén completos se dará por finalizado la fase de diseño y se procederá a ejecutar el experimento.

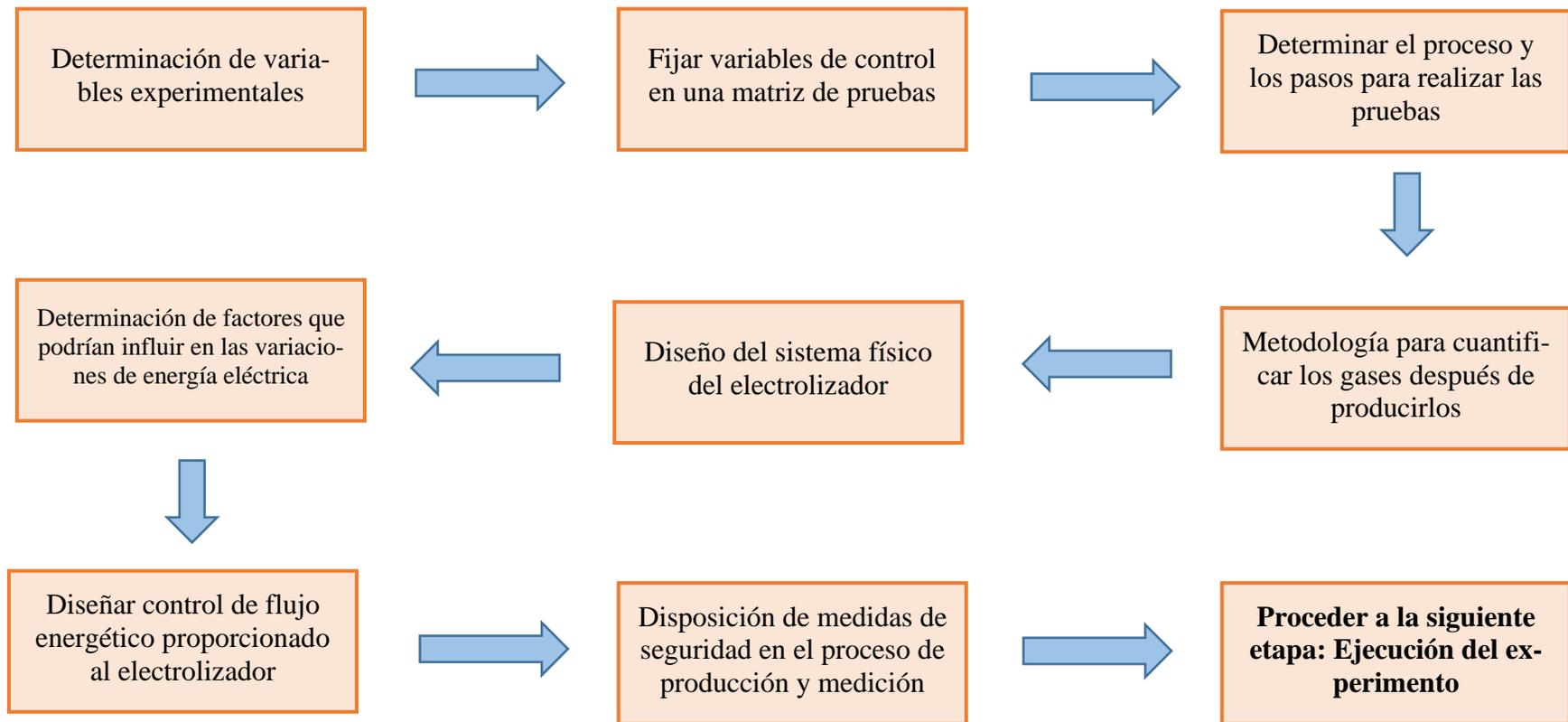


Figura 2.2 Diagrama de la metodología para realización del diseño del experimento
 Fuente: Metodología de la investigación (UES-FIA-EIQIA-AIN-115, 2019)

2.3. Determinación de variables experimentales

La primera ley de Faraday sobre la electrólisis obtenida de manera experimental dice que *“La masa de una sustancia depositada en un electrodo durante la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida a este electrodo”*. La cantidad de electricidad o carga eléctrica se mide en coulomb.

La segunda ley de Faraday expresa que *“Para una determinada cantidad de electricidad (carga eléctrica), la masa depositada de una especie química en un electrodo, es directamente proporcional al peso equivalente del elemento”*. Siendo el peso equivalente de una sustancia a la división de su masa molar y un número que dependerá de la reacción el cual representa el número de moles de electrones que interactúan en la reacción oxido-reducción.

En el momento de formular la ecuación que nos permitirá saber la cantidad de sustancia que se producirá en el electrodo tomando las leyes anteriores nos dá como resultado:

$$m = \frac{Q}{F} \times \frac{M}{z}$$

m equivale a la masa de sustancia producida en el electrodo en gramos

Q equivale a la carga eléctrica total que pasa por la solución en coulomb

F equivale a la constante de Faraday

M equivale a la masa molar de la sustancia que se expresa en gramos por mol

z corresponde al número de valencia de la sustancia ion en la solución

Puesto que en nuestro experimento trabajaremos con corriente continua será necesario tomar en cuenta que las fórmulas de las leyes de Faraday, la carga eléctrica se trabaja en coulomb lo cual tendrá que ser convertido su valor desde el conocimiento de la intensidad de corriente con la fórmula:

$$Q = I \times t$$

Q es la carga encontrada en coulomb

I es la intensidad de corriente circulando medida en Amperios

t es el tiempo de circulación medido en segundos

Acomodando las ecuaciones anteriores para trabajar directamente los datos tenemos:

$$m = \frac{I \times t}{F} \times \frac{1}{z}$$

Se puede obtener el valor en moles si se toma en cuenta que $n=m/M$ utilizando la ecuación según conveniencia de presentación.

En el caso de que haya variación de la intensidad de corriente como en el caso de la producción fotovoltaica debido a las variaciones de la luz solar se puede integrar la derivada de la carga en el tiempo:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad Q = \int_{t_0}^{t_f} I(t)dt$$

Ya que la **intensidad de corriente** influirá en la producción de hidrógeno esta sea una de las variables a controlar en los experimentos y se registrará en Amperios

En el Capítulo I se hizo referencia a algunas condiciones de operación a tomar en cuenta siendo una de ella la temperatura de electrólisis conociendo que, a mayor temperatura de operación, la sobretensión y la resistencia específica se hacen menor, ambos factores significativos en el experimento por lo que la **Temperatura** de la solución a electrolizar será otra de las variables a controlar en el experimento. Debido a que las temperaturas a las que se puede calentar el agua con energía solar pueden llegar entre los 40 °C y los 90 °C las pruebas se realizarán en ese rango a parte de la temperatura ambiente, ya que es importante considerar a la hora de la posible aplicación del proyecto el hecho de calentar agua con energía solar para aumentar la eficiencia de producción debido a que las conductividades mostrarían máximos a esas temperaturas disminuyendo las concentraciones de electrolitos a utilizar. Igualmente existe una relación entre el consumo de energía eléctrica relacionado a la temperatura de producción debido a los hechos antes mencionados, por lo que la siguiente gráfica muestra la demanda de energía eléctrica versus producción, demanda térmica versus producción y finalmente la combinación de ambos consumos versus producción observando claramente que a medida se incrementa la temperatura el consumo eléctrico disminuye para cierta cantidad de producción pero incrementa el gasto en demanda térmica por lo que tiene que haber un equilibrio de consumo energético neto justificado por la producción de hidrógeno. Debido a que el proyecto en un inicio se plantea a investigación general no se evaporará el agua y se mantendrá la presión atmosférica por lo que el consumo de energía para producir hidrógeno se mantendrá bajo la línea de temperatura de evaporación.

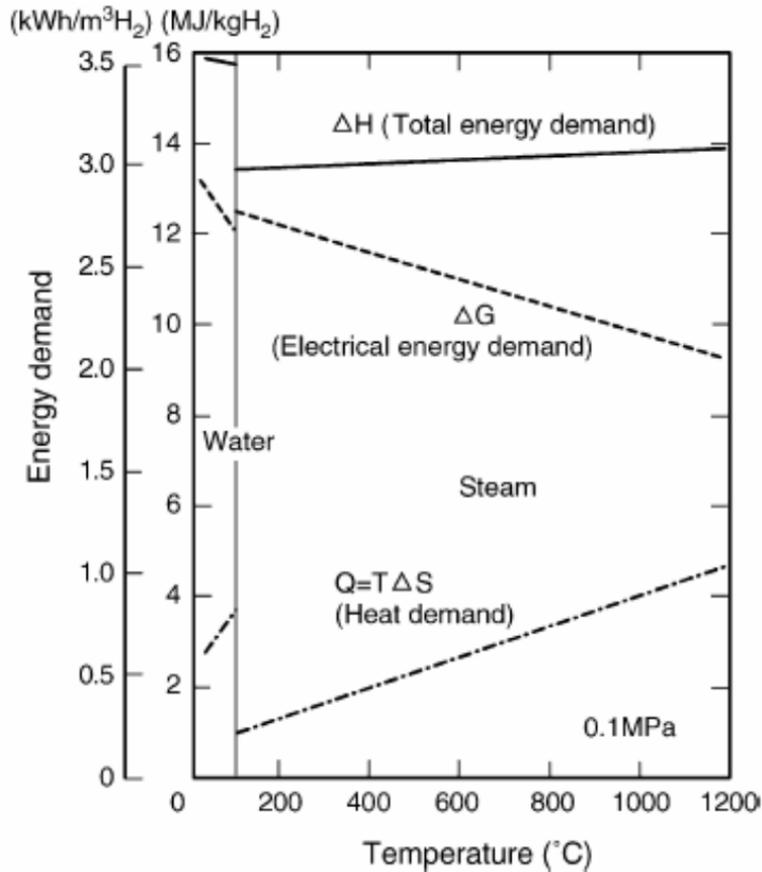


Figura 2.3 Demandas energéticas del proceso electrolítico en función de la temperatura. (Priego, 2009)

Otra de las variables de control será la **concentración del electrolito**, debido a que en la solución la resistencia debe ser mínima y la conductividad máxima siendo importante mantener el equilibrio para lograr una eficiencia óptima en el uso de consumo energético. Si el manejo de la solución que se electroliza es óptimo el electrolito puede estarse reciclando debido a que este no se consume provocando que el gasto en su compra sea mínimo además hay que tomar en cuenta que a medida que se consume el agua por la separación de gases esta tiene que ser reemplazada para que la concentración del electrolito no aumente y esto provoque una subida en el consumo eléctrico haciendo ineficiente el proceso.

Por lo tanto, las variables a considerar para la fase experimental y posteriormente para el análisis de datos serán:

- a) Intensidad de Corriente medida en Amperios (A)
- b) Diferencias de potencial medidas en Voltios (V)
- c) Temperatura de la solución medida en grados Centígrados (°C)
- d) Concentración del electrolito medido en porcentaje peso (g(soluto)/ml(solución))
- e) Tiempo de una cantidad de volumen del gas producido medido en minutos (min)
- f) Volumen de gases producidos medidos en mililitros (ml)

2.3.1. Matriz de pruebas ajustando las variables de control

Ya que las variables de las cuales se tendrá control y supervisión están definidas se puede establecer una serie de pruebas interactuando entre ellas a fin de poder contribuir en la comprobación de la hipótesis. Recordando que para lograr el mejor resultado de comparación de costos de producción para este sistema es necesario establecer las condiciones óptimas básicas de operación evaluando primero las condiciones que pueden mejorar o disminuir la eficiencia de producción.

En el caso de la corriente eléctrica se tomará su valor antes de cada prueba y se vigilará que su valor se mantenga constante ya que esto dará muestra del buen funcionamiento del panel solar; en el caso de que esta varíe se registrará en las anotaciones y si los resultados difieren mucho de un valor coherente se podrá repetir el experimento de lo contrario únicamente se evaluará su efecto en la variación de la producción y esta información ayudará a la interpretación final de los datos. De la misma manera se tratará con el voltaje que se está proporcionando a la electrólisis, además, los cambios producidos en este pueden dar indicios en los cambios de la conductividad eléctrica producida por diferentes factores como la descomposición del agua, reacción del electrolito con la atmósfera, etc. Se espera que los cambios en la conductividad no sean significativos sin embargo existiendo la posibilidad, el cambio quedará registrado en el cambio de voltaje y corriente.

La concentración del electrolito una vez preparada la solución no cambia con el tiempo de manera significativa debido a que reacciona en manera poca o nula con los electrodos y no reacciona con las paredes del electrolizador además lo que se descompondrá de agua para realizar las pruebas no es mucho sin embargo ante cualquier fenómeno se monitoreará el nivel de agua en el electrolizador y si este llegara a cambiar notablemente entonces se agregará agua. Para manejar los términos de eficiencia de producción fijaremos el tiempo como variable independiente al poder controlar el período de tiempo mediante interruptores que iniciaran o coartaran el paso de energía al electrolizador. La variable dependiente será el volumen por lo que tendremos graficas de $T(s)$ vs $V (ml)$. Estos datos se generarán a diferentes condiciones de operación las cuales para llevar una manera ordenada serán distribuidas en matrices de resultados las cuales contendrán una corrida de experimentación para cada condición. En total se evaluarán 20 condiciones diferentes. Las primeras 5 con concentraciones diferentes. Luego de las mejores tres eficiencias y para cada una de ellas se evaluarán 5 condiciones de temperaturas diferentes obteniendo un total de **140 datos** para poder generar diferentes curvas de trabajo para un mismo electrolizador.

Empezando con la toma de datos de la concentración la medición se registrará cada minuto por 7 minutos para verificar la curva de reacción y si la pendiente es constante o no en el tiempo. Se registrará en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Matriz de toma de datos para eficiencia controlada por la concentración del electrólito a temperatura ambiente

	Concentración de electrólito ($\frac{g_{soluta}}{ml_{solución}} \times 100$)	V (ml) minuto 1	V (ml) minuto 2	V (ml) minuto 3	V (ml) minuto 4	V (ml) minuto 5	V (ml) minuto 6	V (ml) minuto 7
1.	20% m							
2.	28% m							
3.	36% m							
4.	44% m							
5.	52% m							

Después de realizar las primeras mediciones, a los tres mejores resultados de rendimiento de producción se les hará cinco pruebas de temperatura a cada una por 7 minutos al igual que la parte anterior, las cuales quedaran registradas en la siguiente matriz:

Tabla 2.2 Matriz de toma de datos para eficiencia controlada por la temperatura de la solución

Concentración 1: (obtenido del procedimiento anterior) %								
	Temperatura de solución	V (ml) min 1	V (ml) min 2	V (ml) min 3	V (ml) min 4	V (ml) min 5	V (ml) min 6	V (ml) min 7
1.	T ambiente							
2.	40 °C							
3.	55 °C							
4.	70 °C							
5.	85 °C							
Concentración 2: (obtenido del procedimiento anterior) %								
	Temperatura de solución	V (ml) min 1	V (ml) min 2	V (ml) min 3	V (ml) min 4	V (ml) min 5	V (ml) min 6	V (ml) min 7
1.	T ambiente							
2.	40 °C							
3.	55 °C							
4.	70 °C							
5.	85 °C							
Concentración 3: (obtenido del procedimiento anterior) %								
	Temperatura de solución	V (ml) min 1	V (ml) min 2	V (ml) min 3	V (ml) min 4	V (ml) min 5	V (ml) min 6	V (ml) min 7
1.	T ambiente							
2.	40 °C							
3.	55 °C							
4.	70 °C							
5.	85 °C							

Después de obtener los datos necesarios en estas tablas se podrá proceder con el análisis de resultados evaluando su coherencia, tendencia y desarrollo para posteriormente poder procesar los datos y poder continuar con la siguiente etapa de la investigación.

2.4. Metodología para realizar la electrólisis

Se describirá un resumen de la metodología que se ocupará para realizar el experimento de la investigación:

Tomando en cuenta la entrega de corriente eléctrica y por ende la carga eléctrica en promedio de los paneles solares según las especificaciones técnicas, se monitoreará constantemente la circulación y consumo de potencia en el electrolizador por medio de amperímetros y voltímetros digitales, indicando los cambios que pudieran ocurrir en este consumo. El voltaje no representará un problema de consumo ya que el voltaje mínimo de reacción es 1.16V DC y el panel entrega 18V DC que posteriormente se convertirá a 12VDC para evitar variaciones. Luego de verificar la corriente entregada por los paneles se procederá a medir la eficiencia de producción para diferentes concentraciones del electrolito a temperatura ambiente. Existen rangos de concentración en los cuales la conductividad es la mejor, estos son presentados en la base teórica que se estudia en este capítulo de metodología. Para las mejores eficiencias encontradas en base a la concentración, se hace la prueba a diferentes temperaturas para verificar como ayuda la temperatura a mejorar la conductividad eléctrica de la solución y por lo tanto la eficiencia de producción. Se hace la prueba para la producción para cada caso antes mencionado midiendo el volumen de gas producido en las probetas con una unidad de tiempo específico (cada minuto por 7 minutos), obteniendo así un dato de producción de volumen generado por unidad de tiempo. Los datos estarán a presión atmosférica constante. Tomando en cuenta la densidad del hidrógeno y del oxígeno a esas condiciones se podrán convertir sus unidades a conveniencia.

Se tomarán en cuenta las características físicas y químicas del hidrógeno para elaborar las medidas de seguridad adecuadas en su producción y manejo. La cuantificación o medición del volumen del hidrógeno a la hora de producirlo atiende a las medidas de seguridad de evitar almacenarlo si no es necesario y así mismo el tiempo de medición también está considerado en cuanto a no producir cantidades peligrosas de los gases a producir además de liberarlo a la atmósfera y mantenerlo alejado de fuentes de ignición. El manejo de la sustancia como electrolito también representará medidas de seguridad por sus posibles reacciones al tener contacto con la piel y ojos. Todo lo anterior es considerado en los apartados finales pero que deben de ser implementados desde el principio de la experimentación para garantizar el éxito final del propósito de esta investigación.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la metodología de la experimentación cuyos pasos serán ejecutados sistemáticamente para ordenar los resultados y poder interpretarlos posteriormente de una manera más sencilla (ver figura 2.4):

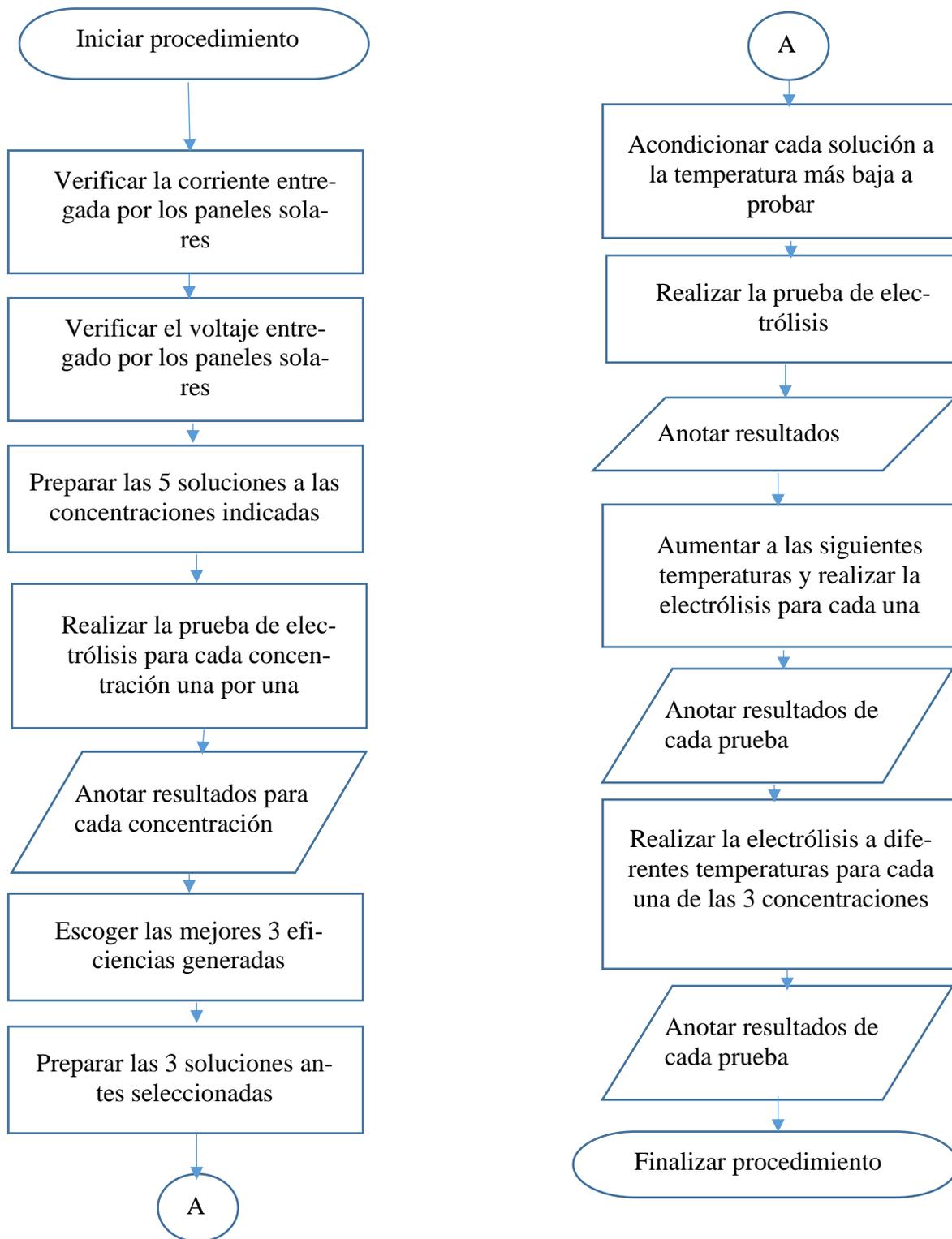


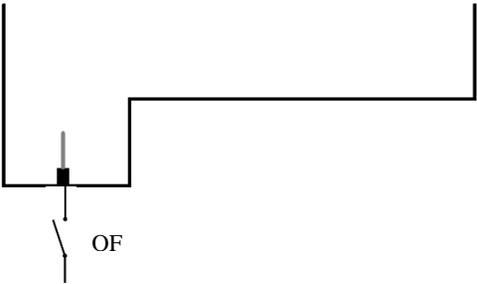
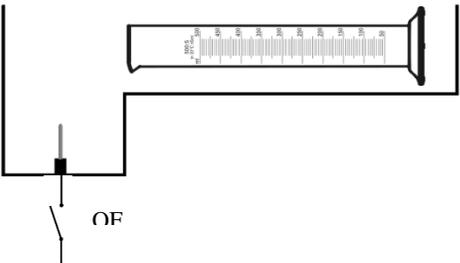
figura 2.4 Procedimiento del proceso experimental

2.4.1. Metodología de cuantificación de gases producidos

Para poder cuantificar el gas producido por medio de la electrólisis se hará uso de instrumentos volumétricos como lo son probetas graduadas las cuales estarán directamente en el lugar de producción de los gases, eso quiere decir una probeta en el cátodo y otra probeta en el ánodo. La ubicación de estas probetas de medición tal como lo muestra la **Tabla 2.3** es de manera invertida, envolviendo los electrodos y previamente antes de empezar el experimento se llenan de la solución a electrolizar para que cuando el burbujeo en cada uno de los electrodos empiece, el gas producido ascienda hasta la parte más alta de la probeta y a medida que este se vaya acumulando irá desplazando la solución adentro de la probeta haciendo que la medida de gas desplazado se vaya haciendo notar en el instrumento graduado. Habrá garantía de que el gas producido en cada electrodo y por ende capturado en cada probeta será casi en su totalidad o Hidrógeno u Oxígeno según sea el electrodo debido a lo repasado en la teoría por lo que este método resulta bastante práctico y eficiente para capturar los gases sin necesidad de separarlos como lo es en otros casos de electrolizadores. La manera de realizar las pruebas será midiendo la cantidad producida de hidrógeno por unidad de tiempo (minutos) haciendo la diferencia de gas dentro de la probeta en función de las propiedades que se estén controlando.

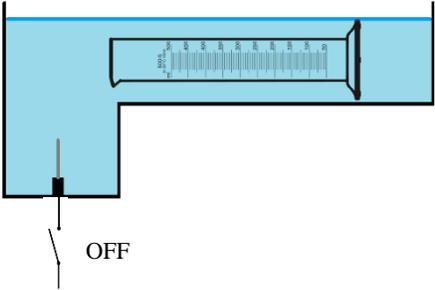
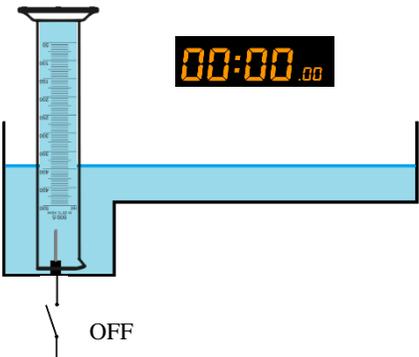
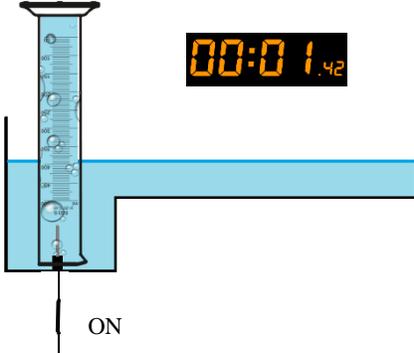
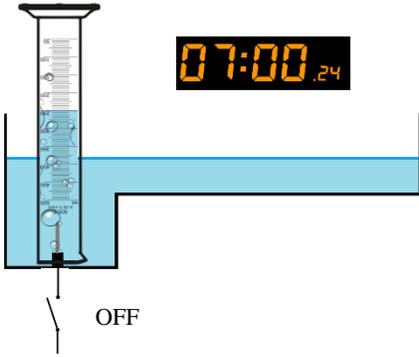
Las mediciones de hidrógeno producido tomando en cuenta la matriz de medición antes expuesta se tomarán cada minuto por 7 minutos para verificar los cambios que podrían tenerse en cuanto a cambios en Continua la conductividad por gasificación de los compuestos del agua.

Tabla 2.3 Procedimiento para medir gases generados

1	 <p>Diagrama que muestra un electrodo invertido en un recipiente. El electrodo está conectado a un interruptor etiquetado como 'OF'. El electrodo está sumergido en la parte inferior del recipiente.</p>	<p>Se prepara la cubeta con electrodos fijados en la parte más honda y sellada su base. El interruptor debe estar apagado al inicio y la cubeta debe estar limpia de cualquier sustancia para evitar mezclar con el electrolito.</p>
2	 <p>Diagrama que muestra una probeta graduada invertida en un recipiente. La probeta está conectada a un interruptor etiquetado como 'OF'. La probeta está sumergida en la parte inferior del recipiente, con su boquilla dirigida hacia el electrodo.</p>	<p>Se ubican las probetas, una para el ánodo y otra para el cátodo, acostadas tal y como se muestra en la figura de este paso. La parte de la boquilla de la probeta debe estar en dirección del electrodo.</p>

continua...

Tabla 2.3 Procedimiento para medir gases generados (Continuación)

3		<p>Se llena la cubeta electrolizadora con la solución de agua más electrolito a manera de que el nivel cubra las probetas completamente y esta se llene de la solución sin burbujas de aire por dentro.</p>
4		<p>Se voltea la probeta invirtiéndola sin dejar que el aire entre en la probeta. Los electrodos deben quedar dentro de las probetas y la boquilla no debe hacer contacto con la superficie del electrodo. El cronómetro debe iniciar en cero antes de encender el interruptor</p>
5		<p>Cuando las probetas estén aseguradas (con pinzas para tubos de ensayo) se permite el paso de corriente al mismo tiempo que se activa el cronómetro. Se observará como las burbujas saldrán de los electrodos empezando a llenar las probetas.</p>
6		<p>Cuando los tiempos establecidos por la matriz de recolección de datos se alcanzan se abrirá el circuito y se detendrá el cronómetro. El volumen del gas recolectado será anotado y luego el gas se liberará en un espacio abierto para realizar la siguiente prueba.</p>

2.5. Diseño de sistema de electrólisis

2.5.1. Selección de electrolito

Al identificar la reacción de electrólisis observamos que para obtener los productos de interés lo que se electroliza es el agua, pero es muy importante tener en cuenta que el agua pura por sí sola no se puede electrolizar ya que la conductividad que esta posee es muy pequeña por lo que es necesario agregar electrolitos o sustancias que al disolverse en el agua aumenten la conductividad pero que no interfieran en la producción de gases y para eso se puede hacer uso de ácidos oxácidos o bases. Es importante saber tal como se mostró en el Capítulo I sobre la reacción de electrólisis que independiente del electrolito (Base o ácido oxácido) se obtendrá el mismo producto independientemente del pH de la solución.

Es importante tomar en cuenta que la conductividad producida por los ácidos es significativamente mayor a la producida por agregar bases a la solución a electrolizar. Normalmente en la producción industrial de hidrógeno a base de electrolización utilizan el Hidróxido de Sodio y en menor consumo el Hidróxido de Potasio. Se utilizan bases bajo la consideración que a comparación de los ácidos el ataque a los materiales de los electrolizadores es menor, sobre todo a aquellos de mayor contacto como el tanque, los electrodos y demás que estén presentes conteniendo la solución. Si el hidróxido de sodio está en contacto con la atmósfera reaccionará con el dióxido de carbono produciendo carbonato de sodio (Na_2CO_3) haciendo que la solución disminuya su conductividad y genere ataques de corrosión a los materiales expuestos. A pesar de las contradicciones en el uso de bases se prefiere así por el hecho que el ataque a los materiales sigue siendo mucho menor a la que haría un ácido y así tener que reemplazar más pronto los electrodos que en ocasiones son muy caros como el platino o el iridio entre otros.

Al controlar la temperatura entre los 40 °C y los 90°C como se pretende hacer en el experimento las concentraciones para lograr una buena conductividad están rondando el 20% al 30% para el NaOH y el 27%-50% para el KOH, además se registra en la bibliografía que los valores de resistencia para ambos electrolitos se mantienen iguales al igual que el ataque corrosivo a los electrodos. Con los datos anteriores queda claro que las ventajas de usar una base de sodio o potasio son prácticamente iguales sin embargo hay una leve ventaja con el hidróxido de potasio respecto a la presión de vapor que es mayor a la solución de hidróxido de sodio y esto es relevante a la hora de recuperar gases ya que a temperaturas altas la vaporización del agua representa pérdidas y tendría que agregarse más agua destilada de la necesaria para producir cantidades de hidrógeno; sin embargo el hidróxido de potasio es más caro que el hidróxido de sodio y para los niveles de producción que se generaran para esta investigación la pérdida de agua no será significativa pero será un factor importante a tomar en cuenta a la hora de producirlo a nivel industrial. Por las condiciones antes descritas se tomará como electrolito a utilizar el **Hidróxido de Sodio**.

2.5.2. Selección de electrodos

Se ha registrado que la tensión de descomposición entre electrodos de platino los cuales representan alta conductividad y resistencia al ataque corrosivo es de 1.69 voltios lo cual significa que para cualquier conductor como electrodo la tensión necesaria no necesita de altos

voltajes siendo permisivo y suficiente los 18V DC que proporciona un panel solar común policristalino permitiendo que la conexión entre paneles sea en paralelo para aumentar la corriente y no en serie para aumentar la tensión así como evita utilizar elevadores de voltaje o inversores.

Para el experimento existen 2 posibilidades de electrodos que se pueden usar, los electrodos de acero inoxidable y los electrodos de grafito. En el caso de los de acero inoxidable, de baja composición de carbón, para el momento de llevar a cabo la electrólisis estos presentan un pequeño desgaste debido al ataque químico pero que no es significativo además son económicos y su disponibilidad es segura de encontrarlos. Por otro lado, se tienen los de grafitos que si bien estos no presentan ningún tipo de desgaste a la hora de la electrólisis, estos para ser utilizados se deben traer del exterior del país ya que se ha buscado donde conseguirlos a nivel nacional y no se encuentran lo que incrementa el precio de estos,

Tomando en cuenta estos aspectos se utilizarán los electrodos de acero inoxidable ya que estos a pesar que presentan un pequeño desgaste por la electrólisis los tiempos que estos estarán bajo el proceso de la electrólisis no serán amplios, por lo tanto, el desgaste no sería tan significativo lo que no llevaría problemas a la hora de realizar el experimento. Por otra parte, los electrodos de acero inoxidable no son necesario que sean de alta calidad o de alta concentración de carbón basta con los de baja concentración para el proceso ya que aún estos presentan baja corrosión para llevar a cabo la electrólisis del agua

2.5.3. Equipo de electrólisis

Tal como veíamos en el marco teórico existen distintos tipos de celdas las cuales generalmente se pueden clasificar en Unipolar y Bipolar según la forma en que están montados los electrodos y luego se subdividen cada uno de estos según sea la forma en que se desprenden los gases. Para el caso de este experimento y a manera de empezar desde un punto de referencia general, se implementará un electrolizador UNIPOLAR, el cual consta de los electrodos separados y trabajando individualmente. Únicamente se utilizarán una barra de electrodos para cada parte (ánodo y cátodo), y sabiendo su superficie de acción se podrán calcular las eficiencias de una mejor manera. Por la manera de emitir los gases y como se separan se podrá decir que la celda aparte de ser unipolar, es de cubeta. El material del cual estará hecho la cubeta electrolizadora será de plástico debido a que el contenido de la sustancia a electrolizar no reaccionará significativamente con este material (ver **figura 2.5**).

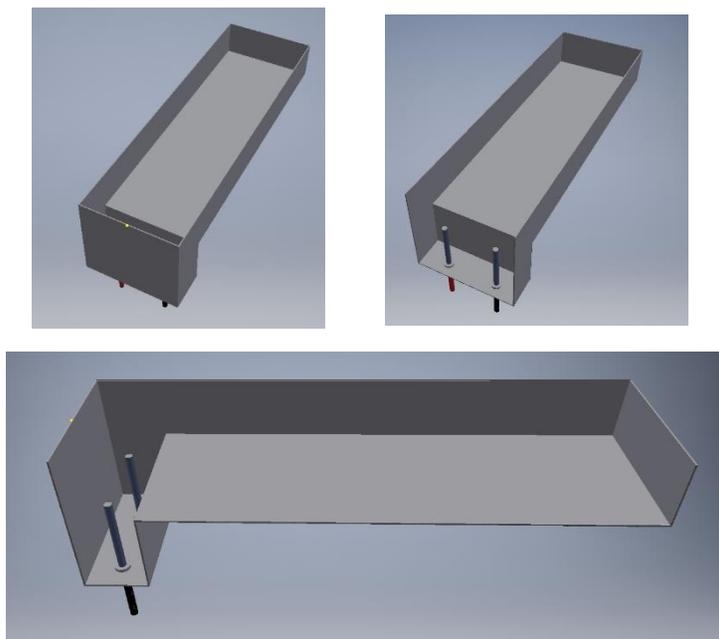


Figura 2.5 Vistas del electrolizador unipolar de cubeta a implementar

Para ubicar la posición de los electrodos es importante recalcar que se toma en cuenta la distancia para disminuir la resistencia interna de la celda esto va atado al hecho de que se debe tratar que el desprendimiento de gases y burbujas de vapor sea rápido tomando en cuenta la superficie de acción donde se dará la reacción.

2.6. Sistema de paneles solares

2.6.1. Factores influyentes en el uso de paneles solares

Para poder hacer uso de los paneles solares y obtener su mayor rendimiento posible es necesario tomar en cuenta varios factores hablando únicamente de su desempeño entregando energía, ya que existen muchos otros factores cuando se habla a largo plazo para tener una red fotovoltaica y darle mantenimiento. Se tomarán en cuenta la incidencia solar y radiación que los paneles reciban durante el experimento para poder aprovechar toda la energía posible referenciada en las especificaciones del panel.

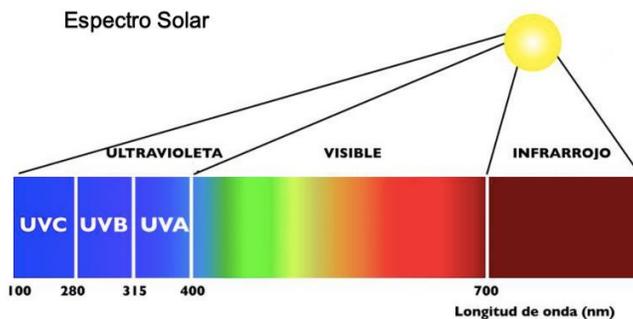


Figura 2.6 Espectro solar. ©Hogarsense.es

Como veíamos en la **figura 2.6**, la radiación solar es la energía electromagnética emitida por

los procesos de fusión del hidrógeno contenido en el sol. Dicha energía no alcanza la superficie terrestre de modo constante, su cantidad varía durante el día, de estación a estación y depende de la nubosidad, del ángulo de incidencia y de la reflectancia de las superficies. La radiación proveniente del sol contiene tres tipos de rayos, en función de su longitud de onda, los rayos infrarrojos (IR) que proporcionan calor y son el 50% de los rayos que nos llegan del sol. Los rayos visibles o el espectro visible (VI) que proporcionan luz, y son el 40% de las emisiones solares que nos llegan. Y los rayos ultravioletas (UV) que constituyen el restante 10% de las emisiones solares (Carbonell, 2008).

A su vez, los rayos ultravioletas (UV) se subdividen en tres tipos. Los UVA, que atraviesan fácilmente la atmósfera, alcanzando toda la superficie terrestre. Los UVB, que tienen una longitud de onda corta, teniendo dificultad para atravesar la atmósfera. Llegan con más facilidad a la zona ecuatorial, pero en mucho menor grado a latitudes elevadas. Y los UVC, que tienen una longitud de onda más corta, y que no pueden atravesar la atmósfera, son absorbidos por la capa de ozono. Son muy peligrosos para el cuerpo y por lo tanto hacen que la capa de ozono que los retiene sea de vital importancia para nuestra vida (Carbonell, 2008).

La cantidad de radiación depende de diferentes factores:

- a) **Latitud:** afectando en mayor medida donde el sol se encuentra sobre la vertical, y esto se da en la zona comprendida entre los dos trópicos. El Salvador se encuentra en latitud 15°N muy cerca de los trópicos lo que conlleva recibir una radiación proveniente del sol muy alta.
- b) **Altitud:** afectándonos más cuanto más altos estamos, entre un 10 y 12% más de intensidad de radiación cada 1000 m ascendidos. En San Salvador en donde realizaremos el experimento la altitud será de 658m snm aproximadamente lo que será traducido a un 5% más de intensidad respecto al nivel del mar.
- c) **Cantidad de ozono en las capas altas de la atmósfera:** a más ozono más protección. Motivo por el que es importante cuidar y mantener dicha capa. Este factor no afectará de gran manera ya que en la zona ecuatorial la capa de ozono se mantiene relativamente estable con respecto a su disminución acercándose a los polos.
- d) **El índice de reflexión del suelo:** en general no afecta mucho, pero la arena, la hierba y sobre todo el agua (sólida como nieve, y líquida en los mares y lagos), reflejan muchos rayos UV. El índice UV puede ser 2 y 3 veces mayor en una zona nevada.
- e) **Nubosidad:** a mayor nubosidad la incidencia es menor. En la **figura 2.7** se observa la potencia media en un día despejado y luego en el mismo lugar, pero en un día nublado la cual varía en gran manera como se puede observar a continuación:

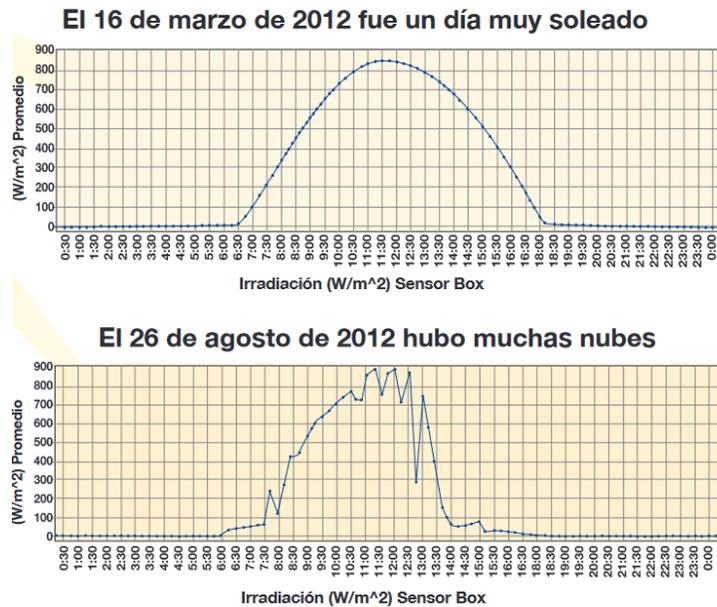


Figura 2.7 Incidencia solar en días despejados y nublados, CNE (2011)

2.6.2. Control de flujo energético proporcionado por los paneles solares

Como se describía en el apartado 2.4 sobre que la tensión necesaria para realizar la electrólisis basta con 1.69 voltios para realizarla, por lo que para la tensión que brindan de los paneles individuales que es de 18 voltios no será necesario que se incluya una conexión en serie para elevar la tensión o un elevador de voltaje lo cual es conveniente ya que no se necesitará más que un solo panel para poder hacer las conversiones de potencia recibida a hidrógeno producido. La corriente máxima que puede brindar el panel solar a la salida en potencia pico es de 5.43 A y un voltaje de 18V DC por lo cual para poder establecer un flujo continuo de la energía proporcionada se hará uso de un controlador de voltaje diseñado para paneles solares cuyo funcionamiento consta de recibir un rango de voltaje permitido por sus especificaciones y regularlo a otro voltaje también previamente especificado. El uso de controladores sirve para estandarizar el voltaje a la capacidad de las baterías y así también protegerlas, las cuales son de voltajes fijos de 12 V o 24V. En este experimento se utilizará un controlador básico el cual recibirá la energía del panel solar luego la adecuará a 12 VDC 5 A; tendrá dos salidas: una se dirigirá a la batería de carga y la otra al electrolizador. Si en algún momento el panel deja de percibir la radiación necesaria y consecuente ya no produce la potencia pico, el regulador captará la caída de tensión y automáticamente proporcionará al electrolizador energía almacenada de la batería, de lo contrario el controlador proporcionará la energía directa del panel solar. Este mecanismo servirá para evitar variaciones en la cantidad de electrones circulando en el electrolizador y al mismo tiempo variación en la producción de hidrógeno ya que los resultados se esperan que sean obtenidos en las condiciones óptimas de operación de los paneles solares. El procedimiento descrito se ve reflejado en la **figura 2.8**. Posteriormente en los siguientes capítulos se hablará de cómo aprovechar al máximo la energía del panel solar.

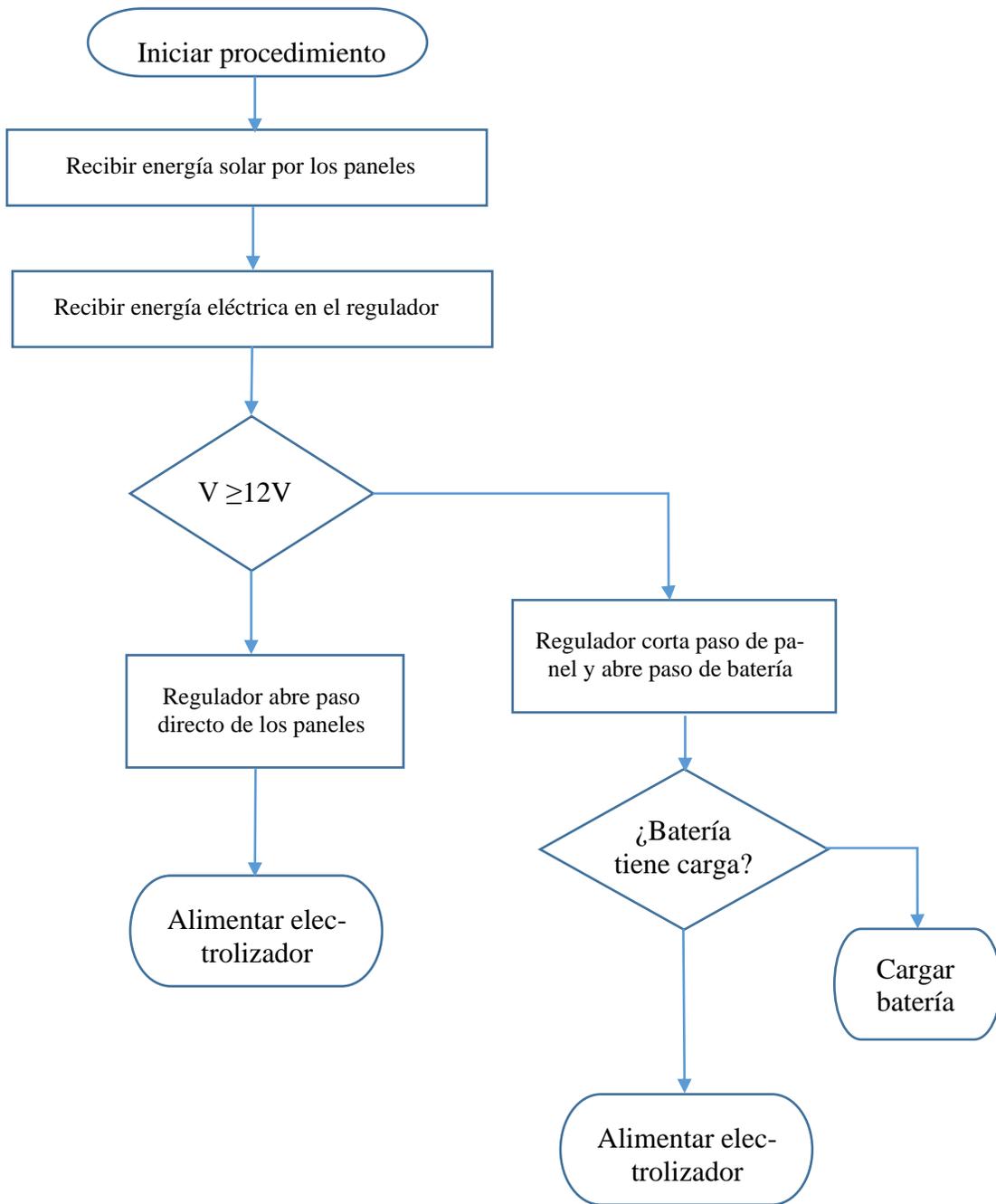


Figura 2.8 Diagrama de flujo de energía para el experimento

2.6.3. Acoplamiento de sistema de paneles solares

El panel solar a utilizar será el modelo EGE – 100P-36 de EcoGreenEnergy el cual es nuevo, ha sido probado y tiene garantía de funcionamiento por el fabricante en su compra. Las especificaciones que posee este modelo y que son importantes tomar en cuenta para su montaje se muestran a continuación:

Tabla 2.4 Especificaciones de paneles solares a utilizar (ENF SOLAR, 2019)

Potencia máxima nominal (Pmax)	100
Tolerancia de potencia	0-3 %
Corriente a Pmáx (Imp)	5.43 A
Voltaje a Pmáx (Vmp)	18.41 V
Corriente de corto circuito (Isc)	5.89 A
Voltaje de circuito abierto (Voc)	22.41 V
Temperatura de operación nominal (NOCT)	45±2 °C
Peso	7.7 kg
Dimensiones	1020x670x30mm
Sistema de voltaje máximo	1500V
Rango máximo de serie de fusibles	15 ^a
Tipo de celda	Policristalino
Clase de aplicación	A

La conexión que se hará después de la entrada de energía a través de los paneles solares será la de un controlador de tipo PWM el cual se encargará de estabilizar la energía a 24V y 12 V fijos según sea el voltaje de los paneles solares. Si el voltaje es entre 12V – 23V entonces el controlador entregará un voltaje medio de 12 V y si el voltaje excede los 24 voltios en adelante el controlador entregará 24 voltios promedio. Los controladores detectarán automáticamente estas variaciones y si las baterías están totalmente cargadas antes de empezar el experimento el paso de corriente del panel a la carga (el electrolizador) será directo, pero siempre modulando el voltaje a 12V, es por eso que hay que procurar cargarlas antes para que cuando el controlador detecte una disminución de voltaje producido por nubes que bloqueen los rayos de luz este pueda proveer de la energía recolectada anteriormente. El uso del controlador tiene como función principal el regular el voltaje del panel con dos motivos: proteger las baterías de voltajes altos para que no se dañen y evitar fluctuaciones en el voltaje entregado del panel para que los datos del experimento sean consistentes a condiciones óptimas de trabajo.

Tabla 2.5 Especificaciones de regulador de voltaje a utilizar (Victron energy, 2019).

Blue Solar PWM-Pro	12/24-5	12/24-10	12/24-20	12/24-30
Tensión de la batería	12/24V con detección automática de la tensión de entrada			
Corriente de carga nominal	5 A	10 A	20 A	30 A
Desconexión automática de la carga	Sí			
Tensión solar máxima	28 V/55 V (1)			
Autoconsumo	< 10 mA			
Salida de carga	Control manual + desconexión por baja tensión			
Protección	Inversión de la polaridad de la batería (fusible) Cortocircuito de salida Sobretemperatura			
Sensor de temperatura de la batería	Opcional (artículo SCC940100100)			
Compensación de temperatura	-30 mV / °C, -60 mV / °C resp. (si tiene el sensor de temperatura instalado)			
Panel remoto	Opcional (artículo SCC900300000)			
Puesta a tierra	Positivo común			
Rango de temp. de funcionamiento	-20 a +50°C			
Humedad (sin condensación)	Máx. 98 %			
VALORES PREDETERMINADOS				
Carga de absorción (2)	14,4 V/28,8 V			
Carga de flotación (2)	13,8 V/27,6 V			
Carga de ecualización (2)	14,6 V/29,2 V			
Desconexión de carga por baja tensión	11,1 V/22,2 V			
Reconexión de carga por baja tensión	12,6 V/25,2 V			

El cuadro anterior (tabla 2.5) describe las características del controlador a utilizar incluyendo los rangos máximos de trabajo en voltaje y corriente. Se tiene planificado trabajar con un rango de corriente de 20 A lo cual deja el estado de funcionamiento del controlador en 12/24-20. En el diagrama siguiente **figura 2.9** se muestra el orden de conexión de los componentes eléctricos y electrónicos para poder regular el paso de energía y evitar inconsistencias debido a este factor eléctrico durante el experimento

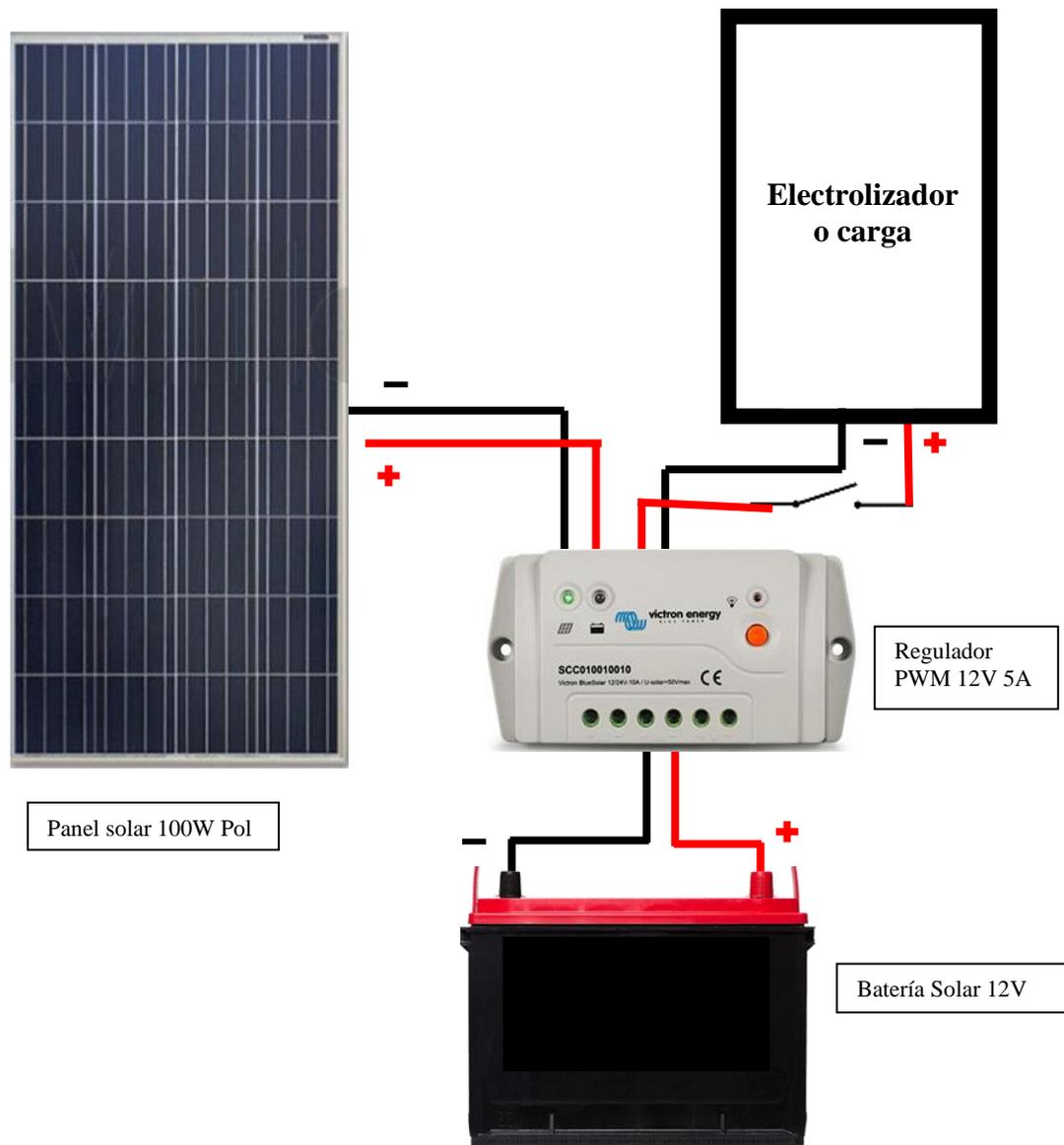


Figura 2.9 Diagrama general de Interconexión de elementos de red eléctrica del experimento

2.7. Medidas de seguridad

2.7.1. Generalidades del gas hidrógeno

El hidrógeno es el más ligero de los gases (la densidad es de 84 g/m^3 a una temperatura de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 bar). Es por eso que el hidrógeno al escaparse inmediatamente se elevará hacia arriba y se acumulan en los techos o zonas similares. La liberación de la presión de hidrógeno a temperatura normal tiene como resultado (a diferencia de otros gases) en un ligero aumento de la temperatura. La temperatura se eleva desde 20 hasta $25 \text{ }^\circ\text{C}$ cuando la presión cae desde 175 hasta 1 bar . Este aumento de la temperatura no es suficiente para hacer que el hidrógeno escapado se encienda por sí mismo, ya que la temperatura de ignición se encuentra a $600 \text{ }^\circ\text{C}$. El hidrógeno cuando se combina con el aire o el oxígeno y se enciende se quemará y

producirá agua. El hidrógeno también puede reaccionar con otros agentes oxidantes, por ejemplo, cloro o gas de la risa. Cuando el hidrógeno se combina con un agente oxidante y luego se enciende, el proceso de combustión puede ser explosivo. Si este proceso se lleva a cabo en una sala cerrada, con un aumento rápido de presión, puede ser muy destructivo, y tiene lugar a causa del calor generado. Los niveles de concentración en el que el hidrógeno puede reaccionar con el aire a presión normal y temperatura normales, en comparación con otros gases combustibles, es muy amplia (el límite inferior de explosividad (LEL) es del 4% vol. siendo el límite superior de explosividad (UEL) del 75,6 % vol.). Las mezclas de Hidrógeno / aire se encienden a través de las fuentes de ignición que contienen muy poca la energía. La menor cantidad de energía necesaria para encender el hidrógeno es 0.019 mJ que sólo es 1/10 de la de gas propano. Por ejemplo, partículas de herrumbre, que han sido transportados por una corriente rápida de hidrógeno puede desarrollar la chispa de encendido a través de la carga electrostática o por golpear un objeto. Debido a que es difícil de reconocer o probar que esta sea la fuente de ignición, se cree injustamente que el hidrógeno es capaz de auto – encenderse (Linde, 2012).

2.7.2. Efectos potenciales para la salud

Se presenta a continuación los riesgos a la salud a la hora de manipular gas hidrógeno:

Inhalación: Asfixiante simple. Altas concentraciones de este gas pueden causar una atmósfera deficiente en oxígeno causando en individuos dolor de cabeza, zumbido en los oídos, mareos, somnolencia, inconsciencia, náusea, vómitos y depresión de todos los sentidos. La piel de la víctima puede adquirir una coloración azulada. En concentraciones inferiores de O₂ (<10%), puede causar pérdida de la conciencia, movimientos convulsivos, colapso respiratorio y muerte.

2.7.3. Medidas de precaución

Ante accidentes que se han ocasionado se puede tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

a) En caso de incendio

Punto de inflamación: No aplica.

Temperatura de auto ignición: 572°C (1060°F)

Límites de inflamabilidad:(en aire por volumen, %) Inferior (LEL): 4% Superior (UEL): 75% Evacuar a todo el personal de la zona en peligro. No extinguir hasta que el suministro de hidrógeno esté cerrado y controlado. Inmediatamente enfriar los cilindros rociándolos con agua desde lo más lejos posible. Tener cuidado de extinguir las llamas: si las llamas se extinguen sin cortar la fuente de suministro de hidrógeno puede ocurrir una explosión. El fuego y la explosión resultante podrían causar graves daños al equipo y al personal o muerte alrededor de una gran área. Si es posible y si no hay peligro, cerrar el suministro del gas hidrógeno mientras se continúa rociando los cilindros con agua. Si un camión que transporte cilindros se ve involucrado en el incendio, aislar un área 1600 metros (1 milla) a la redonda.

Combatir el incendio desde una distancia segura, utilizando soportes fijos para las mangueras.

Equipo contra incendios:

Los socorristas o personal de rescate deben contar como mínimo, con un aparato de respiración auto-contenido y protección personal completa a prueba de fuego (equipo para línea de fuego)

b) En caso de escape accidental

En caso de un escape despejar el área afectada. Considerar la evacuación hacia un lugar contrario a la dirección del viento, por lo menos 800 metros (1/2 milla) a la redonda. Eliminar toda fuente de ignición. La presencia de una llama de hidrógeno se puede detectar acercándose cautelosamente y extendiendo una escoba de paja para hacer la llama visible. Si es posible y no hay peligro, cerrar el suministro de hidrógeno. Nunca entrar al área si la concentración de hidrógeno en el aire es mayor del 10% del límite inferior de explosividad (0.4%). Si el escape se originó por problemas en un equipo o tubería de proceso, inertizarlos haciendo circular gas inerte (nitrógeno) a través de ellos por lo menos durante una hora antes de iniciar la correspondiente reparación. Mientras tanto el área se debe ventilar y permanecer aislada hasta que el gas se haya dispersado.

2.7.4. Equipo para la etapa experimental de la obtención de hidrógeno

Para el desarrollo de la etapa experimental se tendrán en cuenta las anteriores medidas para la seguridad personal y de las instalaciones donde se realice el experimento para llevar a cabo de manera correcta y sin accidentes.

Como se explicó en el apartado 2.4 la etapa experimental consta de la realización de la electrólisis del agua con la ayuda del electrolito NaOH para la obtención del gas hidrógeno para el cual el sistema se verá suministrado de energía eléctrica proveniente de 2 paneles solares conectados en paralelo, se utilizarán electrodos de acero inoxidable, que estarán dentro de probetas invertidas para la medición del volumen de gas formado.

Para la realización del experimento se necesita tener los paneles solares en exterior para recibir la energía solar y el demás equipo donde se realizará la electrólisis en un área ventilada. Como se vio el experimento está dividido en 2 etapas que son:

- a) A temperatura constante del electrolito
- b) A concentración del electrolito constante

En el espacio en que se realice el experimento no debe de haber una fuente posible de ignición debido al carácter explosivo del hidrógeno tales como llamas de cocina ó mecheros, cigarras e incluso un toma corriente cerca ó materiales que puedan ocasionar cargas electrostáticas debido a la facilidad de ignición del hidrógeno en caso de que se dé una pequeña fuga de gas hidrógeno.

Para la etapa experimental se ha dejado un intervalo de tiempo de 1 a 7 minutos para que así el volumen del gas hidrógeno formado no sea tanto y sea fácil su disposición final para la

cual existen 2 posibilidades la primera que sería quemarlo y así al reaccionar se vuelve a formar agua y la segunda liberarlo al ambiente en el exterior ya que debido a su baja densidad este inmediatamente asciende. Esto debido a que existe el peligro a la hora de almacenarlo, por tanto, cada prueba que se realice y luego de la toma de datos se liberará el gas hidrógeno para evitar un posible accidente en su almacenaje, además a la hora de parar el equipo electrolizador de acuerdo a los tiempos establecidos se instalará en el mecanismo un switch en el sistema para cuando se desee parar la prueba, detenga el paso de corriente a los electrodos y así se detenga la producción del gas

Por último, el equipo de protección personal que se necesita consta de guantes y gafas debido a la manipulación del electrolito que es una base altamente alcalina que podría generar quemaduras leves ya sea por su naturaleza química o por la liberación de entalpia en contacto con el agua.

3. CAPITULO III: ETAPA EXPERIMENTAL

3.1. Preparaciones previas

Habiendo desarrollado el diseño de la metodología de la investigación y el diseño de la metodología experimental es posible proseguir con la siguiente etapa correspondiente a la ejecución del experimento. En el diagrama de la metodología de trabajo de investigación se puede observar que el presente capítulo de trabajo “ETAPA EXPERIMENTAL” corresponde al paso 4 donde se desarrolla la ejecución del experimento y da paso a las comprobaciones teóricas postuladas en los capítulos anteriores. Es importante aclarar que el desarrollo de esta etapa, está condicionado al estado de emergencia debido a la pandemia de COVID-19 por lo que existen algunas modificaciones a lo planteado inicialmente, las cuales están detalladas en una nota aclaratoria en las observaciones al final del documento.

Material y equipo a utilizar



Figura 3.1 Equipo para realización de pruebas

Tabla 3.1 Material y equipo a utilizar

A	3 L agua destilada	I	1 Hot Plate con agitador magnético
B	1500g NaOH	J	1 balanza granataria
C	1 panel solar 100W	K	2 soportes con pinzas universales
D	1 controlador PMW 5-20A 12V	L	2 probetas 100 ml
E	1 batería solar 12V	M	1 Beaker 1L
F	6 m cables 6mm para conexión eléctrica	N	1 cronómetro
G	1 multímetro Digital	O	1 par de gafas protectoras
H	1 termómetro digital	P	1 par de guantes de hule

Conexión de los paneles solares.

Tabla 3.2 Pasos para preparar el sistema eléctrico

a		<p>Según las especificaciones técnicas a la hora de instalar paneles solares la medición se debe realizar en un horario entre las 10: am y las 2:00 pm que es el período cuando la posición de la tierra es la óptima al disminuir la cantidad de atmósfera que el rayo proveniente del sol tiene que pasar por estar la superficie lo más perpendicularmente posible en dirección al sol.</p>
b		<p>Una vez verificado la posición de los paneles solares se prosigue a cerciorarse que la conexión que va desde las baterías hasta el controlador esté lista antes de conectar los paneles, esto debido a las indicaciones técnicas de operación del dispositivo. Debido a la configuración del controlador a 12V solo será necesario el uso de una batería de 12V y un panel solar.</p>
c		<p>Después de verificar la conexión de las baterías se procede a conectar los paneles solares al controlador de carga. Estas conexiones deben realizarse con sumo cuidado ya que existe corriente fluyendo de la batería al controlador y del panel al controlador.</p>

Tabla 3.3 Pasos para preparar el sistema eléctrico (continuación)

d		<p>Cuando el sistema de panel solar batería esté conectado se procede a conectar al controlador las conexiones que van al electrolizador teniendo en cuenta que el switch para controlar el paso de corriente ya debe estar instalado en una de las terminales de los cables. Cuando finalice esta conexión el equipo proveedor de energía estará listo para usarse.</p>
---	---	--

3.2. Proceso de producción de gases a temperatura constante

PARTE A Preparación de solución electrolítica

Para poder iniciar con el proceso de medición de generación de gases es necesario preparar las soluciones a electrolizar.

*Mantener guantes, mascarilla y gafas de protección en todo el procedimiento.

Tabla 3.4 Preparación solución para parte A

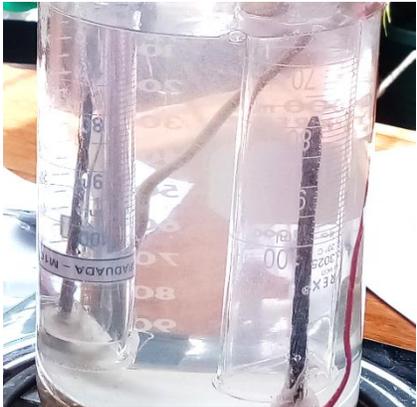
a		<p>Calibrar la balanza y medir la cantidad de 200 g de electrolito para una medida de 1L de agua destilada. Recordar que si se utilizará un recipiente para depositar el hidróxido a la hora de pesarlo hay que tomar en cuenta el peso de ese recipiente.</p>
b		<p>Mezclar el electrolito con un litro de agua destilada medida en un beaker, aplicando el NaOH al agua y no al contrario.</p>

continua....

PARTE B Puesta en marcha del experimento

Cuando las preparaciones para iniciar el experimento estén realizadas se procede a ejecutar el experimento.

Tabla 3.5 Marcha de ejecución del experimento parte B

a		<p>Se prepara el beaker con electrodos fijados en la base. El interruptor debe estar apagado al inicio y la cubeta debe estar limpia de cualquier sustancia para evitar mezclar con el electrolito.</p>
b		<p>Se ubican las probetas, una para el ánodo y otra para el cátodo sujetadas por las pinzas en los soportes universales para que quedan de manera invertida.</p>
c		<p>Se introduce la manguera del dispensador al interior de la probeta invertida de manera que el extremo libre quede topando con la superficie superior de la probeta.</p>

continua....

Tabla 3.4 Marcha del experimento parte B (continuación)

d		<p>Luego de posicionarla se procede a utilizar el dispensador para vaciar de aire la probeta y esta quedará llena de solución. El procedimiento se tiene que realizar mientras la probeta esté por lo menos sumergida una quinta parte en la solución ya que al llenarse el nivel del beaker bajará un poco.</p>
e		<p>El procedimiento se realiza hasta que la probeta quede totalmente llena de solución y se repite para ambas probetas.</p>
f		<p>Antes de iniciar cualquier prueba se realiza la toma de temperatura, se anota y luego se procede a iniciar la prueba</p>
g		<p>Cuando las probetas estén aseguradas (con pinzas para tubos de ensayo) se permite el paso de corriente al mismo tiempo que se activa el cronómetro. Se observará como las burbujas saldrán de los electrodos empezando a llenar las probetas.</p>

continua....

Tabla 3.4 Marcha del experimento parte B (continuación)

h		<p>Cuando los tiempos establecidos por la matriz de recolección de datos se alcancen se abrirá el circuito y se detendrá el cronómetro.</p>
i		<p>El volumen del gas recolectado será anotado y luego el gas se liberará en un espacio abierto para realizar la siguiente prueba.</p>

Una vez que se realice la primera prueba a 20% de concentración se le harán las adiciones de NaOH necesarias para realizar las pruebas consiguientes a diferentes concentraciones. En el beaker se mantendrá una marca de aforo para que la cantidad de ml de solución pueda ser monitoreada y mantenida constante en el tiempo, si llegase a faltar agua por evaporación o gasificación se añadirá para alcanzar el aforo.

La Tabla de resultados se presenta a continuación:

Tabla 3.6 Resultados experimentales para variación de concentraciones temperatura ambiente A

	Temp ambiente (°C)	Concentración (% P/V)	Tiempo para vol. 100ml (s)	Rendimiento (ml H ₂ /s)	Rendimiento (g H ₂ /s)	Rendimiento (g H ₂ /h)	Corriente teórica calculada (A)
A1	27.60	20.00	181.82	0.55	4.49E-05	0.16	4.30
A2	28.30	25.40	221.15	0.45	3.69E-05	0.13	3.53
A3	29.80	33.40	257.73	0.39	3.15E-05	0.11	3.01
A4	30.90	43.90	329.00	0.30	2.46E-05	0.09	2.35
A5	28.00	50.00	358.06	0.28	2.28E-05	0.08	2.18

Tabla 3.7 Resultados experimentales para variación de concentraciones temperatura ambiente B

	Potencia consumida (W)	Rendimiento teórico (Kg H ₂ /KWh)	Corriente suministrada (A)	Potencia suministrada (W)	Rendimiento práctico (Kg H ₂ /KWh)	Eficiencia (%)
A1	5.29	0.0306	10.50	18.90	0.0086	27.99
A2	4.34	0.0306	10.10	18.18	0.0073	23.87
A3	3.70	0.0306	10.07	18.13	0.0062	20.44
A4	2.89	0.0306	9.80	17.64	0.0050	16.39
A5	2.68	0.0306	9.50	17.10	0.0048	15.69

Para realizar los ejemplos de cálculos se hará en base a la prueba A1 Representada en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

a) Rendimiento (ml H₂/s)

$$\text{Rendimiento} = \frac{100 \text{ ml H}_2 \text{ (hidrogeno producido)}}{182.26 \text{ s (tiempo en producir 100 ml H}_2\text{)}} = 0.55 \frac{\text{ml H}_2}{\text{s}}$$

b) Masa de hidrógeno en 100 ml producidos:

m = masa hidrógeno (g)

P = 1 atm.

T = 27.60 °C = 300.75 K

PM H₂ = 2.01594 g/mol

V = 0.1 l

R = 0.08205 $\frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

$$P * V = n * R * T$$

$$n = \frac{m}{PM}$$

$$m = \frac{P * V * PM}{R * T}$$

$$m \text{ (g)} = \frac{1 \text{ atm} * 0.1 \text{ l} * 2.01594 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.08205 \frac{\text{atm} * \text{l}}{\text{mol} * \text{K}} * 300.75 \text{ K}} = 0.008169 \text{ g}$$

c) Rendimiento de la reacción (g H₂/s)

$$\text{Rendimiento} = \frac{0.008169 \text{ gH}_2 \text{ (hidrogeno producido)}}{181.82 \text{ s (tiempo en producir 100 ml H}_2\text{)}} = 4.49 \times 10^{-5} \frac{\text{g H}_2}{\text{s}}$$

d) Rendimiento de la reacción (g H₂/h)

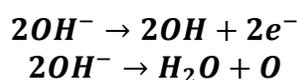
Conversión de g H₂ producido por segundo a g H₂ por hora

$$\text{Rendimiento} = 4.49 \times 10^{-5} \frac{\text{g H}_2}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1\text{h}} = 0.161745 \frac{\text{g H}_2}{\text{h}}$$

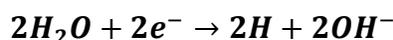
e) Corriente consumida en la reacción (calculada teóricamente)

A continuación, se presentan las semirreacciones para una solución alcalina:

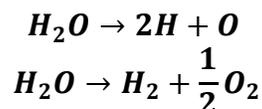
Semirreacción en el ánodo (Mendoza, 2004) :



Semirreacción en el cátodo (Mendoza, 2004):



Reacción total (Mendoza, 2004) :



Ecuación de Faraday extraída de libro de corrosión (Mendoza, 2004).

I = corriente consumida (A)

m = 0.008169 g (masa generada H₂)

F = 96485.3365 $\frac{\text{C}}{\text{mol}}$ (constante de Faraday)

t = 181.82 s (tiempo consumido)

PM H₂ = 2.01594 (peso molecular)

z = 2 (moles de electrones involucrados).

Ley de Faraday de la electrólisis

$$I = \frac{m * F * z}{t * PM}$$

$$I = \frac{0.008169 \text{ g} * 96485.3365 \frac{\text{A} * \text{s}}{\text{mol}} * 2}{181.82 \text{ s} * 2.01594 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 4.30\text{A}$$

f) Potencia consumida en la reacción

Para este cálculo se utiliza un valor de voltaje de 1.23 el cual pertenece al potencial estándar teórico en la electrólisis del agua y la corriente calculada en el paso anterior (Rayner-Canham, 2000).

I = corriente consumida (A)

V = Voltaje consumido (v)

$$P = I * V$$

$$P = 4.30 A * 1.23 = 5.29 \text{ Watts}$$

g) Rendimiento de la electrólisis teórico (kg H₂/KWh)

El rendimiento es calculado a partir de concepto de resultado de interés a partir de necesidades, ambos como un valor cuantitativo en otras palabras puede expresarse en términos de la salida deseada y la entrada requerida. Puede hacerse referencia a los conceptos de balance de materia y energía, así como a los de termodinámica para aplicar fórmulas (Cengel, 2012).

P = potencia consumida (W)

m = masa de hidrógeno por hora (g/h)

$$R = \frac{\text{salida deseada (m)}}{\text{entrada requerida (P)}}$$

$$R = \frac{0.1617 \frac{g H_2}{h}}{5.29 \text{ Watt}} \times \frac{1kg * 1000W}{1000g * 1kW} = 0.0306 \frac{kg H_2}{kWh}$$

h) Potencia suministrada por el panel fotovoltaico

El valor de la caída de potencial corresponde a 1.8 y es mayor al de la fem teórica debido a los efectos de sobretensión. Se hace uso de la corriente medida en el experimento.

I = corriente medida (A)

V = Voltaje de reacción (v)

$$P = I * V$$

$$P = 10.50 A * 1.8 = 18.90 \text{ Watts}$$

i) Rendimiento de la electrólisis práctico (kg H₂/KWh)

El rendimiento es calculado a partir de concepto de resultado de interés a partir de necesidades, ambos como un valor cuantitativo en otras palabras puede expresarse en términos de la salida deseada y la entrada requerida. Puede hacerse referencia a los conceptos de balance de materia y energía, así como a los de termodinámica para aplicar fórmulas (Cengel, 2012).

P = potencia suministrada (W)

m = masa de hidrógeno (g)

$$R = \frac{\textit{salida deseada (m)}}{\textit{entrada requerida (P)}}$$

$$R = \frac{0.1617 \frac{g H_2}{h}}{18.90 \textit{ Watt}} \times \frac{1kg * 1000W}{1000g * 1kW} = 0.008556 \frac{kg H_2}{kWh}$$

j) Eficiencia de la electrólisis.

Puede hacerse referencia a los conceptos de balance de materia y energía, así como a los de termodinámica para aplicar fórmulas (Cengel, 2012).

$$\textit{Eficiencia} = \frac{\textit{rendimiento real}}{\textit{rendimiento teorico}} \times 100\%$$

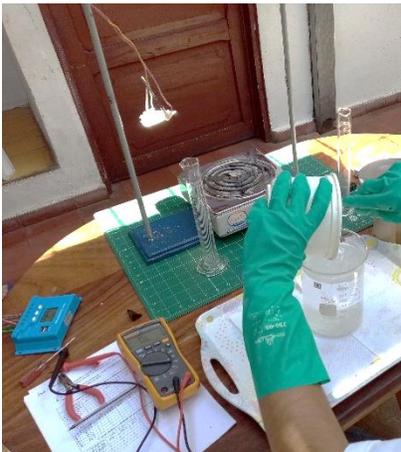
$$\textit{Eficiencia} = \frac{0.008556 \frac{kg H_2}{kWh}}{0.0306 \frac{kg H_2}{kWh}} \times 100\% = \mathbf{27.9\%}$$

3.3. Proceso de producción de gases a temperatura variable

PARTE C Proceso de producción a temperatura variable.

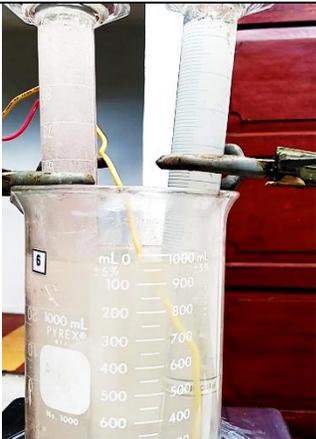
*Mantener guantes, mascarilla y gafas de protección en todo el procedimiento.

Tabla 3.8 Proceso de producción a temperatura variable.

a		<p>Realizar las mezclas de electrolito que obtuvieron más rendimiento en la parte anterior. Empezar con la concentración más baja para posteriormente agregar lo necesario para la nueva concentración. Mezclar el electrolito, aplicando el NaOH al agua y no al contrario.</p>
b		<p>Utilizar la cocina eléctrica para calentar la solución a diferentes temperaturas en un rango de 30°C a 95°C, tomando 7 temperaturas de un espaciado de aproximadamente 10°C entre sí. A cada temperatura se le realizará una prueba de rendimiento de producción de tiempo producido para lograr 100 ml de hidrógeno gas.</p>
c		<p>Cuando la temperatura a medir es menor a la que se tiene y en aras de reducir el tiempo de espera se puede realizar un baño maría con hielo para reducir la entalpía de la solución.</p>

continua...

Tabla 3.9 Proceso de producción a temperatura variable (continuación).

d		<p>El procedimiento del experimento una vez controlada la temperatura es el mismo que la parte B de la marcha de laboratorio. Los datos se anotarán para cada temperatura y el gas acumulado al igual que en la parte anterior se liberará al terminar el experimento.</p>
----------	---	--

La Tabla de resultados para esta parte se presenta a continuación:

Tabla 3.10 Resultados prueba temperatura variable 20% p/v A

20% P/V NaOH						
	Temperatura (°C)	tiempo para V100ml (s)	Rendimiento (ml H ₂ /s)	Rendimiento (g H ₂ /s)	Rendimiento (g H ₂ /h)	Corriente teórica calculada (A)
B1	27.60	182.26	0.55	4.48E-05	0.16	4.29
B2	33.30	149.52	0.67	5.36E-05	0.19	5.13
B3	43.00	105.50	0.95	7.37E-05	0.27	7.05
B4	52.30	82.22	1.22	9.18E-05	0.33	8.79
B5	69.40	60.15	1.66	1.19E-04	0.43	11.41
B6	80.10	51.48	1.94	1.35E-04	0.49	12.93
B7	95.20	40.43	2.47	1.65E-04	0.59	15.79

Tabla 3.11 Resultados prueba temperatura variable 20% p/v B

20% P/V NaOH						
	Potencia consumida (W)	Rendimiento teórico (Kg H ₂ /KWh)	Corriente suministrada (A)	Potencia suministrada (W)	Rendimiento práctico (Kg H ₂ /KWh)	Eficiencia (%)
B1	5.28	0.0306	10.50	18.90	0.009	27.92
B2	6.31	0.0306	13.70	24.66	0.008	25.60
B3	8.67	0.0306	15.00	27.00	0.010	32.12
B4	10.81	0.0306	18.13	32.63	0.010	33.13
B5	14.04	0.0306	18.50	33.30	0.013	42.16
B6	15.91	0.0306	19.30	34.74	0.014	45.79
B7	19.42	0.0306	20.10	36.18	0.016	53.69

Tabla 3.12 Resultados prueba temperatura variable 25.4% p/v A

25.4% P/V NaOH						
	Temperatura (°C)	tiempo para V100ml (s)	Rendimiento (ml H2/t)	Rendimiento (g H2/s)	Rendimiento (g H2/h)	Corriente teórica calculada (A)
C1	28.30	238.77	0.42	3.41E-05	0.12	3.27
C2	33.30	193.00	0.52	4.15E-05	0.15	3.98
C3	42.00	129.56	0.77	6.02E-05	0.22	5.76
C4	50.10	92.83	1.08	8.19E-05	0.29	7.84
C5	60.00	70.13	1.43	1.05E-04	0.38	10.07
C6	75.00	51.32	1.95	1.38E-04	0.50	13.16
C7	88.00	38.55	2.59	1.76E-04	0.64	16.89

Tabla 3.13 Resultados prueba temperatura variable 25.4% p/v B

25.4% P/V NaOH						
	Potencia consumida (W)	Rendimiento teórico (Kg H2/KWh)	Corriente suministrada (A)	Potencia suministrada (W)	Rendimiento práctico (Kg H2/KWh)	Eficiencia (%)
C1	4.02	0.0306	10.10	18.18	0.007	22.11
C2	4.89	0.0306	13.30	23.94	0.006	20.43
C3	7.08	0.0306	14.60	26.28	0.008	26.96
C4	9.64	0.0306	17.50	31.50	0.009	30.60
C5	12.38	0.0306	18.10	32.58	0.012	38.00
C6	16.19	0.0306	18.90	34.02	0.015	47.59
C7	20.78	0.0306	19.70	35.46	0.018	58.60

Tabla 3.14 Resultados prueba temperatura variable 33.4% p/v A

33.4% P/V NaOH						
	Temperatura (°C)	tiempo para V100ml (s)	Rendimiento (ml H2/t)	Rendimiento (g H2/s)	Rendimiento (g H2/h)	Corriente teórica calculada (A)
D1	29.80	257.73	0.39	3.15E-05	0.11	3.01
D2	36.30	150.00	0.67	5.29E-05	0.19	5.07
D3	43.40	111.22	0.90	6.98E-05	0.25	6.68
D4	52.30	67.71	1.48	1.11E-04	0.40	10.67
D5	60.50	65.17	1.53	1.13E-04	0.41	10.82
D6	71.00	48.24	2.07	1.48E-04	0.53	14.17
D7	85.00	33.90	3.14	2.02E-04	0.73	19.37

Tabla 3.15 Resultados prueba temperatura variable 33.4% p/v B

33.4% P/V NaOH						
	Potencia consumida (W)	Rendimiento teórico (Kg H ₂ /KWh)	Corriente suministrada (A)	Potencia suministrada (W)	Rendimiento práctico (Kg H ₂ /KWh)	Eficiencia (%)
D1	3.70	0.0306	10.07	18.13	0.0062	20.44
D2	6.23	0.0306	13.25	23.85	0.0080	26.13
D3	8.22	0.0306	14.59	26.26	0.0096	31.29
D4	13.13	0.0306	18.00	32.40	0.0124	40.51
D5	13.30	0.0306	18.35	33.03	0.0123	40.28
D6	17.43	0.0306	19.17	34.51	0.0154	50.50
D7	23.83	0.0306	19.97	35.95	0.0203	66.29

Ejemplos de cálculos de valores representados en tablas de resultados.

Para realizar los ejemplos de cálculos se hará en base a la prueba C1 Representada en la Tabla 3.10.

a) Rendimiento (ml H₂/s)

$$\text{Rendimiento} = \frac{100 \text{ ml H}_2 \text{ (hidrógeno producido)}}{238.77 \text{ s (tiempo en producir 100 ml H}_2\text{)}} = 0.42 \frac{\text{ml H}_2}{\text{s}}$$

b) Masa de hidrógeno en 100 ml producidos:

m = masa hidrógeno (g)

P = 1 atm.

T = 28.30 °C = 301.45 K

PM H₂ = 2.01594 g/mol

V = 0.1 l

R = 0.08205 $\frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

$$P * V = n * R * T$$

$$n = \frac{m}{PM}$$

$$m = \frac{P * V * PM}{R * T}$$

$$m \text{ (g)} = \frac{1 \text{ atm} * 0.1 \text{ l} * 2.01594 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.08205 \frac{\text{atm} * \text{l}}{\text{mol} * \text{K}} * 301.45 \text{ K}} = 0.00815 \text{ g}$$

c) Rendimiento (g H₂/s)

$$\text{Rendimiento} = \frac{0.00815 \text{ g H}_2 \text{ (hidrógeno producido)}}{238.77 \text{ (tiempo en producir 100 ml H}_2\text{)}} = 3.41 \times 10^{-5} \frac{\text{g H}_2}{\text{s}}$$

d) Rendimiento (g H₂/h)

Conversión de *g H₂* producido por segundo a *g H₂* por hora

$$\text{Rendimiento} = 3.41 \times 10^{-5} \frac{\text{g H}_2}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 0.1228 \frac{\text{g H}_2}{\text{h}}$$

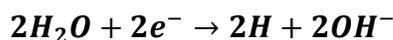
e) Corriente consumida (calculada teóricamente)

A continuación, se presentan las semirreacciones para una solución alcalina:

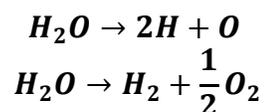
Semirreacción en el ánodo (Mendoza, 2004) :

- $2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{OH} + 2\text{e}^-$
- $2\text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$

Semirreacción en el cátodo (Mendoza, 2004):



Reacción total (Mendoza, 2004) :



Ecuación de Faraday extraída de libro de corrosión (Mendoza, 2004).

I = corriente consumida (A)

m = 0.00815 g (masa generada H₂)

F = 96485.3365 $\frac{\text{C}}{\text{mol}}$ (constante de Faraday)

t = 238.77 s (tiempo consumido)

PM H₂ = 2.01594 (peso molecular)

z = 2 (moles de electrones involucrados).

Ley de Faraday de la electrólisis

$$I = \frac{m * F * z}{t * PM}$$

$$I = \frac{0.00815 \text{ g} * 96485.3365 \frac{\text{A} * \text{s}}{\text{mol}} * 2}{238.77 \text{ s} * 2.01594 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 3.267\text{A}$$

f) Potencia consumida

Para este cálculo se utiliza un valor de voltaje de 1.23 el cual pertenece al potencial estándar teórico en la electrólisis el agua y el valor de la corriente calculada en el paso anterior (Rayner-Canham, 2000).

I = corriente consumida (A)

V = Voltaje consumido (v)

$$P = I * V$$

$$P = 3.267A * 1.23 = \mathbf{4.01841 Watts}$$

g) Rendimiento de la electrólisis teórico (kg H₂/KWh)

El rendimiento es calculado a partir de concepto de resultado de interés a partir de necesidades, ambos como un valor cuantitativo en otras palabras puede expresarse en términos de la salida deseada y la entrada requerida. Puede hacerse referencia a los conceptos de balance de materia y energía, así como a los de termodinámica para aplicar fórmulas (Cengel, 2012).

P = potencia consumida (W)

m = masa de hidrógeno por hora (g/h)

$$R = \frac{\text{salida deseada (m)}}{\text{entrada requerida (P)}}$$

$$R = \frac{0.1228 \frac{g H_2}{h}}{4.01841 Watt} \times \frac{1kg * 1000W}{1000g * 1kW} = 0.0306 \frac{kg H_2}{kWh}$$

Potencia suministrada

I = corriente medida (A)

V = Voltaje de reacción (v)

$$P = I * V$$

$$P = 10.10 A * 1.8 = \mathbf{18.18 Watts}$$

h) Rendimiento de la electrólisis práctico (kg H₂/KWh)

El rendimiento es calculado a partir de concepto de resultado de interés a partir de necesidades, ambos como un valor cuantitativo en otras palabras puede expresarse en términos de la salida deseada y la entrada requerida. Puede hacerse referencia a los conceptos de balance de materia y energía, así como a los de termodinámica para aplicar fórmulas (Cengel, 2012).

P = potencia suministrada (W)

m = masa de hidrógeno (g)

$$R = \frac{\textit{salida deseada (m)}}{\textit{entrada requerida (P)}}$$

$$R = \frac{0.1228 \frac{g H_2}{h}}{18.18 \textit{ Watt}} \times \frac{1kg * 1000W}{1000g * 1kW} = 0.00675 \frac{kg H_2}{kWh}$$

i) **Eficiencia de la electrólisis.**

$$\textit{Eficiencia} = \frac{\textit{rendimiento real}}{\textit{rendimiento teórico}} \times 100\%$$

$$\textit{Eficiencia} = \frac{0.00675 \frac{kg H_2}{kWh}}{0.0306 \frac{kg H_2}{kWh}} \times 100\% = \mathbf{22.1\%}$$

3.3.1. Pruebas para bajas concentraciones a temperatura ambiente

Debido a que los resultados en las pruebas de las concentraciones a temperatura ambiente arrojaron datos que podrían indicar un mayor rendimiento para concentraciones más bajas manteniendo la temperatura ambiente, se procede a realizar pruebas de concentraciones que varían de 0% (P/V) a 15% (P/V). Utilizando el material y equipo de las secciones anteriores se procede a evaluar el rendimiento de acuerdo al procedimiento establecido en los puntos previos.

*Mantener guantes, mascarilla y gafas de protección en todo el procedimiento.



Figura 3.2 Preparación pruebas a bajas concentraciones

En la realización del experimento se tomó como base de volumen medido 2 ml para las concentraciones de 0.02%, 0.06% y 0.1% debido a que el tiempo que tardaba en generar esa cantidad de gas era lo suficientemente extenso para registrar un dato significativo siendo para la menor concentración de hasta 5 min para producir los 2 ml. Para las concentraciones de 0.5% a 15% se toma como base un volumen de 10 ml bajo las mismas circunstancias anteriores. El tomar volúmenes diferentes para medir el tiempo no afecta en este caso ya que los tiempos son largos y luego se estandarizan las medidas al calcular el rendimiento dividiendo el volumen por el tiempo. Ver figuras de la 3.3 a la 3.8 para observar la diferencia de producción en el burbujeo producido.



Figura 3.3 Ausencia de burbujeo a concentración al 0% P/V



Figura 3.4 Burbujeo poco visible a las concentraciones de 0.02 %, 0.06% y 0.1% P/V



Figura 3.5 Poco burbujeo a concentración 0.5% P/V

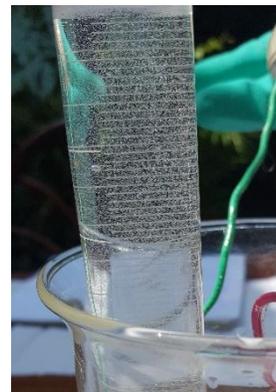


Figura 3.6 Burbujeo notable para concentración de 1% P/V

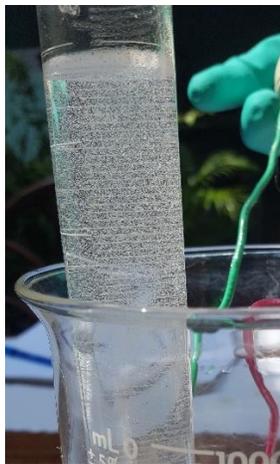


Figura 3.7 Burbujeo moderado para concentración de 5%



Figura 3.8 Abundante burbujeo concentraciones de 10% y 15% P/V

La Tabla de resultados para esta parte se presenta a continuación:

Tabla 3.16 Resultados experimentales para concentraciones bajas a T ambiente A

	Temp ambiente (°C)	Concentración (% P/V)	Vol medido	Tiempo para vol. 100ml (s)	Rendimiento (ml H ₂ /s)	Rendimiento (g H ₂ /s)	Rendimiento (g H ₂ /h)	Corriente teórica calculada (A)
E1	32.00	15.00	10	17.96	0.56	4.48E-05	0.1614	4.29
E2	31.00	10.00	10	18.54	0.54	4.36E-05	0.1569	4.17
E3	29.00	5.00	10	23.48	0.43	3.46E-05	0.1247	3.32
E4	31.00	1.00	10	75.13	0.13	1.08E-05	0.0387	1.03
E5	30.00	0.50	10	152.10	0.07	5.33E-06	0.0192	0.51
E6	29.00	0.10	2	164.54	0.01	9.88E-07	0.0036	0.09
E7	29.00	0.06	2	254.36	0.01	6.39E-07	0.0023	0.06
E8	28.00	0.02	2	305.40	0.01	5.34E-07	0.0019	0.05
E9	27.00	0.00	0	420.00	-	-	-	-

Tabla 3.17 Resultados experimentales para concentraciones bajas a T ambiente B

	Potencia consumida (W)	Rendimiento teórico (kg H ₂ /KWh)	Corriente suministrada (A)	Potencia suministrada (W)	Rendimiento práctico (kg H ₂ /KWh)	Eficiencia (%)
E1	5.28	0.0306	7.10	12.78	0.0126	41.31
E2	5.13	0.0306	5.45	9.81	0.0160	52.29
E3	4.08	0.0306	4.26	7.67	0.0163	53.18
E4	1.27	0.0306	0.97	1.75	0.0222	72.51
E5	0.63	0.0306	0.45	0.81	0.0237	77.45
E6	0.12	0.0306	0.08	0.14	0.0247	80.81
E7	0.08	0.0306	0.05	0.09	0.0256	83.64
E8	0.06	0.0306	0.04	0.07	0.0267	87.37
E9	-	-	-	-	-	-

Ejemplos de cálculos de valores representados en tablas de resultados.

Para realizar los ejemplos de cálculos se hará en base a la prueba **E1** Representada en la **Tabla 3.14 y 3.15**.

a) Rendimiento (ml H₂/s)

$$\text{Rendimiento} = \frac{10 \text{ ml H}_2 \text{ (hidrógeno producido)}}{17.96 \text{ s (tiempo en producir 10 ml H}_2\text{)}} = 0.5568 \frac{\text{ml H}_2}{\text{s}}$$

b) Masa de hidrógeno en 100 ml producidos:

m = masa hidrógeno (g)

P = 1 atm.

T = 32.00 °C = 305.15 K

PM H₂ = 2.01594 g/mol

V = 0.1 l

R = 0.08205 $\frac{\text{atm}\cdot\text{l}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$

$$P * V = n * R * T$$

$$n = \frac{m}{PM}$$

$$m = \frac{P * V * PM}{R * T}$$

$$m (g) = \frac{1 \text{ atm} * 0.01 \text{ l} * 2.01594 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.08205 \frac{\text{atm} * \text{l}}{\text{mol} * \text{K}} * 305.15 \text{ K}} = 0.000805 \text{ g}$$

c) Rendimiento (g H₂/s)

$$\text{Rendimiento} = \frac{0.000805 \text{ g H}_2 \text{ (hidrógeno producido)}}{17.96 \text{ (tiempo en producir 10 ml H}_2\text{)}} = 4.48 \times 10^{-5} \frac{\text{g H}_2}{\text{s}}$$

d) Rendimiento (g H₂/h)

Conversión de g H₂ producido por segundo a g H₂ por hora

$$\text{Rendimiento} = 4.48 \times 10^{-5} \frac{\text{g H}_2}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 0.1614 \frac{\text{g H}_2}{\text{h}}$$

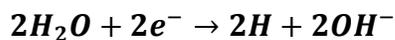
e) Corriente consumida (calculada teóricamente)

Se calcula a partir del valor teórico brindado por las ecuaciones. A continuación, se presentan las semirreacciones para una solución alcalina:

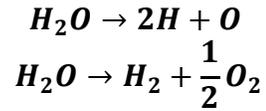
Semirreacción en el ánodo (Mendoza, 2004) :

- $2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{OH} + 2\text{e}^-$
- $2\text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$

Semirreacción en el cátodo (Mendoza, 2004):



Reacción total (Mendoza, 2004) :



Ecuación de Faraday extraída de libro de corrosión (Mendoza, 2004).

I = corriente consumida (A)

m = 0.000805 g (masa generada H₂)

F = 96485.3365 $\frac{C}{mol}$ (constante de Faraday)

t = 17.96 s (tiempo consumido)

PM H₂ = 2.01594 (peso molecular)

z = 2 (moles de electrones involucrados).

Ley de Faraday de la electrólisis

$$I = \frac{m * F * z}{t * PM}$$

$$I = \frac{0.000805 \text{ g} * 96485.3365 \frac{A * s}{mol} * 2}{17.96 \text{ s} * 2.01594 \frac{g}{mol}} = 4.29A$$

f) **Potencia consumida**

Para este cálculo se utiliza un valor de voltaje de 1.23 el cual pertenece al potencial estándar teórico en la electrólisis del agua (Rayner-Canham, 2000).

I = corriente consumida (A)

V = Voltaje consumido (v)

$$P = I * V$$

$$P = 4.29 * 1.23 = 5.276 \text{ Watts}$$

g) **Rendimiento de la electrólisis teórico (kg H₂/KWh)**

El rendimiento es calculado a partir de concepto de resultado de interés a partir de necesidades, ambos como un valor cuantitativo en otras palabras puede expresarse en términos de la salida deseada y la entrada requerida. Puede hacerse referencia a los conceptos de balance de materia y energía, así como a los de termodinámica para aplicar fórmulas (Cengel, 2012).

P = potencia consumida (W)

m = masa de hidrógeno por hora (g/h)

$$R = \frac{\text{salida deseada (m)}}{\text{entrada requerida (P)}}$$

$$R = \frac{0.1614 \frac{g H_2}{h}}{5.276 \text{ Watt}} \times \frac{1kg * 1000W}{1000g * 1kW} = 0.0306 \frac{kg H_2}{kWh}$$

h) Potencia suministrada

I = corriente medida (A)

V = Voltaje de reacción (v)

$$P = I * V$$

$$P = 10.10 A * 1.8 = 12.78 \text{ Watts}$$

i) Rendimiento de la electrólisis práctico (kg H₂/KWh)

El rendimiento es calculado a partir de concepto de resultado de interés a partir de necesidades, ambos como un valor cuantitativo en otras palabras puede expresarse en términos de la salida deseada y la entrada requerida. Puede hacerse referencia a los conceptos de balance de materia y energía, así como a los de termodinámica para aplicar fórmulas (Cengel, 2012).

P = potencia suministrada (W)

m = masa de hidrógeno (g)

$$R = \frac{\text{salida deseada (m)}}{\text{entrada requerida (P)}}$$

$$R = \frac{0.1614 \frac{g H_2}{h}}{12.78 \text{ Watt}} \times \frac{1kg * 1000W}{1000g * 1kW} = 0.012629 \frac{kg H_2}{kWh}$$

j) Eficiencia de la electrólisis.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{rendimiento real}}{\text{rendimiento teórico}} \times 100\%$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{0.012629 \frac{kg H_2}{kWh}}{0.0306 \frac{kg H_2}{kWh}} \times 100\% = 41.3\%$$

4. CAPITULO IV: EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se realizará el análisis de los resultados obtenido en el capítulo anterior, la evaluación económica del proceso general de producción de hidrógeno tomando en cuenta el balance energético realizado, los costos aproximados en el proceso y en comparativa con otros combustibles térmicos, su escalamiento industrial aproximado, así como las conclusiones y recomendaciones para proseguir con futuras investigaciones.

4.1. Análisis de resultados experimentales

4.1.1. Producción de hidrógeno a diferentes concentraciones (T amb)

Siguiendo los resultados de la tabla 3.5 A y la tabla 3.5 B se presentan a continuación la gráfica (**figura 4.1**) de tiempo de producción de 100ml de volumen de Hidrógeno a temperatura ambiente variando la concentración de NaOH a presión atmosférica de 1 atm.

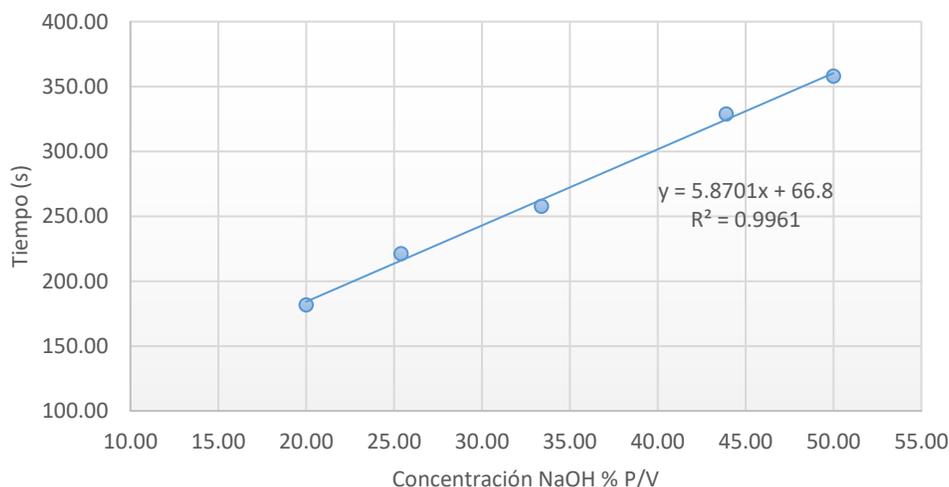


Figura 4.1 Tiempo de producción de 100ml de H₂ a diferentes concentraciones, temperatura ambiente

La temperatura ambiente, varía en un rango de 27.60 °C a 30.90 °C con un delta de 3.3° C no presentando esta variación datos fuera de la tendencia presentada la cual corresponde a una potencial con un R² de 0.9956. Se puede observar que el tiempo para producir una misma cantidad de volumen de hidrógeno (100ml), aumenta al mismo tiempo que aumenta la concentración de NaOH en la solución electrolítica concluyendo que son directamente proporcionales y que las concentraciones más bajas son las que generan a temperatura ambiente un mayor rendimiento hasta un máximo alrededor del 20% de concentración tal y como lo muestra la siguiente **figura (4.2)** en donde se representa la producción en términos de masa por hora cambiando según la concentración en el eje de las “x”. En esta grafica se incluye el comportamiento a baja concentración de la siguiente sección con el objetivo de comparar en un rango más amplio el comportamiento. Este gráfico también puede ser de lo deseado contra lo requerido observando que está en gramos sobre hora contra concentración. Tomar una

base de tiempo con la masa es necesario ya que no se sabría si la masa de hidrógeno se está produciendo en un segundo o en una hora.

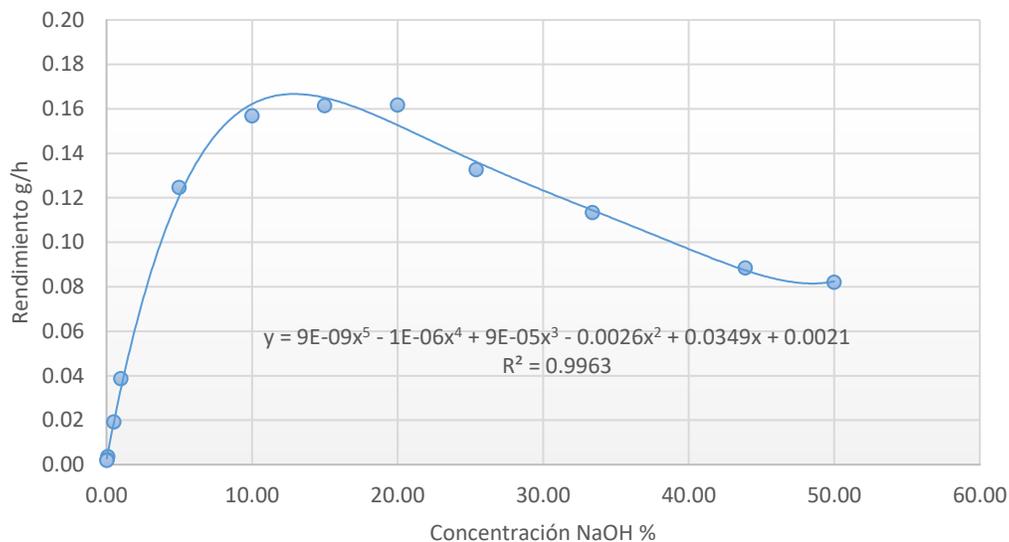


Figura 4.2 Rendimiento de producción de gramos de H₂ por hora a diferentes concentraciones, temperatura ambiente

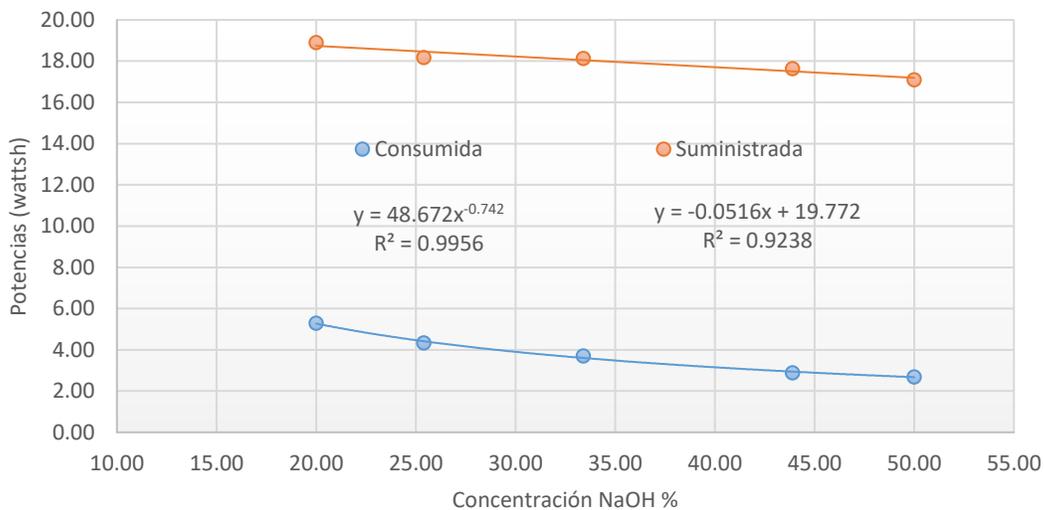


Figura 4.3 Potencia consumida y suministrada para producir 100ml H₂/h

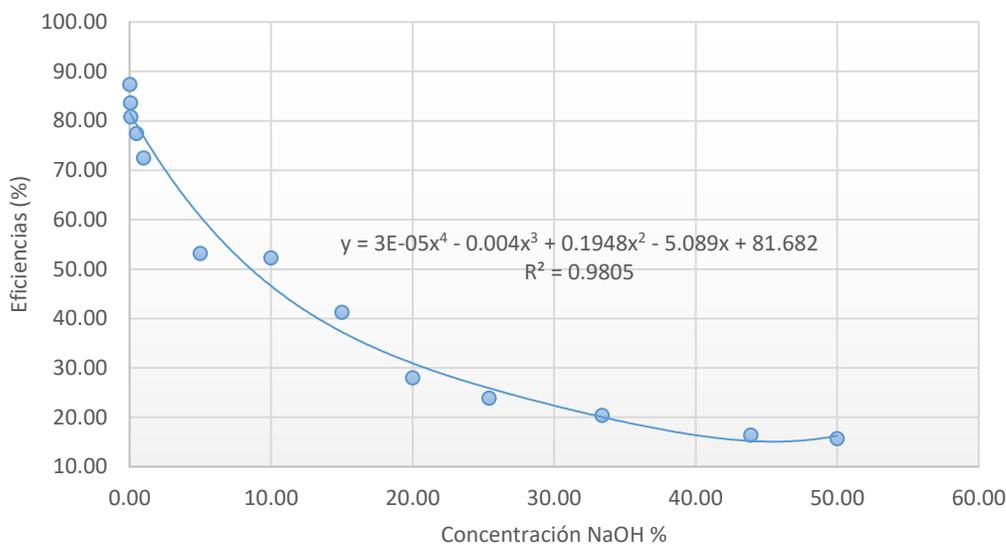


Figura 4.4 Eficiencia energética de producción de H₂ a diferentes concentraciones, temperatura ambiente

Las **figuras 4.3 y 4.4** representan el comportamiento del consumo energético para realizar el experimento; en la primera se puede observar dos líneas las cuales representan la potencia consumida y la potencia suministrada. El cálculo de la potencia consumida está basado en la electricidad teórica necesaria para producir la cantidad de hidrógeno medido según la ley de Faraday de la electrólisis y la potencia suministrada está calculada en base a la corriente medida en el experimento, notando una significativa diferencia de potencias en ambas líneas lo cual se atribuye a una pérdida por diferentes factores donde la principal podría ser la resistencia eléctrica generada por el aumento de la concentración del electrolito lo cual puede evidenciarse en la **figura 4.4** donde además se agregan los datos del experimento a bajas concentraciones para comparar con el resto del experimento. La eficiencia decae con el aumento de la concentración, indicando resistencia por parte del electrolito al aumentar la concentración y posibles deficiencias en el diseño del electrolizador. Concluyendo con base a la lectura del consumo energético se puede establecer el punto de partida en que, a temperatura ambiente a menor concentración de electrolito dentro del rango probado el consumo energético es menor y la potencia suministrada también, sin embargo, la eficiencia aumenta según disminuye la concentración lo cual significa una menor pérdida de energía en el proceso.

4.1.2. Producción de Hidrógeno a concentraciones bajas temperatura ambiente

Al obtener los datos de los rendimientos de las concentraciones y siguiendo las tendencias de las bajas concentraciones a disminuir el tiempo de producción de los 100 ml de hidrógeno se plantea la posibilidad de disminuir la concentración paulatinamente desde 20% a 0% con la finalidad de poder corroborar la información obtenida en fuentes bibliográficas y en el diseño del experimento sobre que la concentración óptima ronda el 20% P/V para electrolito de hidróxido de sodio. Los resultados presentados en **las tablas 3.14 y 3.15** se presentan en la siguiente gráfica de la **figura 4.5** donde nos muestra un aumento en el rendimiento iniciando en el origen donde es agua desmineralizada y luego paulatinamente se aumenta la concentración poco a poco haciendo que el burbujeo presentado de las **figuras 3.3 a la 3.8** incrementando con cada agregado de electrolito. En la figura 4.6 sumamos los resultados del

experimento de las concentraciones a temperatura ambiente desde 20% a 50% P/V, y podemos observar cómo hay un máximo en la curva de rendimiento que ronda entre los 15% y 20% para temperatura ambiente el cual tiene un descenso pronunciado antes del 20% y poco pronunciado después del 20%.

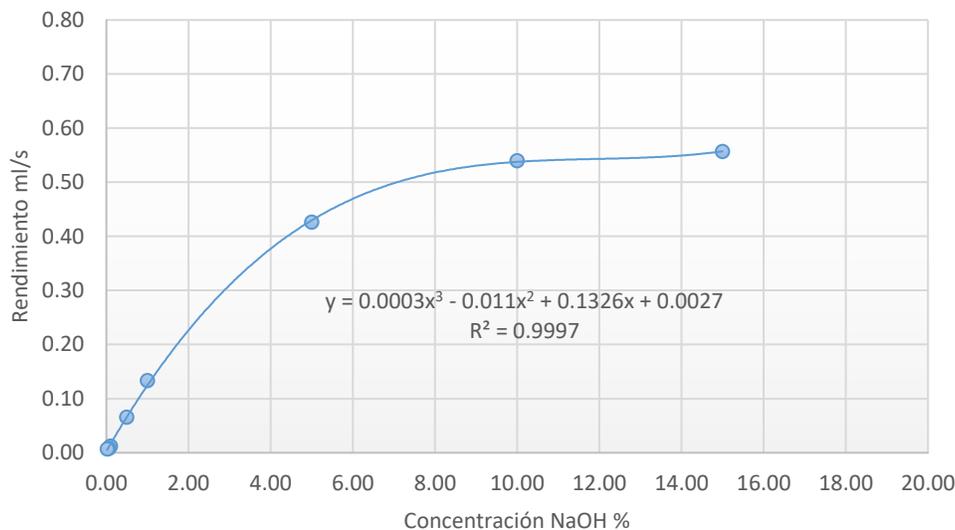


Figura 4.5 Rendimiento de producción de hidrógeno a bajas concentraciones T amb

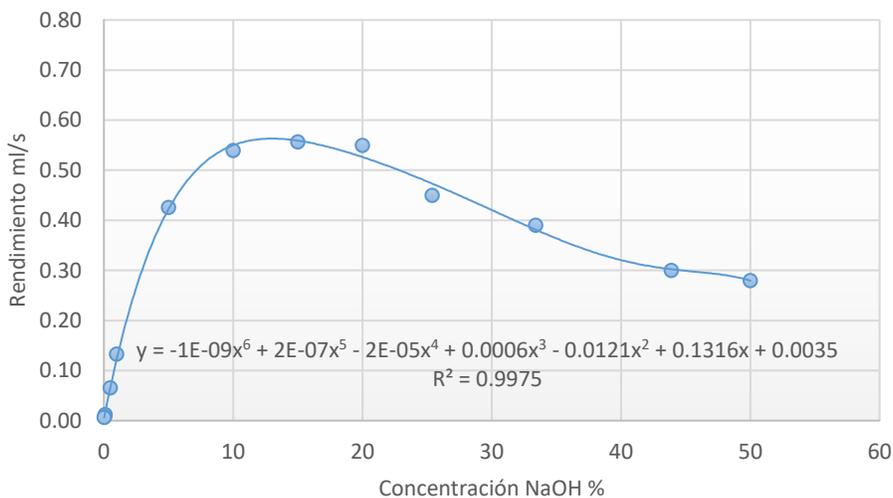


Figura 4.6 Rendimiento de producción de hidrógeno en un rango amplio de concentraciones a T amb

Según la teoría presentada en el capítulo II este comportamiento puede ser esperado por lo que son datos no fuera de rango prosiguiendo con escoger las tres concentraciones anteriormente consideradas para realizar los análisis correspondientes. En la **figura 4.7** se puede observar el como la eficiencia aumenta significativamente al disminuir la concentración esto debido a la poca resistencia eléctrica que presentaría el electrolito y la poca pérdida de calor en el electrolizador.

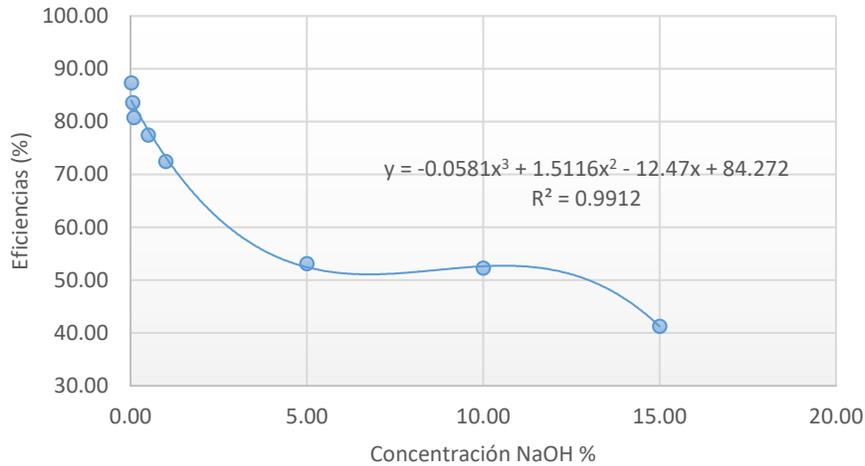


Figura 4.7 Eficiencia en la producción a bajas concentraciones a temperatura ambiente

4.1.3. Producción de hidrógeno a distintas temperaturas

En las siguientes graficas observaremos el comportamiento de producción con las tres concentraciones más bajas que se consideran las mejores del experimento a temperatura ambiente (las cuales resultaron ser las de mayor rendimiento y mayor eficiencia) para variar su temperatura y ver el efecto que ésta tiene sobre la producción de hidrógeno.

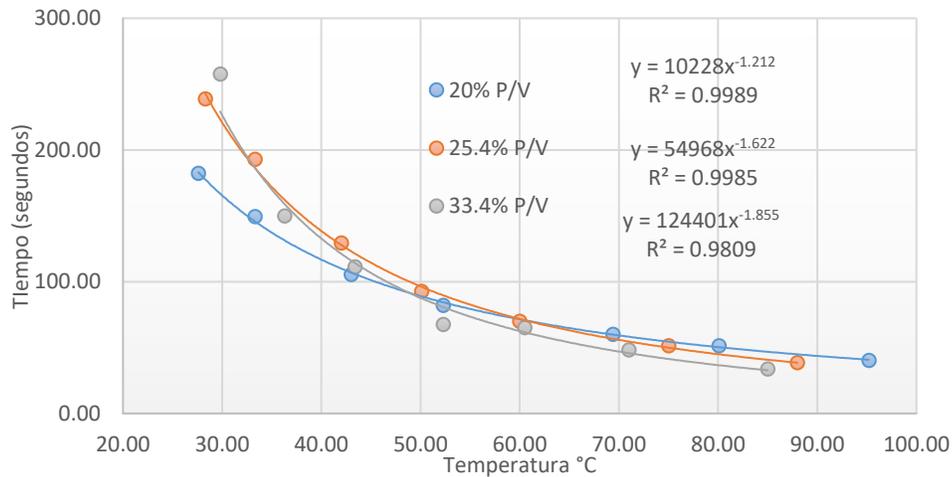


Figura 4.8 Tiempo de generación de 100ml de H₂ a diferentes temperaturas

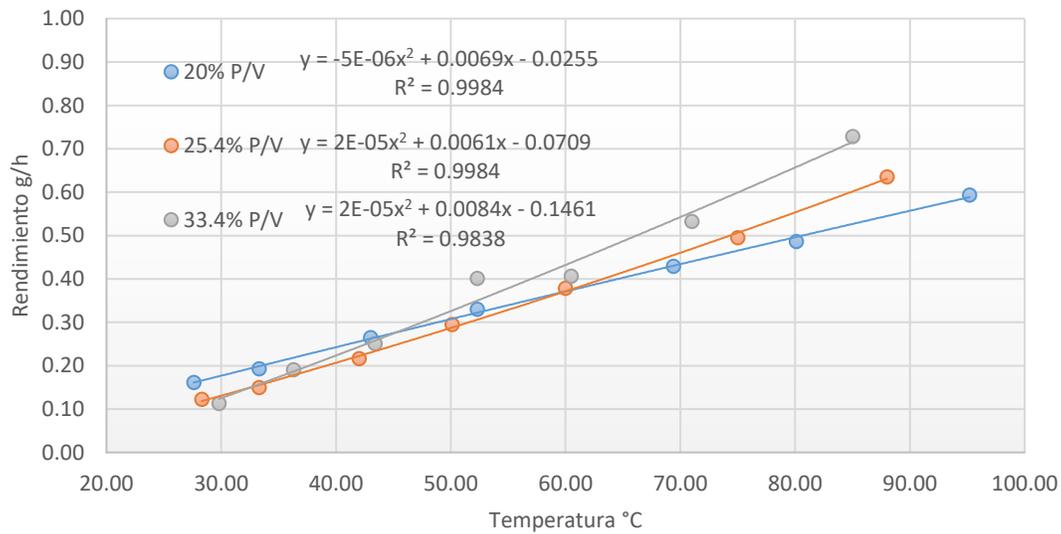


Figura 4.9 Rendimiento de producción de gramos de H₂ a diferentes temperaturas para diferentes concentraciones

En la **figura 4.8** se puede observar las tendencias de tres experimentos a tres concentraciones distintas. Los parámetros para cada una de las concentraciones son el tiempo de producción de 100ml de hidrógeno a diferentes temperaturas. El comportamiento de la producción de hidrógeno en este caso es muy peculiar debido a que cambia según las concentraciones, pero se mantiene con las temperaturas, esto quiere decir que para las tres concentraciones siempre hay un descenso significativo de hasta 5 veces menos de tiempo de producción de 100ml de hidrógeno siendo una tendencia clara; sin embargo cuando vemos detenidamente los límites de la experimentación podemos observar que a temperaturas más bajas, en este caso temperatura ambiente, la concentración más baja tiene un tiempo menor para llegar a los 100ml y la concentración mayor tiene un incremento significativo en el tiempo para llegar a esos mismos 100 ml de hidrógeno, comportamiento que cambia a temperaturas altas siendo la concentración más alta la que tiene el menor tiempo para llegar a los 100ml y la concentración más baja la que tiene el tiempo mayor para llegar a la misma cantidad de gas producido. La concentración de 25.4% se mantiene en medio de las dos tendencias siendo una concentración estándar en caso de querer balancear los beneficios y debilidades de las otras dos concentraciones. En la **figura 4.9** observamos el mismo comportamiento al representar los resultados en términos de rendimiento de gramos de hidrógeno por hora.

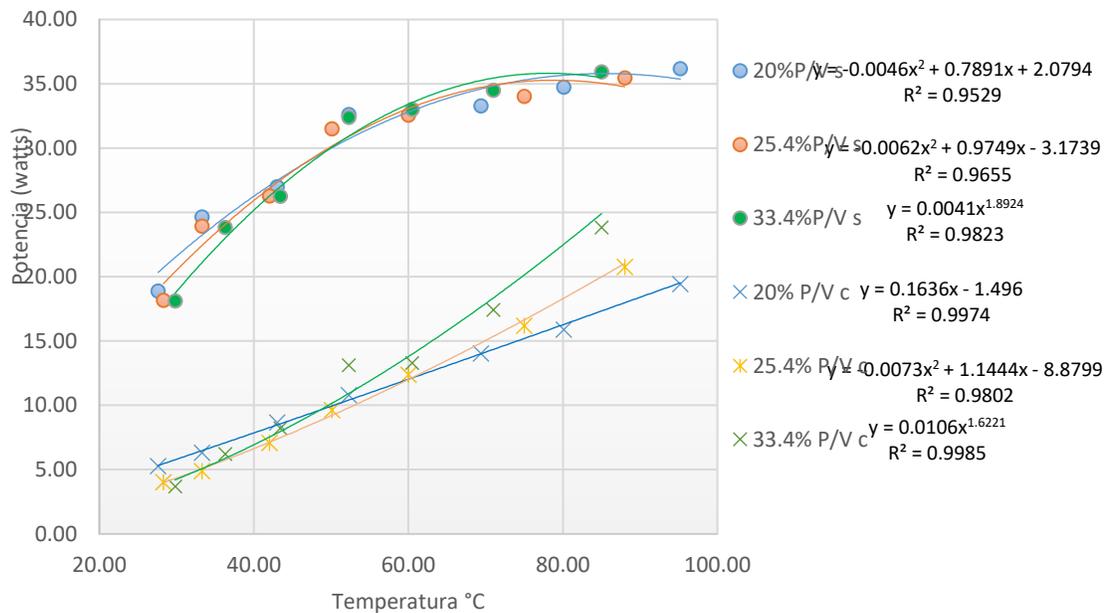


Figura 4.10 Potencia consumida y suministrada al electrolizador

En la gráfica anterior (**figura 4.10**) se puede apreciar el comportamiento del consumo eléctrico durante el experimento realizado. Al igual que en el experimento a temperatura ambiente se nota una significativa pérdida de potencia que puede llegar hasta el 80% a temperatura ambiente siendo la eficiencia más baja para la mayor concentración probada según la gráfica de la **figura 4.11** y al igual que en el caso del rendimiento la eficiencia tiene el mismo comportamiento de cambiar a altas temperaturas mostrando para la misma concentración más alta la eficiencia más alta a altas temperaturas. En este caso se puede aducir una mayor eficiencia a que el calor emanado por la alta resistencia eléctrica generada por la alta concentración contribuya a la reacción permitiendo que parte de la potencia sea aprovechada de este modo tomando en cuenta que la electrólisis es un proceso endotérmico y que un aumento en la temperatura ayuda a la producción de hidrógeno. Se puede concluir en la revisión de estos procesos a temperatura variable que **la concentración óptima a utilizar para realizar la electrólisis dependerá de la temperatura a la cual se desee trabajar**. En la siguiente parte de este capítulo se evaluará un balance energético y con ayuda de la interpretación de los gráficos anteriores se podrá realizar una análisis y evaluación económica del caso óptimo para tener el proceso más eficiente de producción de hidrógeno.

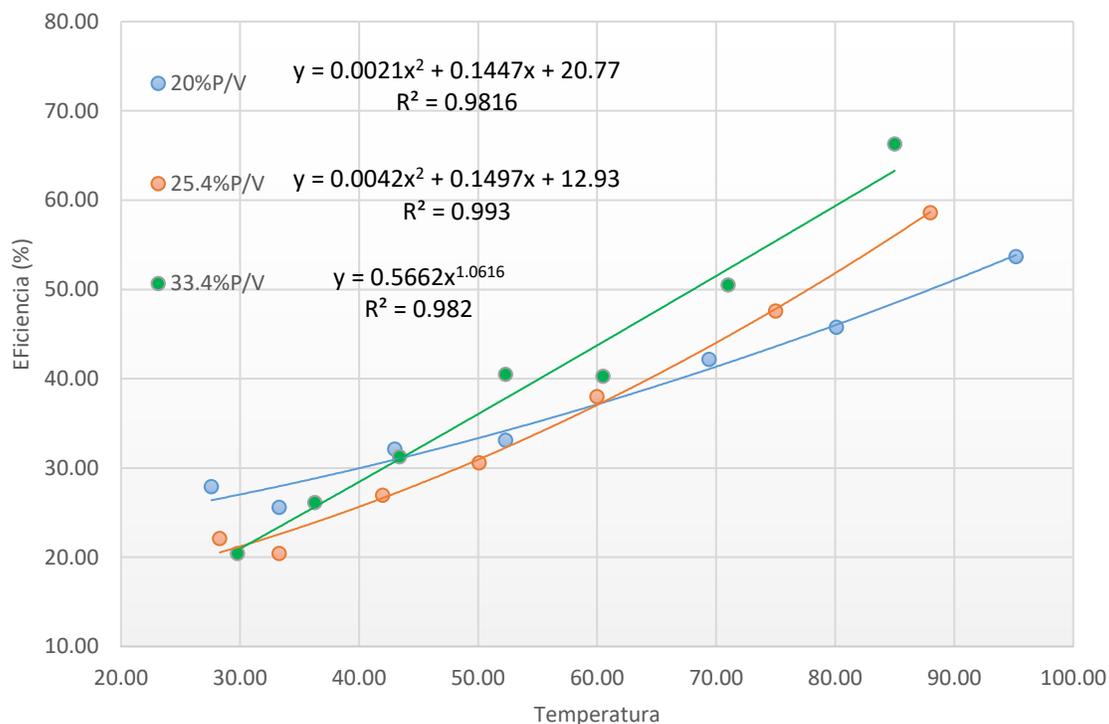


Figura 4.11 Eficiencia de la potencia suministrada y consumida

4.2. Balance de materia y energía del proceso

A continuación, se realizará un balance de materia y energía durante el proceso de electrólisis realizado el cual se podrá escalar posteriormente. Los datos utilizados corresponden a la última prueba (D7) de la tabla 3.12 y 3.13 que poseen la concentración y temperatura más altas, esto debido a que es la prueba la eficiencia mayor, sin embargo, servirá para ejemplificar el cálculo del proceso ya que en la siguiente sección se estudiarán los datos que sean económicamente más rentables estudiando otros factores aparte de la eficiencia como lo podría ser el costo del hidróxido de sodio o el costo de aumentar la temperatura entre otros. El balance energético se realiza de acuerdo a la energía aportada para elevar la temperatura y la energía aportada para realizar el proceso de electrólisis con corriente eléctrica en función del rendimiento de la reacción. Se hace de esta manera y no un balance global energético debido a los objetivos de la investigación que se centra en la producción de hidrógeno y su rendimiento por lo que se sugiere que para futuras investigaciones se tome en cuenta la entalpía inicial y final de la solución, así como las entalpías de los gases producidos, las pérdidas de calor y el calor liberado al momento de mezclar el hidróxido de sodio con el agua. Se presenta un esquema para entender el balance en la siguiente **figura 4.12**

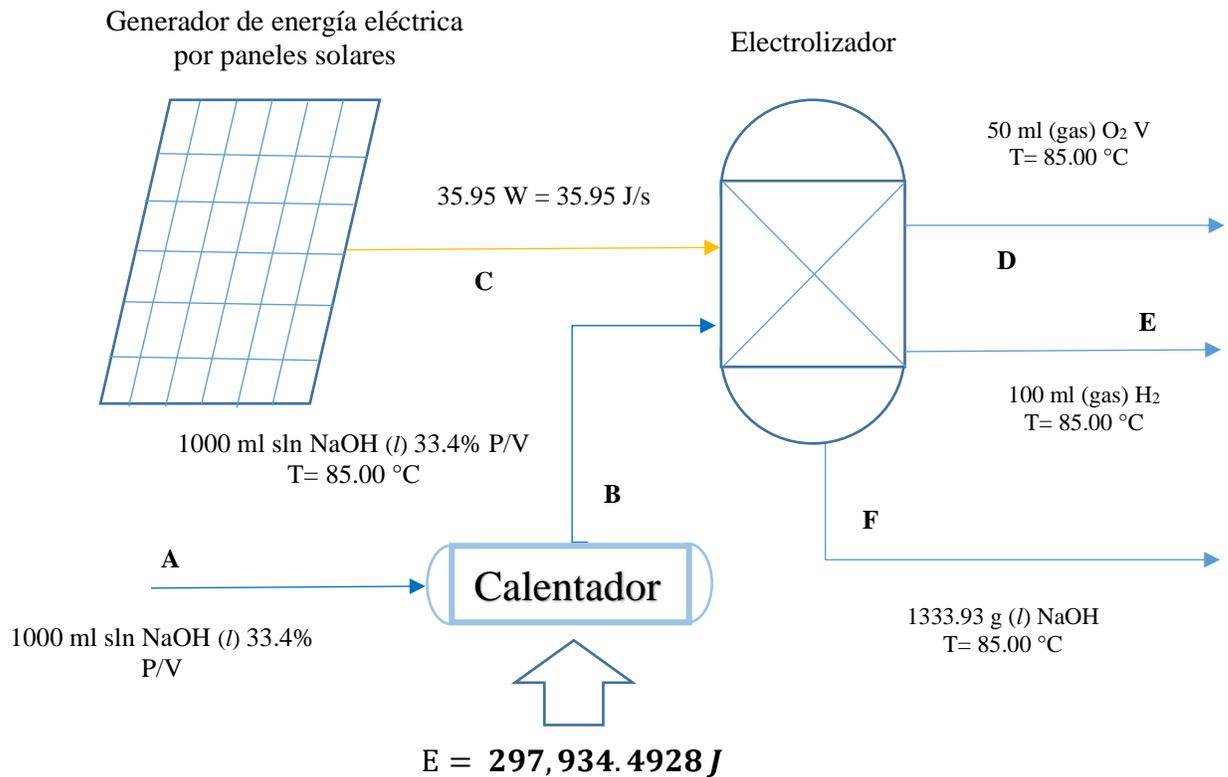


Figura 4.12 Esquema del proceso de flujo de masa y energía realizado para la electrólisis

4.2.1. Balance de masa

a) Masa A = B

Las corrientes A y B corresponden a la alimentación de la solución de hidróxido de sodio la cual pasa por un aumento de temperatura en el calentador de A hacia B pero la masa permanece constante. Su valor consta de la masa de agua destilada y la masa del electrolito necesarias para la concentración correspondiente.

$$\text{PM NaOH} = 39.99713 \text{ g/mol}$$

$$m \text{ NaOH} = 334 \text{ g}$$

$$m \text{ H}_2\text{O} = 1000 \text{ ml} \times 1 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = 1 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$m \text{ solución} = m \text{ NaOH} + m \text{ H}_2\text{O} = 1334 \text{ g sln NaOH}$$

(25.4% P/V)

$$m \text{ solución} = m \text{ NaOH} + m \text{ H}_2\text{O} = 1254 \text{ g sln NaOH}$$

(20.0% P/V)

$$m \text{ solución} = m \text{ NaOH} + m \text{ H}_2\text{O} = 1200 \text{ g sln NaOH}$$

b) Masa D (corriente de oxígeno)

La corriente D contiene la salida del oxígeno gaseoso y para encontrar su masa se puede realizar a través de los gases ideales. Este valor variará con la temperatura de cada prueba.

m = masa oxígeno (g)

$P = 1 \text{ atm.}$

$T = 358.15 \text{ K}$

$PM_{O_2} = 31.9992 \text{ g/mol}$

$V = 0.05 \text{ l}$

$R = 0.08205 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

$$P * V = n * R * T$$

$$n = \frac{m}{PM}$$

$$m = \frac{P * V * PM}{R * T}$$

$$m \text{ (g)} = \frac{1 \text{ atm} * 0.05 \text{ l} * 31.9992 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.08205 \frac{\text{atm} * \text{l}}{\text{mol} * \text{K}} * 358.15 \text{ K}} = 0.05445 \text{ g } O_2$$

c) Masa E (corriente de hidrógeno)

De la misma manera que el oxígeno, el hidrógeno tendrá un valor que variará respecto a la temperatura de las diferentes pruebas y se calculará su masa usando la fórmula de los gases ideales.

m = masa hidrógeno (g)

$P = 1 \text{ atm.}$

$T = 358.15 \text{ K}$

$PM_{H_2} = 2.01594 \text{ g/mol}$

$V = 0.1 \text{ L}$

$R = 0.08205 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

$$P * V = n * R * T$$

$$n = \frac{m}{PM}$$

$$m = \frac{P * V * PM}{R * T}$$

$$m \text{ (g)} = \frac{1 \text{ atm} * 0.1 \text{ l} * 2.01594 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.08205 \frac{\text{atm} * \text{l}}{\text{mol} * \text{K}} * 358.15 \text{ K}} = 0.00686 \text{ g } H_2$$

d) Masa F (solución no utilizada)

La corriente F contiene la cantidad de solución de hidróxido de sodio no utilizado y el valor variará según haya sido la alimentación dependiendo de la concentración la diferencia entre B y F dará como resultado el uso de solución de NaOH que genere el rendimiento deseado.

$$m F = m A - m D - m E$$

$$m F = 1334 \text{ g} - 0.05445 \text{ g} - 0.00686 \text{ g} = 1333.94 \text{ g (33.4\%)}$$

$m F = 1254 \text{ g} - 0.053994 \text{ g} - 0.006803 \text{ g} = 1253.94 \text{ g} \text{ (25.4\% 88°C)}$ $m F = 1200 \text{ g} - 0.052967 \text{ g} - 0.006674 \text{ g} = 1199.94 \text{ g} \text{ (20.0\% 95°C)}$

Para saber la cantidad de solución ocupada que corresponde únicamente al agua se hace la resta de la corriente B menos la corriente F. Se le llama solución de NaOH debido a que todo está en una disolución, pero cabe aclarar que el NaOH permanecerá en la corriente F.

$$\text{consumo} = mB - m F$$

Masa de solución de NaOH para lograr rendimiento: **0.06 g solución NaOH (33.4%)**

(25.4% P/V 88°C)	Consumo = 0.06 g solución NaOH
(20.0% P/V 95°C)	Consumo = 0.06 g solución NaOH

4.2.2. Balance de energía

Se tomarán en cuenta para el balance energético las consideraciones planteadas al inicio de esta sección tomando en cuenta como principales parámetros los rendimientos energéticos en el consumo de energía eléctrica para poder realizar las respectivas pruebas.

Eficiencia = **66.29 %**

Rendimiento teórico = 0.0306 g/watth H₂ = **0.0306 g/j**

Rendimiento práctico = 0.0203 g/watth H₂ = **0.0203 g/j**

a) Energía consumida en electrólisis

Correspondiente a la energía que la reacción de electrólisis utiliza.

$$E = \frac{0.006806 \text{ gH}_2}{0.0306 \frac{\text{g}}{\text{j}}} = 0.2224 \text{ j}$$

b) Energía suministrada en electrólisis

Correspondiente a la energía que se le proporcionó al electrolizador

$$E = \frac{0.006806 \text{ gH}_2}{0.0203 \frac{\text{g}}{\text{j}}} = 0.3352 \text{ j}$$

c) Energía suministrada para aumentar la temperatura de la solución

Correspondiente a la cantidad de energía que se le proporciona a la solución para aumentar la temperatura y que depende de la propiedad calorífica (cP) de la solución y de la masa que se esté trabajando. En este caso el valor variará según los aumentos de temperatura tomando como referencia la temperatura ambiente medida, así como la masa utilizada según concentración.

$$C_p (\text{sln}) \text{NaOH}^1 = 4.046 \frac{J}{g \times ^\circ C}$$

$$T_i = 29.80 \text{ } ^\circ C$$

$$T_f = 85.00 \text{ } ^\circ C$$

$$m = 1334 \text{ g sln NaOH}$$

$$E = C_p \text{NaOH} \times m \text{Sln} \times \Delta^\circ C = 4.046 \frac{J}{g \times ^\circ C} \times 1334 \text{ g} \times (85 \text{ } ^\circ C - 29.80 \text{ } ^\circ C)$$

$$E = 297,934.4928 \text{ J}$$

*El dato energético anterior se calcula en base a la cantidad completa de solución de NaOH elaborado para el experimento (1334 g); para saber el consumo energético ocupado por aumento de temperatura de acuerdo a lo que se produjo de hidrógeno se calcula como se muestra a continuación:

$$C_p \text{NaOH} = 4.046 \frac{J}{g \times ^\circ C}$$

$$T_i = 29.80 \text{ } ^\circ C$$

$$T_f = 85.00 \text{ } ^\circ C$$

$$m = 0.06 \text{ g sln NaOH ocupado para lograr rendimiento}$$

Cabe señalar que la masa anterior es la combinación de agua más electrolito y el NaOH no reacciona en la electrólisis y este permanecerá en una corriente F. La cantidad de masa de NaOH es la necesaria para que la conductividad sea la adecuada para lograr que la corriente eléctrica genere el rendimiento de 100 ml de H₂ en el tiempo deseado. La masa como solución se incluye en el balance energético a continuación a razón de que siempre está involucrada una cantidad de energía pequeña asociada a la presencia del NaOH.

$$E = C_p \text{NaOH} \times m \text{Sln} \times \Delta^\circ C = 4.046 \frac{J}{g \times ^\circ C} \times 0.06 \text{ g} \times (85 \text{ } ^\circ C - 29.80 \text{ } ^\circ C)$$

$$E = 13.4004 \text{ J}$$

Es importante tomar en cuenta que cuando hablamos de energía suministrada nos estamos refiriendo a lo que se aportó durante el experimento, pero de esta energía aportada solo se utilizó una pequeña parte que sirvió para disociar el H₂O en los dos gases resultantes y a esa es la que nos referimos como energía consumida. El resultado de la energía suministrada total será la suma de la potencia eléctrica suministrada por el panel solar más la energía calorífica aportada externamente la cual preferentemente para seguir con la línea ambiental de la investigación se propone que sea solar.

4.3. Determinación de costos de producción del hidrógeno

Para determinar el costo de producción del hidrógeno es importante tomar en cuenta que se realizará únicamente evaluando los costos directos del proceso, siempre obedeciendo a los alcances y limitaciones planteados.

¹ Dato CP extraído de hoja técnica de solución de hidróxido de sodio.

4.3.1. Potencia eléctrica

El costo de la energía eléctrica en términos de kWh aportados se calcula en base al costo del panel solar y la vida útil que esté proyectada a dar. Para este caso se utilizará el costo de un panel solar de 400 W monocristalino ya que son de los que poseen de las potencias más altas y al ser monocristalinos ocupan mucho menos espacio en comparación con los policristalinos. El precio de referencia se toma de producto de empresa del rubro. Ver ANEXOS para especificaciones técnicas.²

$$365 \text{ días} \times 13 \text{ años (garantía panel)} = 4,745 \text{ días de producción}$$

$$4745 \text{ días} \times 8 \text{ horas utiles de luz} = 37,960 \text{ horas de producción}$$

$$\text{Costo panel solar: } \$348.20$$

$$\text{Costo por hora 1 panel solar} = \frac{\$348.20}{37,960 \text{ h}} = 0.009172 \frac{\$}{\text{h}}$$

$$\text{Costo 1 kWh} = \frac{1 \text{ panel}}{400 \text{ W}} \times \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}} \times 0.009172 \frac{\$}{\text{h}}$$

$$\text{Costo 1 kWh} = 0.02293 \frac{\$}{\text{kWh}}$$

Para calcular el total de costo de energía eléctrica por kilogramo de hidrógeno producido se multiplicará el valor del costo de kilowatt por la cantidad de kilowatt necesario para producirlo. De acuerdo a los rendimientos obtenidos en la tabla 3.13 al rendimiento práctico podemos sacarle el inverso para saber cuanto kWh se gastan para producir un kilogramo de hidrógeno.

$$\frac{\text{Kwh}}{\text{KgH}_2} = \frac{1}{0.002026 \frac{\text{KgH}_2}{\text{Kwh}}} = 49.34 \frac{\text{Kwh}}{\text{KgH}_2}$$

$$\text{Costo} = 49.34 \frac{\text{kWh}}{\text{KgH}_2} \times 0.02293 \frac{\$}{\text{kWh}} = 1.13 \frac{\$}{\text{KgH}_2}$$

Se muestra también el costo que se tendría si se utilizara la red eléctrica para proveer electricidad a la producción. En la figura 4.13 se muestra las zonas en que las distribuidoras proveen de energía eléctrica; con la alta probabilidad que se realice un proyecto en la zona metropolitana de San Salvador se tomará como referencia a CAESS como el proveedor por lo que se tomaran los precios correspondientes de la **tabla 4.1**

$$\text{Costo} = 49.34 \frac{\text{kWh}}{\text{KgH}_2} \times 0.112831 \frac{\$}{\text{kWh}} + \frac{6.89 + 12.30 \$ (\text{cargos fijos})}{30 \text{ días} * 8 \text{ horas utiles}} = 5.65 \frac{\$}{\text{KgH}_2}$$

²Ver Hoja técnica en anexo. <https://www.soluciones-led.com/product/panel-solar-mono-400w-72-celdas/>

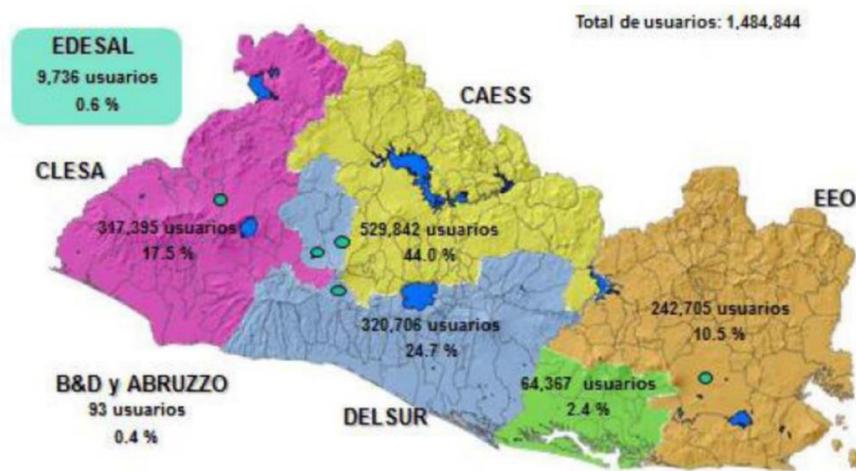


Figura 4.13 Área de influencia de empresas distribuidoras
FUENTE: Boletín de estadísticas eléctricas N12 (SIGET, 2010)

Tabla 4.1 Pliego tarifario para altas demandas a partir de julio 2020
FUENTE: Tarifas de electricidad (SIGET, 2020)

BAJA TENSION CON MEDIDOR HORARIO									
		CAESS	DEL SUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	ABRUZZO
Cargo de Comercialización:									
Atención al Cliente	US\$/Usuario-m	12.301090	14.378400	11.272361	13.107377	11.931460	18.784054	16.463460	6.808152
Cargo de Energía:									
Energía en Punta	US\$/kWh	0.120667	0.114849	0.122746	0.122395	0.124630	0.113159	0.161244	0.084952
Energía en Resto	US\$/kWh	0.097506	0.095753	0.096238	0.095323	0.091974	0.098702	0.140851	0.067331
Energía en Valle	US\$/kWh	0.121795	0.113934	0.123265	0.123286	0.125839	0.110372	0.162128	0.082649
Cargo de Distribución:									
Potencia:	US\$/kW-mes	14.115286	21.650103	22.478056	27.053425	28.524170	30.306585	16.977625	19.925676
MEDIA TENSION CON MEDIDOR HORARIO									
		CAESS	DEL SUR	CLESA	EEO	DEUSEM	EDESAL	B&D	ABRUZZO
Cargo de Comercialización:									
Cargo Fijo	US\$/Usuario-m	12.301090	14.378400	11.272361	13.107377	11.931460	18.784054	16.463460	6.808152
Cargo de Energía:									
Energía en Punta	US\$/kWh	0.111786	0.105133	0.111946	0.109140	0.110466	0.105734	0.153263	0.075078
Energía en Resto	US\$/kWh	0.090330	0.087653	0.087770	0.084999	0.081521	0.092226	0.133880	0.059505
Energía en Valle	US\$/kWh	0.112831	0.104295	0.112418	0.109934	0.111537	0.103130	0.154104	0.073043
Cargo de Distribución:									
Potencia:	US\$/kW-mes	6.897177	6.807398	12.742309	17.364691	18.583652	9.432471	10.398888	5.133835

4.3.2. Solución de hidróxido de sodio

Atendiendo los resultados del balance de masa en la sección 4.2 se determina que la masa de solución de Hidróxido de Sodio que se agrega para lograr la conductividad deseada es de **0.06g** y la masa de hidrógeno producido es de **0.00686g**, pudiéndose encontrar el rendimiento de solución de NaOH por kilogramo de hidrógeno.

$$\text{Rendimiento de sln de NaOH} = \frac{0.06 \text{ g sln NaOH}}{0.00686 \text{ g H}_2} = 8.74 \frac{\text{kg slnNaOH}}{\text{kg H}_2}$$

$$\text{rendimiento de agua} = 8.74 \frac{\text{kg slnNaOH}}{\text{kg H}_2} \times \frac{1 \text{ kg H}_2\text{O}}{0.334 \text{ Kg NaOH}} \times \frac{0.334 \text{ kg NaOH}}{1.334 \text{ kg sln NaOH}}$$

$$\text{rendimiento de agua} = 6.55 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg H}_2}$$

$\left(25.4\% \frac{P}{V} \ 88^\circ\text{C}\right) \text{Rendimiento de agua} = 7.16 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg H}_2}$ $\left(20.0\% \frac{P}{V} \ 95^\circ\text{C}\right) \text{Rendimiento de agua} = 7.49 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg H}_2}$

$$\text{rendimiento de NaOH} = 8.74 \frac{\text{kg slnNaOH}}{\text{kg H}_2} \times \frac{0.334 \text{ kg NaOH}}{1 \text{ Kg H}_2\text{O}} \times \frac{1 \text{ kg H}_2\text{O}}{1.334 \text{ kg sln NaOH}}$$

$$\text{rendimiento de NaOH} = 2.1882 \frac{\text{kg NaOH}}{\text{kg H}_2}$$

$\left(25.4\% \frac{P}{V} \ 88^\circ\text{C}\right) \text{Rendimiento de NaOH} = 1.7844 \frac{\text{kg NaOH}}{\text{kg H}_2}$ $\left(20.0\% \frac{P}{V} \ 88^\circ\text{C}\right) \text{Rendimiento de NaOH} = 1.4831 \frac{\text{kg NaOH}}{\text{kg H}_2}$

$$\text{costo de agua destilada} = \frac{\$1.40}{3785.41 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ ml H}_2\text{O}}{1 \text{ g H}_2\text{O}} \times \frac{1000 \text{ g H}_2\text{O}}{1 \text{ kg H}_2\text{O}}$$

$$\text{costo de agua destilada} = \frac{\$0.3698}{\text{kg H}_2\text{O}}$$

El hidróxido de sodio como se mencionaba antes no se consume sin embargo medidas de mantenimiento pueden generar el cambio periódico de la solución utilizada. Como base de cálculo se tomará 1 mes de 30 días con 8 horas de trabajo útil por la energía solar, luego se utilizará una hora de producción para la demanda de un kilogramo de hidrógeno, tal y como se muestra a continuación.

$$\text{costo de NaOH} = \frac{\$9.00}{\text{kg NaOH}} \times \frac{1 \text{ kg/h}}{30 \text{ días} * 8 \text{ horas utiles}} = \frac{\$0.0375}{\text{kg NaOH}}$$

$$\text{costo de solución de NaOH} = \frac{\$0.0375}{\text{kg NaOH}} \times 2.18 \frac{\text{kg NaOH}}{\text{kg H}_2} + \frac{\$0.3698}{\text{kg H}_2\text{O}} \times 6.55 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg H}_2}$$

$$\text{costo de solución de NaOH} = \frac{\$2.50}{\text{kg H}_2}$$

$$\begin{aligned} (25.4\% P/V) \text{ Costo de solución de NaOH} &= \frac{\$2.72}{\text{kg H}_2} \\ (20.0\% P/V) \text{ Costo de solución de NaOH} &= \frac{\$2.85}{\text{kg H}_2} \end{aligned}$$

El costo de la solución variará de acuerdo a la concentración que se trabaje. El costo del NaOH al ser reciclable se diluye en 30 días asociados a un mantenimiento del tanque.

4.3.3. Aumento de temperatura

Se obtiene la cantidad de energía a partir de la capacidad calorífica de la solución de hidróxido de sodio, el delta de temperatura asociado al proceso y la cantidad de solución a tratar por kilogramo de hidrógeno producido. Como se menciona en el apartado anterior se tomará como base una hora de trabajo para producir un kilogramo de hidrógeno

$$E = 4.046 \frac{\text{J}}{\text{g} \times ^\circ\text{C}} \times 8540.0 \frac{\text{g slnNaOH}}{\text{kg H}_2} \times (85^\circ\text{C} - 29.80^\circ\text{C})$$

$$E = 190.7320 \frac{\text{KJ}}{\text{kg H}_2}$$

$$\text{Energía por kilogramo de H}_2 = 190.7320 \frac{\text{KJ}}{\text{kg H}_2} * 3600\text{s} = 686 \frac{\text{kWh}}{\text{kg H}_2}$$

Según la **figura 1.17** observamos que el mapa de irradiancia solar global en el área metropolitana de San Salvador podemos encontrar una incidencia solar **anualmente de 2118 kWh/m²** y **diariamente de 6 kWh/m²**. Tomando en cuenta el dato de energía por unidad de área proporcionado por el mapa se calcula el área para cubrir demanda para calentar la cantidad de NaOH necesario para producir 1 kg de H₂.

$$\text{Area para cubrir demanda} = \frac{686 \text{ kWh}}{6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} = 114.33 \text{ m}^2$$

Tomando como base un sistema de calentador solar prediseñado³ con un área de 2.84 m² se encontrará la cantidad necesarias de unidades del sistema para suplir el área que cubrirá la demanda de producción de 1 Kg de H₂. El costo de la unidad de sistema es de \$610 y la garantía es de 10 años para el sistema de tubos evacuados.

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de unidades necesarias} &= 114.33 \text{ m}^2 \times \frac{1 \text{ unidad}}{2.84 \text{ m}^2} \\ &= 40.25 \sim 41 \text{ unidades} \end{aligned}$$

$$\text{Costo total de unidades} = 41 \text{ unidades} \times \frac{\$610}{1 \text{ unidad}} = \$25010.0$$

³ Ver hoja técnica en anexo. Fuente: https://es.made-in-china.com/co_focussolar/product_Integrated-Heat-Pipe-Pressure-Solar-Water-Heater-300L_rhneunysg.html

$$\text{Costo por kg } H_2 = \frac{\$25010.0}{10 \text{ años}} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{8 \text{ hr utiles}}$$

$$\text{Costo } \Delta T \text{ por kg } H_2 = \frac{\$0.85}{\text{kg } H_2}$$

4.3.4. Comparación de costos según parámetros de producción

A continuación, se presentan las **tablas (4.2, 4.3, 4.4)** respectivas a los costos de producción para los diferentes parámetros de temperatura y concentración. Se puede apreciar el costo calculado para cada parámetro según concentración y temperatura con las consideraciones hechas para cada una de ellas en la sección anterior. El costo total de proceso es en base a la producción de 1 Kg de H₂ y está calculado para la utilización de la energía eléctrica provista por la red eléctrica disponible y por la energía eléctrica por paneles solares mostrando una importante y significativa diferencia entre ambos dando como resultado un proceso viable desde la perspectiva técnica al utilizar energía solar.

$$CT = \text{Costo energía eléctrica (Red o solar)} \\ + \text{costo electrolito a usar (NaOH)} \\ + \text{costo aumento de temperatura}$$

Siguiendo con la base de cálculo para 33.4% 85°C:

$$CT (\text{energía solar}) = 1.13 + 2.50 + 0.84 = 4.47$$

$$CT (\text{RED}) = 5.65 + 2.50 + 0.84 = 8.99$$

Tabla 4.2 Costos por la producción de hidrógeno 33.4% P/V

Temperatura (°C)	Rendimiento práctico (kWh/kg H ₂)	Costo de KW-h solar por kg H ₂ (\$)	Costo de KW-h red por kg de H ₂ (\$)	costo de sln NaOH por kg de H ₂ (\$)	Costo ΔT por kg de H ₂ (\$)	Costo total de kg H ₂ (RED) (\$)	Costo total de kg H ₂ (Solar) (\$)
29.80	160.01	3.67	18.13	2.50	0.00	20.63	6.17
36.30	125.16	2.87	14.20	2.50	0.10	16.80	5.47
43.40	104.54	2.40	11.87	2.50	0.21	14.58	5.10
52.30	80.73	1.85	9.19	2.50	0.34	12.03	4.69
60.50	81.20	1.86	9.24	2.50	0.47	12.21	4.83
71.00	64.76	1.48	7.39	2.50	0.63	10.51	4.61
85.00	49.34	1.13	5.65	2.50	0.84	8.99	4.47

Tabla 4.3 Costos por la producción de hidrógeno 25.4% P/V

Temperatura (°C)	Rendimiento práctico (kWh/kg H ₂)	Costo de KW-h solar por kg H ₂ (\$)	Costo de KW-h red por kg de H ₂ (\$)	costo de sln NaOH por kg de H ₂ (\$)	Costo ΔT por kg de H ₂ (\$)	Costo total de kg H ₂ (RED) (\$)	Costo total de kg H ₂ (Solar) (\$)
28.30	147.94	3.39	16.77	2.72	0.00	19.49	6.11
33.30	160.08	3.67	18.14	2.72	0.08	20.94	5.55
42.00	121.31	2.78	13.77	2.72	0.21	16.70	5.71
50.10	106.87	2.45	12.14	2.72	0.33	15.19	5.50
60.00	86.06	1.97	9.79	2.72	0.48	12.99	5.18
75.00	68.72	1.58	7.83	2.72	0.71	11.27	5.01
88.00	55.81	1.28	6.38	2.72	0.91	10.01	4.91

Tabla 4.4 Costos por la producción de hidrógeno 20.0% P/V

Temperatura (°C)	Rendimiento práctico (kWh/kg H ₂)	Costo de KW-h solar por kg H ₂ (\$)	Costo de KW-h red por kg de H ₂ (\$)	costo de sln NaOH por kg de H ₂ (\$)	Costo ΔT por kg de H ₂ (\$)	Costo total de kg H ₂ (RED) (\$)	Costo total de kg H ₂ (Solar) (\$)
27.60	117.13	2.69	13.30	2.85	0.00	16.15	5.54
33.30	127.75	2.93	14.49	2.85	0.09	17.43	5.87
43.00	101.81	2.33	11.57	2.85	0.23	14.65	5.42
52.30	98.73	2.26	11.22	2.85	0.38	14.45	5.49
69.40	77.57	1.78	8.83	2.85	0.64	12.32	5.27
80.10	71.42	1.64	8.14	2.85	0.80	11.79	5.29
95.20	60.92	1.40	6.95	2.85	1.03	10.83	5.28

Realizando las valoraciones pertinentes a los datos mostrados en estas tablas se puede concluir que:

- a) El precio de producción más bajo corresponde a la concentración más alta (33.4% P/V) a temperatura más alta con energía eléctrica obtenida de fuentes solares. **(\$4.47)**
- b) El precio de producción más alto con energía solar corresponde a la temperatura ambiente de la concentración más alta (33.4% P/V). **(\$6.17)**
- c) El precio de producción más alto corresponde a la concentración más alta (33.4% P/V) a temperatura ambiente con energía eléctrica obtenida de la red de distribución. **(\$20.63)**
- d) El precio de producción más bajo con energía de la red de distribución corresponde a la concentración más alta (33.4% P/V) y temperatura más alta. **(\$8.99)**

Tal y como se mencionaba en las gráficas de análisis de rendimiento en la sección 4.1, el hecho de que existieran rendimientos y eficiencias más altas no era un indicativo de la viabilidad por si solo ya que hacía falta el componente económico, sin embargo, podría ser un indicativo del panorama completo al seleccionar diferentes opciones de operación del proceso. También no hay que olvidar que haría falta un análisis del gas producido ya que, al

aumentar la temperatura, aumenta la evaporación del agua, aunque, experimentalmente se observa que cuando el electrolizador está apagado no hay una visible diferencia en el volumen de gas para efectos de purificación habría que realizar el estudio. Con resultados obtenidos con los cuadros de costos anteriores se puede respaldar los resultados de rendimiento y al igual que el análisis de rendimiento, la concentración más alta con la temperatura más alta resultó ser lo más beneficiosos en cuanto a producción y costos. Es importante señalar que a temperatura ambiente a la concentración más alta es el precio más elevado por lo que si la producción disminuye la temperatura de trabajo el proceso puede bajar su rendimiento y aumentar su costo por lo que se puede recomendar realizar un estudio de ingeniería del proceso que incluya el cambio de temperaturas la combinación de producción con red eléctrica o un cambio de concentración de trabajo, entre otros. Además de los costos de proceso habría que ajustar la presurización a bajo costo, el almacenamiento de calor y las disposiciones de la instalación para reducir los costos directos. Los costos más altos son manejados por el consumo de corriente eléctrica luego por el consumo de solución y por último el aumento de temperatura, por lo que se puede inferir que manejando los aspectos técnicos de diseño podría reducirse en gran manera el costo y aumentar mucho la eficiencia que para el caso de las concentraciones bajas llegan hasta un 40% y para concentraciones altas hasta un 50%. En la gráfica siguiente (**figura 4.11**) se muestra los costos asociados a la producción de 1kg de hidrógeno donde se evidencia que para la concentración más alta a baja temperatura es la más cara, pero a altas temperaturas es la más barata.

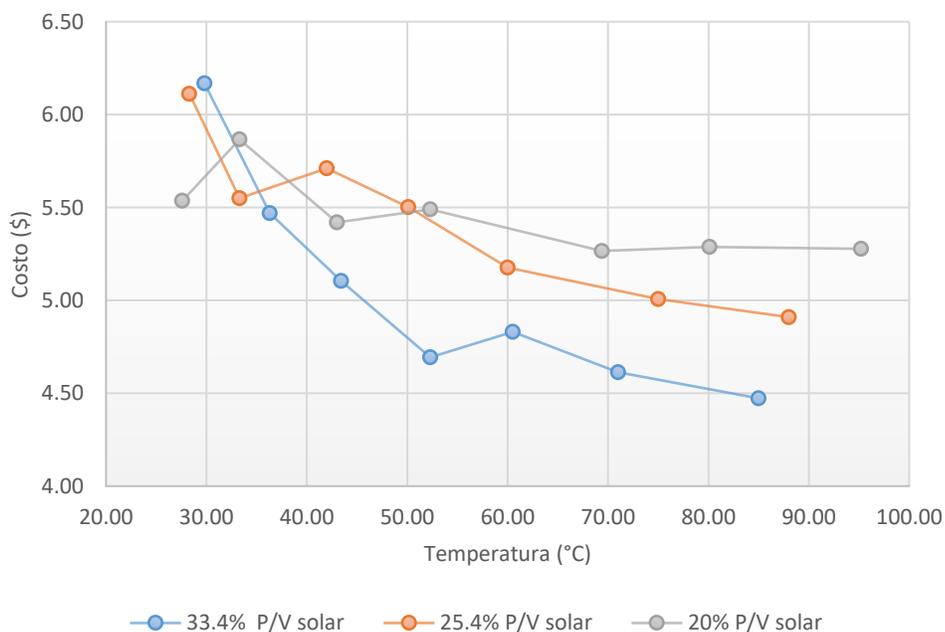


Figura 4.14 Gráfico de costos de proceso de producción

4.4. Evaluación económica

Antes de poder realizar cualquier comparativa es importante conocer cuanto nos puede brindar el hidrógeno en términos de energía para poder realizar una conversión posterior en términos monetarios. A continuación se muestra la tabla 4.5 en donde se muestra la cantidad de energía contenida por masa de H₂. (Ruiz X. R., 2014).

Tabla 4.5 Equivalencia Hidrógeno – Energía

Fuente: (Asociación española del hidrógeno, 2019)

Equivalencia Hidrógeno – Energía				
Masa H ₂ [kg]	H ₂ gas [Nm ³]	H ₂ líquido [litros]	Energía [MJ]	Energía [kW·h]
1	11,12	14,12	120	33,33
0,0899	1	1,27	10,8	3
0,0708	0,788	1	8,495	2,359
0,00833	0,0926	0,1177	1	0,278
0,03	0,333	0,424	3,6	1

Teniendo en cuenta cuanto nos puede brindar una unidad de masa de hidrógeno podemos comparar la misma cantidad con otras sustancias combustibles térmicas encontrando algunas equivalencias en la siguiente tabla 4.6 (Ruiz X. R., 2014).

Tabla 4.6 Comparación de capacidad energética del hidrógeno frente a otras alternativas combustibles

Fuente: (Asociación española del hidrógeno, 2019)

Combustible Equivalencia	H ₂	Gasolina (líquido)	Gasóleo (líquido)	Metano (gas)	Gas Natural (gas)	Propano (gas)	Butano (gas)	Metanol (líquido)
En peso[kg]	1	2,78	2,80	2,40	Entre 2,54 y 3,14	2,59	2,62	6,09
En volumen [l] respecto H ₂ LÍQUIDO	1	0,268	0,236	-	-	-	-	0,431
En volumen [l] respecto H ₂ GAS (350 bar)	1	00,0965	0,0850	0,240 (a 350 bar)	Entre 0,3 y 0,35 (a 350 bar)	0,117 (a 350 bar)	0,127 (a 350 bar)	0,191

La tabla 4.6 nos muestra a parte de las comparaciones de la masa de 1 kg de H₂, las comparaciones de equivalencias con volumen entre cada una de ellas y por lo cual podemos apreciar que en términos de volumen a presión de 350 bares el hidrógeno es significativamente inferior a todo los combustibles comparados en la tabla y aún en estado líquido sigue siendo bajo el valor de la capacidad energética representada; no así las comparaciones a base de masa las

cuales en todas representa más del doble de la capacidad energética, razón por la cual la mayor parte de los cálculos de rendimiento y costos se ha realizado con anterioridad de esta forma. Hay que recordar que en caso se maneje compresiones grandes del gas o enfriamientos para llevarlo a estado líquido se requerirá de tecnología que ocupara un gasto energético bastante grande y por lo cual en un estudio de diseño de plantas tiene que ser tomado en cuenta a la hora de comparar conversiones netas de energía en el proceso.

4.4.1. Evaluación económica: Comparaciones generales.

A continuación, se presentarán los precios cotizados de cada uno de los combustibles. Los precios han sido extraídos de páginas de actualización frecuente de datos de materias primas y combustibles. Han sido extraídas de diferentes lugares, puesto que no tienen todas las variedades de combustibles que nos presenta la tabla anterior en una misma data, además de eso las unidades de medida son diferentes debido a su manera de extracción, procesamiento, consumo y distribución. Luego de presentar los precios se convierten los datos a precios por kilogramo o precios por potencia energética ya que se conocen sus equivalencias para el hidrógeno según costos por kilogramo de hidrógeno (**\$4.47/Kg H₂**) en la sección de costos y el valor en potencia energética del hidrógeno, según la tabla 4.5 (**33kWh/kg H₂**).

Tabla 4.7 Precios internacionales cotizados de diferentes combustibles

Combustible	Precio cotizado	Fuente
Gas natural	$\frac{\$ 2.29}{293.07 \text{ kWh}}$	https://www.indexmundi.com
Gasolina	$\frac{\$ 1.25}{\text{Gallon}}$	https://www.indexmundi.com
Propano	$\frac{\$ 0.51}{\text{Gallon}}$	https://www.indexmundi.com
Butano	$\frac{\$ 11.27}{293.07 \text{ kWh}}$	https://www.eia.gov
Methanol	$\frac{\$ 0.67}{\text{kg}}$	https://www.chembid.com/
Metano	$\frac{\$ 0.61}{\text{litro}}$	https://es.globalpetrolprices.com
Gasoleo	$\frac{\$ 1.14}{\text{kg}}$	https://www.indexmundi.com

Para convertir los precios a unidades de referencia del hidrógeno se realiza la conversión utilizando la densidad de la sustancia, excepto para aquellas que ya tienen su valor en kilogramo o su valor en Kilowatts hora las cuales se dejaran como están.

$$\text{Densidad de gasolina} = 720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Precio en kilogramo} = \frac{\frac{\$ 1.25}{\text{Gal}}}{720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{264.172 \text{ gal}}} = \frac{\$ 0.46}{\text{kg}}$$

$$\text{Densidad de metano} = 0.162 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$\text{Precio en kilogramo} = \frac{\frac{\$ 0.61}{\text{l}}}{0.162 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = \frac{\$ 3.76}{\text{kg}}$$

$$\text{Densidad de propano} = 493 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Precio en kilogramo} = \frac{\frac{\$ 0.51}{\text{gal}}}{493 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{264.172 \text{ gal}}} = \frac{\$ 0.27}{\text{kg}}$$

Tabla 4.8 Comparaciones frente al precio calculado del hidrógeno

Combustible	Precio cotizado	Equivalente en H2	Precio equ. hidrógeno (\$)	Diferencia de precios	Diferencia porcentual (%)
Gasolina	\$0.46/kg	2.78kg/KgH2	1.27	-3.19	77%
Gasóleo	\$1.14/kg	2.8kg/kgH2	3.19	-1.28	31%
Metano	\$3.76/kg	2.40kg/kgH2	9.02	4.55	109%
Gas Natural	\$0.007813/kWh	-	0.26	-4.21	101%
Propano	\$0.27/kg	2.59kg/kgH2	0.70	-3.77	90%
Butano	\$0.03845/kWh	-	1.28	-3.20	77%
Metanol	\$0.67/kg	6.09kg/kgH2	4.08	-0.39	9%

La **tabla 4.8** nos muestra los precios cotizados de los combustibles, la cantidad de kilogramos del combustible que igualaría un kilogramo de cantidad energética del hidrógeno, el precio que equivale la cantidad de energía que proporciona el hidrógeno en un kilogramo, la diferencia del precio entre un kilogramo de hidrógeno y el costo del combustible con la misma cantidad de energía y por último el porcentaje de diferencia de la comparativa anterior. En rojo representa cuan más caro está el hidrógeno y en verde cuan más barato está el Hidrógeno.

La interpretación de la tabla 4.8 nos lleva a pensar que el hidrógeno económicamente no es viable para la mayoría de los casos, aunque técnicamente si lo sea, por lo que hay que considerar una cantidad de factores para poder realizar mejores comparaciones como por ejemplo la mejora de la eficiencia por el tipo de electrolizador mejorando el área de contacto o utilizando materiales de electrodos más eficientes; sin embargo lo más influyente podría ser la evaluación beneficio costo que puede generar el consumo del combustible hidrógeno.

En el proceso de producción de hidrógeno no se ha tomado en cuenta el factor almacenamiento el cual podría ser muy influyente en la aplicación ya que, para poder almacenar la cantidad de masa equivalente al contenido energético de otro combustible, se puede encontrar con que la tecnología puede ser más costosa y la ingeniería se puede volver más complicada por la necesidad de espacio y adaptaciones del lugar donde se desea almacenar. Podemos ver una comparación del espacio y el peso que pudiesen ser ocupados entre almacenes de hidrógeno y de otros combustibles, así como de sus condiciones en la **figura 4.15**.

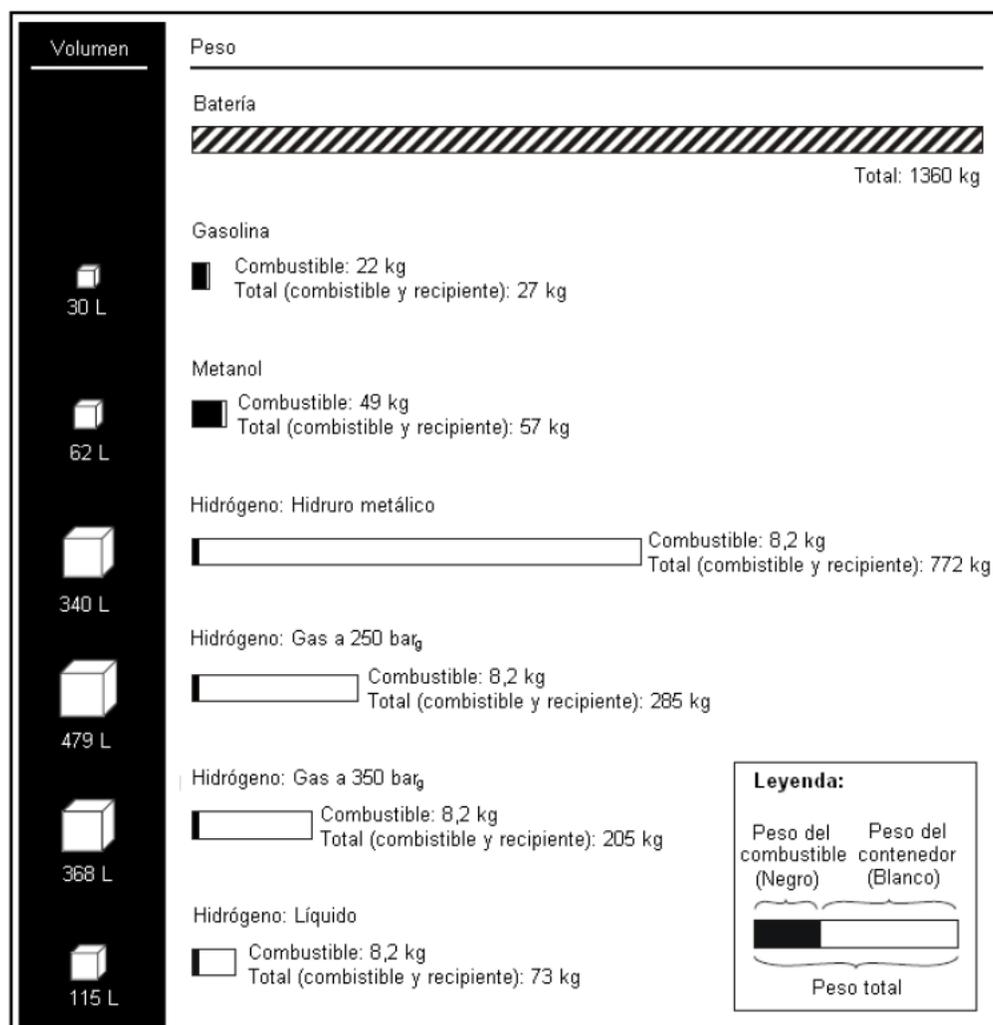


Figura 4.15 Comparativa de almacenamiento de hidrógeno

Fuente: (Asociación española del hidrógeno, 2019)

Otro factor muy importante es el precio final del producto que incluye costos de distribución, marketing e impuestos (**Figura 4.16**) los cuales no están considerados en la tabla 4.8 por lo que las comparaciones pueden variar al ofrecer el producto final, sin embargo, se tomará como base para realizar las comparaciones de precio de ventas en la sección de evaluación económica (EIA, 2020).

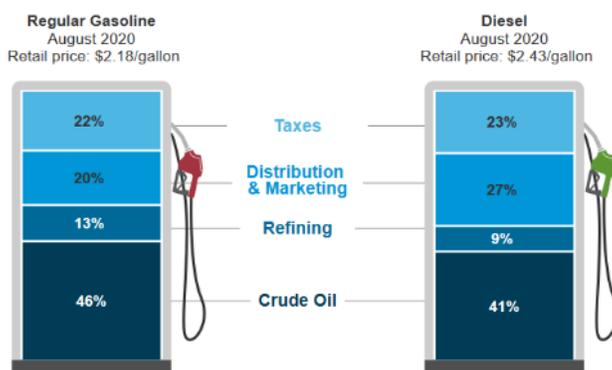


Figura 4.16 Costos adicionales de producción y venta
Fuente: (EIA, 2020)

4.4.2. Evaluación económica: Método beneficio costo

Otra forma de realizar una evaluación económica de un sistema como el propuesto, es con costo y beneficio, el cual consiste en juntar y sumar todos los costos del proyecto y dividirlo por los beneficios económicos que se pudieran obtener tomando en cuenta el VP (valor presente) de cada valor monetario para manejar el cambio del valor del dinero en el tiempo. El método se ocupa para proyectos que no necesitan ser rentables sobre todo en el sector público y ya que el enfoque que tiene el sistema de ser una aporte a resolver una problemática ambiental, este método es el ideal para poder evaluar; para poder aceptar el valor del costo, el resultado de la división tiene que tener un valor de uno o menor que uno para que sea autosustentable, sin embargo si el costo es mayor que el beneficio el sistema podría ser aceptable hasta cierto punto por el aporte medioambiental que genera. El cálculo puede realizarse con los beneficios dividiendo los costos, pero el resultado aceptable será si el valor es mayor a uno. Normalmente existe una inflación del 5% a tomarse en cuenta y para que además sea una propuesta atractiva para el sector privado tendría que tener un valor menor a uno todo el tiempo; y ese es el objetivo que genera este tipo de investigaciones como las que se está implementado en este trabajo de graduación (Urbina, 2013).

Dentro de la aplicación del método beneficio/costo (B/C) se retomará la modalidad de evaluación para un solo proyecto donde ponderaremos el beneficio, el contra beneficio y el costo de la implementación del sistema. La manera más convencional de realizar la evaluación es (Blank, 2006):

$$\frac{B}{C} = \frac{(\text{beneficios} - \text{contrabeneficios})}{\text{costos}}$$

Tomando en cuenta los valores más detallados se puede realizar la operación incluyendo en los costos el valor de la inversión inicial calculada a partir únicamente de los gastos involucrados en el proceso más no en su instalación puesto que la evaluación se realiza de manera general para evaluar su costo en funcionamiento, además se incluye el costo de operación y mantenimiento (M&O) como resta a los beneficios, la fórmula de B/C quedaría de la siguiente manera:

$$\frac{B}{C} = \frac{(\text{beneficios} - \text{contrabeneficios} - \text{costos M\&O})}{\text{inversión inicial}}$$

Una manera de medir el beneficio generado por la propuesta es midiendo el valor que tiene en los bonos de carbono generados por el protocolo de Kioto, que, aunque ya caducaron son una forma de la noción del beneficio que puede tener el proyecto al reducir toneladas de carbono en la atmósfera. A continuación, se presenta el valor de inversión que representa el hidrógeno en función del bono:

$$\text{Precio bono de carbono}^4 = \frac{\$24.97}{T \text{ CO}_2} \times \frac{1 T \text{ CO}_2}{1000 \text{ kg CO}_2} = \frac{\$0.02497}{\text{kg CO}_2}$$

$$\text{Poder de combustión } H_2 = 33.33 \frac{\text{kWh}}{\text{kgH}_2}$$

$$\text{Factor de emisión} = \frac{7.07 \times 10^{-4} T \text{ CO}_2}{\text{kWh}} \times \frac{1000 \text{ kg CO}_2}{T \text{ CO}_2} = \frac{0.707 \text{ kg CO}_2}{\text{kWh}}$$

$$\text{Beneficio en función de potencia} = \frac{0.707 \text{ kg CO}_2}{\text{kWh}} \times \frac{\$0.02497}{\text{kg CO}_2} = \frac{\$0.017654}{\text{kWh}}$$

$$\text{Beneficio en función de } H_2 = \frac{\$0.017654}{\text{kWh}} \times 33.33 \frac{\text{kWh}}{\text{kgH}_2}$$

$$\text{Beneficio de bonos en función de } H_2 = \frac{\$0.5884}{\text{kgH}_2}$$

El beneficio en función del hidrógeno nos arroja un precio de ganancia por kilogramo de hidrógeno producido. Para calcular un valor de beneficio neto en el tiempo se tomará como base de tiempo 13 años los cuales representan una garantía de fabricante del sistema de paneles solares y colectores solares por lo cual se puede decir que se hará para la vida útil del sistema. Tomando en cuenta que para una hora de producción se produciría 1 kg de hidrógeno y que se calculan la cantidad de horas de ejecución del sistema se puede calcular un estimado

⁴ Precios históricos de emisiones de carbono (2018). FUENTE: <https://es.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>

de hidrógeno producido en todo ese lapso de tiempo y posteriormente con los equivalentes de bonos de carbono se calculará el beneficio total del proyecto.

$$\begin{aligned}
 &365 \text{ días} \times 13 \text{ años} = \mathbf{4,745 \text{ días de producción}} \\
 &4745 \text{ días} \times 8 \text{ horas utiles de luz} = \mathbf{37,960 \text{ horas de producción}} \\
 &\text{kg H}_2 = \mathbf{37960 \text{ kg}} \\
 &\text{Beneficio} = \frac{\$0.5884}{\text{kgH}_2} \times 37960 \text{ kg} \\
 &\mathbf{\text{Beneficio de bonos} = \$22,335.7}
 \end{aligned}$$

Sumado a los beneficios que nos brinda la eliminación del CO₂ agregaremos un margen de ganancia que para los combustibles ronda del 20% al 50% sobre los costos de producción por lo que se calcularán los costos de mantenimiento y producción y a eso se le aplicará el margen de ganancia. Tomando en cuenta que el hidrógeno en el mercado actualmente ronda de los \$10 a los \$14 dependiendo el país según la asociación española del hidrógeno nos permitirá incrementar la ganancia hasta un 100% sin sobrepasar el valor de mercado para obtener los beneficios de la venta del hidrógeno.

$$\begin{aligned}
 \text{Costo de operación} &= \frac{\$4.47}{\text{kgH}_2} \times 37960 \text{ kg} = \mathbf{\$169,681} \\
 \text{ingreso de venta} &= \$169681 \times 2 \text{ (ganancia 100\%)} = \mathbf{\$339,362} \\
 \text{Total de beneficios} &= \$339,362 + \$22,335.7 = \mathbf{\$361698.7}
 \end{aligned}$$

El contra beneficio en este caso se representará por el costo de oportunidad de producir otro combustible gaseoso derivados del petróleo que son más baratos comparándose con el incremento del costo del hidrógeno. En este caso a manera de ejemplificación de cálculo se comparará con el de mayor densidad (BUTANO) que podría dar más capacidad energética por unidad de masa (Tabla 4.8) con un precio de contra beneficio de \$3.20 restando el precio de venta equivalente al 24% (según figura 4.13 para sacar el valor del costo neto) lo cual da un valor de \$2.43.

$$\text{Contra beneficio} = \frac{\$2.43}{\text{kgH}_2} \times 37960 \text{ kgH}_2 = \mathbf{\$92242.8}$$

El valor del costo de inversión se remonta a la cantidad de equipo que se utilizará para producir la cantidad de hidrógeno deseada la cual para este caso se mantiene como propuesta de ejemplo, un kilogramo de hidrógeno por hora. Cabe destacar que la ejemplificación sirve para tomar un modelo que puede ser replicable y aumentar la producción si así se considera además que en esta oportunidad solo consideraremos el costo de inversión referente a los paneles solares y a los calentadores solares ya que solo será una evaluación general la que se realizará referente a una producción continua. La cantidad de kW a utilizar es de 49.34 por Kg de hidrógeno calculado en la tabla 4.2 para la concentración más alta y temperatura más alta.

$$\# \text{ de paneles a usar} = \frac{1 \text{ panel}}{400 \text{ W}} \times \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}} \times 49.34 \frac{\text{kW}}{\text{kgH}_2} = 123.35 \sim 124 \text{ paneles}$$

$$\text{Costo de paneles} = 124 \text{ paneles} \times \frac{\$348.20}{1 \text{ panel}} = \$43176.8$$

En el apartado 4.3.3 se calcula el precio total de los calentadores:

$$\text{Costo total calentadores} = 41 \text{ unidades} \times \frac{\$610}{1 \text{ unidad}} = \$25,010.0$$

$$\text{Inversión solar inicial} = \$25,010 + \$43176.8 = \$68186.8$$

Habiendo calculado los totales para el período establecido se buscará el valor representado como monto de recuperación de capital para un tiempo de 13 años a través del factor A/P que consiste en encontrar el valor anual uniforme equivalente A durante n años de un valor presente de inversión P en el año 0 a una tasa de interés que para este caso es la inflación normal del 5%:

$$A = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

Ecuación de notación estándar: $A = P \left(\frac{A}{P}, i, n \right)$

Ejemplo para el cálculo de la inversión inicial

$$A = 68186.8 \left[\frac{0.05(1+0.05)^{13}}{(1+0.05)^{13} - 1} \right] = \$7258.88$$

También se puede calcular aplicando la notación estándar en Excel de la siguiente manera:

$$VA = A = PAGO(68186.8, 5\%, 13) = \$7258.88$$

Tabla 4.9 Desglose de valores para evaluación costo/beneficio

	Valor Presente	VA
Costo Inversión	\$68,186.80	-\$7,258.88
Beneficio	\$361,698.70	-\$38,504.91
Contra Beneficio	\$92,242.80	-\$9,819.78
Costo operación	\$169,681.00	-\$18,063.52

Teniendo los valores calculados para VA de los valores asociados y presentados en la **tabla 4.9** con la consideración del cambio del valor en el tiempo aplicado la tasa de inflación podemos aplicar la ecuación beneficio-costos.

$$\frac{B}{C} = \frac{(\text{beneficios} - \text{contrabeneficios} - \text{costos M\&O})}{\text{inversión inicial}}$$

$$\frac{B}{C} = \frac{(\$38504.91 - \$9819.78 - \$18063.52)}{\$7258.88}$$

$\frac{B}{C} = 1.46$

La interpretación final del valor de 1.46 es que por cada dólar invertido estamos recibiendo 46 centavos. Como resultado nos da un valor mayor a 1 lo cual nos quiere decir que a términos generales el sistema de producción considerado es rentable a la hora de estar operando sin embargo habría que tomar en consideración los costos indirectos y de la maquinaria completa. Cabe destacar que los precios de mercado del hidrógeno son mucho más elevados, pero se considera que a medida pasen los años decrezca su costo por lo que es importante mantener una investigación y evaluación constante sobre el tema. Esto nos indica que los rangos de ganancia considerados pueden ser mayores lo que incremente la relación B/C.

4.5. Escalamiento Industrial aproximado de la metodología propuesta

A continuación, se muestra un diseño a partir de datos que se calculan a continuación en los cuales se estima un caudal de entrada de 1 m³/h de Sln de NaOH en exceso y para una producción de 600 m³/h H₂ y 300 m³/h O₂; se buscan alternativas de equipos que se podrían utilizar para estas condiciones de trabajo, en el cual se toma la concentración más alta de 33.4% P/V y la temperatura más alta que corresponde a los 85°C, tomando en cuenta el sistema de la **figura 4.17**.

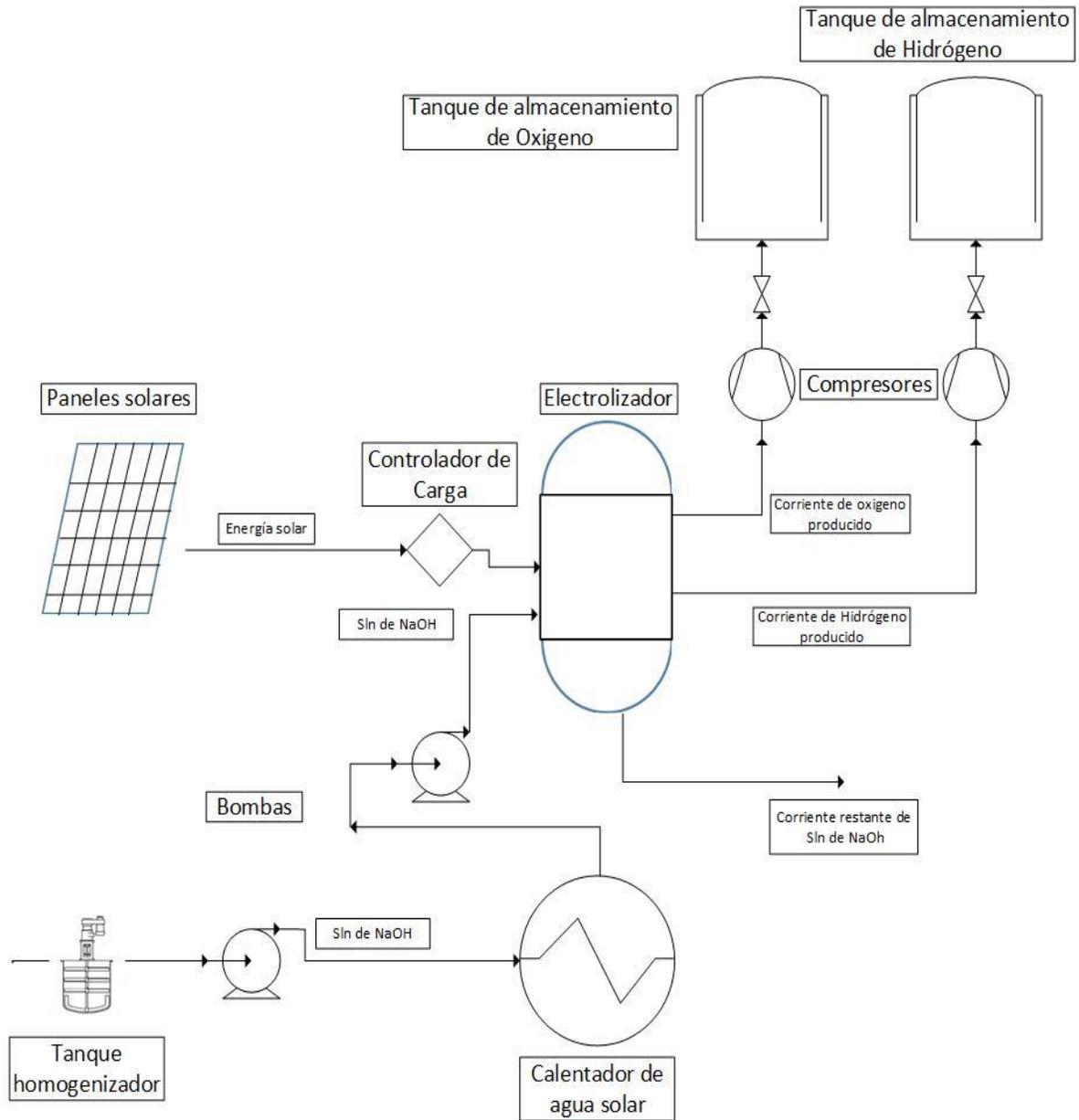
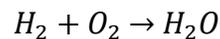


Figura 4.17 Diseño de planta productora de Gas Hidrógeno propuesto y elaborado en base a sistema en estudio

De acuerdo a la reacción



Y para un caudal deseado de $10 \text{ m}^3/\text{min}$ de H_2 se necesitará la siguiente cantidad de solución de NaOH: En $10 \text{ m}^3/\text{min}$ de H_2 se tiene por ley de gases ideales y llevándose a cabo la operación a 1 atm de presión y a 85°C se tiene la cantidad de moles:

$$n = \frac{p * v}{R * T}$$

$$n = \frac{1 \text{ atm} * 10,000 \text{ l de } H_2}{0.08205 \frac{\text{atm} * \text{l}}{\text{mol} * \text{K}} * 355 \text{ K}}$$

$$n = 345.26 \text{ mol de } H_2$$

Por estequiometria de reacción se sabe

$$\frac{1 \text{ mol de } H_2}{1 \text{ mol de } H_2O}$$

$$\frac{1 \text{ mol de } H_2O}{1 \text{ mol de } H_2} * 345.26 \text{ mol de } H_2 * \frac{18.0115 \text{ g de } H_2O}{1 \text{ mol de NaOH}}$$

$$m_{H_2O} = 6218.65 \text{ g de } H_2O$$

para una solución de NaOH de 33.4% p/p se tiene

$$\% p/p = \frac{m_{NaOH}}{m_{NaOH} + m_{H_2O}}$$

$$0.334 = \frac{m_{NaOH}}{m_{NaOH} + 6218.65 \text{ g de } H_2O}$$

Despejando para m de NaOH

$$m_{NaOH} = 3118.66 \text{ g de NaOH}$$

$$m \text{ de sln NaOH} = m_{NaOH} + m_{H_2O}$$

$$m \text{ de sln NaOH} = 6218.65 + 3118.66$$

$$m \text{ de sln NaOH} = 9337.31 \text{ g de sln NaOH}$$

Para una densidad de 1.33 g/ml para una concentración de 34% y a 80°C

$$V \text{ de sln NaOH} = \frac{9337.31 \text{ g de sln NaOH}}{1.33 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \text{ de sln de NaOH}} * \frac{1 \text{ L de sln de NaOH}}{1000 \text{ ml de sln de NaOH}}$$

$$V \text{ de sln NaOH} = 7.02 \text{ L/min de sln de NaOH}$$

Esto debido a que se ha partido de una producción de $10 \text{ m}^3/\text{min}$ de H_2 . Para una hora de producción se tiene que se generarán $600 \text{ m}^3/\text{h}$ H_2 y por un factor estequiométrico según reacción de 1:0.5 se producirán $300 \text{ m}^3/\text{h}$ O_2 y se necesitará una inyección de al menos 421.2L de Sln de NaOH.

4.5.1. Bombas

Para el caso de las bombas del sistema se elegirían bombas de desplazamiento positivo del tipo de diafragma. Este tipo de bombas como la representada en la **figura 4.18** (Direct Industry, 2020) ofrecen ciertas ventajas frente a otros, ya que no poseen cierres mecánicos ni empaquetaduras que son las principales causas de rotura de los equipos de bombeo y en este caso debido a que la Sln a transportar es corrosiva. Se muestra a continuación una posible bomba que se podría utilizar tomando en cuenta los datos de operación mencionados anteriormente. Debido a ser una bomba de diafragma se necesitaría un compresor adicional para el suministro de aire que esta necesite.

Bomba metálica de membrana, 1" Proporción 1:1

Caudal máximo por minuto: 197 l/min
Presión de aire máxima: 8.3 bar (120 psi)
Elevación máxima por succión en seco: 5.70 m



Figura 4.18 Bomba de diafragma

Fuente: (Direct Industry, 2020)

4.5.2. Tuberías y accesorios

Para el caso de las tuberías deberán ser de acero inoxidable en específico del 316 debido a lo corrosivo de la Sln de NaOH, antes de llevarse a cabo la electrólisis y las tuberías donde se transporta el gas a los tanques de almacenamiento deben ser resistentes a 200 bar de presión que es a la presión que se guarda el gas Hidrógeno para esto deben ser de acero del tipo inoxidable de alta presión y con la menor rugosidad interna de tubería para evitar problemas relacionados con roturas de tuberías y de ignición de gas Hidrógeno debido a la fricción con paredes de tubería. La apariencia y especificaciones de este tipo de tuberías es presentada en la **figura 4.19 y 4.20**.



Figura 4.19 Tuberías de acero inoxidable 316 (Aleación Tubos, 2020)

Las especificaciones serían de 2" ½ de diámetro cédula 40 para todo el proceso solamente tomando en cuenta la diferencia antes mencionada para la tubería de gas Hidrógeno (Aleación Tubos, 2020).

Especificación de tuberías y tubos de acero inoxidable 316

Normas: ASTM A312, A213, A249, A269, A358, A409, A554

Diámetro exterior: 6.00 mm OD hasta 914.4 mm OD, Tamaños hasta 24 "NB disponibles Ex-stock, OD Tamaño Tubos de acero disponibles Ex-stock

Rango de espesor: 0,3 mm - 50 mm, SCH 5, SCH 10, SCH 40, SCH 80, SCH 80S, SCH 160, SCH XXS, SCH XS

Forma: Tubos redondos / tubos SS 316, Tubos redondos / tubos SS 316, Tubos redondos / tubos SS 316, Tubos redondos SS 316, Forma SS 316 "U", Bobinas secas Pan SS 316, Tubos hidráulicos SS 316

Longitud: sola aleatoria, doble aleatoria y longitud requerida

End: extremo liso, extremo biselado, tenso

ACABADO: Sin costura, soldada, cepillada, en escabeche, solución recocida y en escabeche hasta O.D. 219.1 mm, grano pulido 120 - 600, pulido espejo

Figura 4.20 Especificaciones de tubería acero inoxidable 316 (Aleación Tubos, 2020)

Para el caso de accesorios, en específico las válvulas que se muestran en la **figura 4.17** antes de la entrada a los tanques de almacenamiento las cuales deben de ser del tipo anti retorno o check para alta presión debido a la presión que se deben almacenar los gases.

4.5.3. Compresores

En el caso de los compresores que se utilizarían deberán de ser para una presión de 200bar debido a que el gas hidrógeno por lo general se almacena a esta presión sin necesidad de hacer cambio de fase de gas a líquido de igual forma para almacenar el Oxígeno. Una muestra del tipo de compresor a utilizar está en la **figura 4.21** posteriormente con sus especificaciones técnicas en la **figura 4.22** donde especifica que es para gases como helio, hidrógeno y gas natural: Compresor (Direct Industry, 2020) de alta presión Orkan WP5173LHH BasSeal-He.



Figura 4.21 Compresor Orkan para aumento de presión a 200bar (Direct Industry, 2020)

Tipo	de helio, de hidrógeno, de gas natural
Instalación / movilidad	estacionario
Accionamiento	eléctrico
Tecnología	de pistón
Lubricación	lubricado con aceite
Otras características	de alta presión, modulable, refrigerado por aire, con sellado hermético
Uso previsto	industrial, para la recuperación
Presión	Máx.: 350 bar (5.076,32 psi) Mín.: 150 bar (2.175,57 psi)
Caudal	Máx.: 200 m ³ /h (7.062,93 ft ³ /h) Mín.: 120 m ³ /h (4.237,76 ft ³ /h)
Potencia	Máx.: 110 kW (149,56 hp) Mín.: 90 kW (122,37 hp)

Figura 4.22 Características para compresor Orkan (Direct Industry, 2020)

Para este caso como es alta presión y alto caudal no se encontraron compresores para estas características se debería hacer un arreglo en paralelo de 3 compresores para así evacuar el caudal de salida de hidrógeno y 2 para el caudal de oxígeno de acuerdo a las especificaciones del compresor.

4.5.4. Tanques de almacenamiento

Para el caso de almacenamiento dependiendo de las necesidades del consumidor se podría tener una línea de llenado de tanques pudiéndose almacenar en cilindros hechos con materiales aptos para alta presión como el tipo 3AA que están hechos con material de molibdeno. Aunque el oxígeno no es el producto de mayor interés para este caso puede ser resguardado para su posterior venta incrementando un ingreso subsecuente de la producción de hidrógeno no siendo su almacenamiento de obligatoriedad pudiendo ser emitido a la atmosfera con las medidas de precaución pertinentes sin causar daño alguno. Para el Hidrógeno en El Salvador tomando como base el código de colores de grupo INFRASAL el color correspondiente es el rojo, para el caso del oxígeno corresponde el color verde; sin embargo, por norma de seguridad no es recomendable identificar el contenido del gas según el color del recipiente, si no con su respectiva etiqueta y aunque esta misma empresa pone a la venta gases como el oxígeno y el hidrógeno únicamente alquila los recipientes y no tiene venta del recipiente, por lo que se pueden utilizar los tanques de almacenamiento tanto para hidrógeno como para oxígeno que se proponen en las **figuras 4.23 y 4.24**. (INFRASAL, 2020)



Figura 4.23 Cilindros para almacenamiento de Hidrógeno (Alibaba, 2020)

Descripción general

Detalles rápidos

Lugar del origen:	Shandong, China	Marca:	SL-TANK
Número de Modelo:	SL-TANK	Condición:	Nuevo
Dimensión (L*W*H):	Opcional de tanque de almacenamiento	Capacidad:	Personalizado
Peso:	200 t	Servicio postventa ...	Ingenieros disponibles para la puesta en marcha en el extranj...
Nombre de tanque ...	Fuerza marca ASME CE aprobado propano hidrógeno tanque ...	Material del tanque...	Acero al carbono del tanque de almacenamiento
Tipo de tanque de ...	Groud tanque de almacenamiento	Color del tanque de...	Petición del cliente
Certificación de tan...	Sistema de almacenamiento ASME CE	Presión de trabajo ...	1.6Mpa/16 Bar
Temperatura de tra...	20C-100C	Medio de trabajo d...	Gas de petróleo
Marca de tanque d...	SL	Dimensión del tanq...	Opcional

Capacidad de suministro

Capacidad de sumi... 20 Pack/Packs per Month

Figura 4.24 Descripción de cilindros para almacenaje de gases (Alibaba, 2020)

4.5.5. Paneles solares

Para el caso de paneles solares hay que tomar en cuenta cuanta potencia se necesitaría suministrar al sistema. Se determinó a partir del experimento que para la concentración de 33.4% p/v y para la temperatura de 85°C hay 0.006806g por 0.1L y un rendimiento de 49.34 kW/kgH₂ y se desea una producción de 600 m³/h H₂, por lo que se hará la respectiva conversión.

$$\# \text{ de paneles a usar} = \frac{1 \text{ panel}}{400 \text{ W}} \times \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}} \times 49.34 \frac{\text{ kW}}{\text{ kgH}_2} = 123.35 \sim 124 \text{ paneles}$$

$$\text{Densidad} = \frac{0.00686 \text{ gH}_2}{0.1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = \frac{\mathbf{0.0686 \text{ Kg}}}{\mathbf{1 \text{ m}^3}}$$

$$\# \text{ paneles} = 124 \frac{\text{ paneles}}{\text{ kgH}_2} \times \frac{0.0686 \text{ Kg}}{1 \text{ m}^3} \times 600 \text{ m}^3 = 5103.84 \sim \mathbf{5104 \text{ paneles}}$$

La cantidad de paneles solares calculados puede parecer elevado sin embargo hay que recordar que el caudal es de 600 m³ por hora o 10 m³ por minuto lo cual a manera de visualizarlo podría decirse que despacha el volumen de una pipa cisterna por minuto. El modelo del panel propuesto corresponde al utilizado en la determinación de costos el cual es panel de 400W monocristalino. Ver Hoja técnica en anexos (Soluciones Led, 2020).

4.5.6. Controlador de carga

La principal característica necesaria para el controlador de carga es la cantidad de corriente eléctrica que pudiera manejar. Calculando que cada panel propuesto entrega 10 A y conociendo la cantidad de paneles el número de controladores del tipo propuesto con 50 A es:

$$\begin{aligned} \# \text{ controladores} &= 5104 \text{ paneles} \times \frac{10 \text{ A}}{1 \text{ panel}} \times \frac{1 \text{ controlador}}{50 \text{ A}} \\ &= \mathbf{1020 \text{ Controladores}} \end{aligned}$$

El controlador de carga propuesto de la **figura 4.25** está diseñado para instalaciones de alto consumo tal y como posteriormente sus especificaciones lo detallan.



Figura 4.25 Controlador de carga para estabilizar corriente (Direct Industry, 2020)

Se propone el Controlador de carga con las siguientes especificaciones:

Fabricante profesional MPPT 30A-50A 12V/24V/48V auto Controlador solar portátil Panel solar Regulador de la batería Controlador de carga Pantalla LCD Introducción: El controlador solar SOLARVERTECH MPPT (también conocido como regulador de carga solar inteligente, regulador de carga solar, regulador fotovoltaico) puede regular de forma inteligente el voltaje de trabajo de los paneles solares, permitiendo que los paneles solares trabajen siempre en el punto de máxima potencia de la curva V-A. Comparado con el controlador solar ordinario, este controlador MPPT puede aumentar la eficiencia de los módulos PV en un 10%-30%. Diseño de refrigeración del disipador de calor, funcionamiento silencioso (Direct Industry, 2020).

Detalles rápidos:

- a) Controlador del cargador MPPT48-50^a
- b) Tiempo de trabajo (h):1-24H
- c) Máxima potencia fotovoltaica: De acuerdo con la carga
- d) Voltaje máximo PV:48V
- e) Certificado: CE RoHS ISO9001
- f) Garantía: 2 años,
- g) Pantalla: Pantalla LCD - Certificación: CE RoHS ISO9001
- h) Tipo de batería:Plomo Acido - Material: Aluminio
- i) Corriente nominal: 50^a
- j) Eficiencia:97.5%
- k) Protección: Cortocircuito
- l) Voltaje del sistema: 12V/24V/48V

4.5.7. Sistema para electrólisis

Para llevarse a cabo la electrólisis se necesita un electrolizador industrial normal disponible en el mercado que trabaje con los parámetros deseados. Se propone el siguiente electrolizador (Alibaba, 2020) de la **figura 4.26** cuyas especificaciones son detalladas en la **figura 4.27** con especificaciones tipo industrial:



Figura 4.26 Electrolizador alcalino (Alibaba, 2020)

Quick Details	
Applicable Industri...	Manufacturing Plant, Farms, Cutting industry
Local Service Locat...	Italy, India, Russia, Japan, South Korea
Showroom Location:	India, Thailand, South Korea
Condition:	New
Place of Origin:	China
Usage:	Hydrogen
Production Rate:	1-1000Nm3/h
Weight:	Actual weight
Dimension(L*W*H):	Actual size
Certification:	As customer's request
Warranty:	1 Year
After-sales Service ...	Video technical support, Online support, Field installation, co...
Key Selling Points:	High Productivity
raw material:	water
Capacity:	1-1000Nm3/h
Purity:	99.8%
Pressure:	1.5-2.0 Mpa
Operating temperat...	around 85°C
H2 water content:	<4 g/m3
H2 alkali content:	<1 mg/m3
application:	hydrogen electrolysis generator
keyword:	electrolyzed water equipment

Figura 4.27 Especificaciones técnicas electrolizador (Alibaba, 2020)

4.5.8. Calentador de agua solar

Debido a que en el proceso se debe elevar la temperatura de la solución a 85°C es necesario buscar un sistema para eso a continuación se presenta un calentador de agua solar (Made in China, 2020) en la **figura 4.28** y posteriormente en la **figura 4.29** las especificaciones técnicas.



Figura 4.28 Calentador de agua solar (Made in China, 2020)

Información Básica

No. de Modelo.	WB-HP-SP-300L-30	Max. Capacidad	> 200L
Estructura	Tipo de Compacto	Presión	A Presión
Material del Interior	Acero Inoxidable	Componentes coleccionista	Tubo Vacío de Cristal
Composición	Soporte	Certificación	ISO9001

Información Adicional

Marca	Wombat	Embalaje	Wooden Case, Pallet
Estándar	150L, 200L, 300L	Origen	Jiangsu
Código del HS	84149010	Capacidad de Producción	11000sets/Year

Figura 4.29 Especificaciones de calentador de agua solar (Made in China, 2020)

Como el caudal a calentar es de 1000L se necesitarían 5 calentadores de este tipo suponiendo que se adquiere el de mayor capacidad de 200L

4.5.9. Tanque homogeneizador

Para la preparación de la SIn de NaOH al 33.4% es necesario un tanque con agitación y así homogenizar la mezcla con una capacidad de 1.10m³ siempre mayor a la necesaria, una alternativa podría ser la siguiente presentada en la **figura 4.30** con sus especificaciones técnicas en la **figura 4.31**.



Figura 4.31 Tanque homogeneizador para preparación de SIn de NaOH (Alibaba, 2019)

Descripción general	
Detalles rápidos	
Número de Modelo:	Mezclador
Capacidad de carg...	50-5000L
Tipo de producto:	Lavado a mano detergente líquido, Lavado a mano detergente...
Capacidades adici...	Tratamiento líquido
Marca:	Keda
Dimensión (L*W*H):	Refiriéndose
Nombre del produc...	Mezcla Vasos
Ámbito de aplicaci...	Líquido
Las capacidades a...	Tratamiento líquido
Método de calefac...	Calefacción eléctrica
Tensión:	220 V/380 V
Garantía:	1 año

figura 4.30 Especificaciones de tanque homogeneizador (Alibaba, 2019)

OBSERVACIONES

Debido a que el desarrollo de la etapa de anteproyecto, etapa del diseño del experimento y etapa experimental se realizaron en tiempos de pandemia de COVID-19 y parte de la pandemia en cuarentena domiciliar obligatoria, algunos de los procedimientos y diseños para el experimento previamente establecidos sufrieron algunos cambios, sin embargo, no sustanciales en cuanto a los resultados que se buscaban en el experimento.

- a) Los factores más apreciables son el no poder utilizar las instalaciones de laboratorio y equipo especializado que este brinda por lo que realizando gestiones se logró el préstamo del equipo más esencial y no muy delicado por laboratorio externo al de la planta piloto.
- b) Debido a falta de material esencial para construir el electrolizador y los electrodos como es el acero 316 resistente a la corrosión por picadura y galvánica, material necesario para la aplicación de sustancias alcalinas y corrientes eléctricas, se optó por utilizar cristalería de laboratorio. Al no poder realizar el procedimiento para llenar la cubeta de agua junto con las probetas se colocó un pequeño extractor de aire con un dispensador de fluidos conectado a una manguera pequeña para incorporarla a las probetas invertidas y sumergidas en solución para vaciar el aire.
- c) Además de los cambios antes mencionados se modificó la variable independiente en los experimentos siendo con anterioridad el tiempo y la variable dependiente el volumen, sin embargo, por no poder conseguir probetas más grandes por la misma situación, el volumen producido se vió limitado a 100ml por experimento por lo que se fijó este valor de volumen y se midió el tiempo en que se lograba llenar la probeta de H_2 .
- d) Después de realizados los experimentos y habiendo analizado los datos obtenidos, se encontraron congruencias en tendencias y comportamientos por lo que las modificaciones hechas no influyeron erróneamente en el experimento.

CONCLUSIONES

Referente a la investigación teórica y práctica, tomando en cuenta los objetivos planteados al inicio de este trabajo de investigación se concluye lo siguiente:

- a) La implementación del prototipo de proceso de producción de hidrógeno mediante la utilización de energía solar resultó ser efectiva a nivel de laboratorio produciendo hidrógeno y oxígeno a niveles constantes en el tiempo.
- b) Al realizar los análisis técnicos respectivos, se considera técnicamente viable la utilización de energía solar para ser aprovechada en la conversión de energía eléctrica y luego su uso para producir hidrógeno por medio de electrólisis de una solución de NaOH, teniendo eficiencias desde 20% hasta un 87% en la conversión final de energía eléctrica a hidrógeno.
- c) Al comparar el coste de producción con los derivados del petróleo y principalmente con los gases (metano, propano, butano y gas natural) se obtiene que, a excepción del metano (que ha resultado ser más del doble de caro que el hidrógeno), el hidrógeno es más costoso con el sistema propuesto desde un 9% hasta un 101% sobre el precio del mercado para los diferentes combustibles. La razón principal radica en que el hidrógeno tiene un costo de producción asociado mientras que los demás combustibles únicamente se extraen de manera natural.
- d) Al realizar una evaluación económica general del proceso de generación del hidrógeno en operaciones se concluye para un análisis de beneficio-costos, que el proyecto es rentable económicamente y que, aunque el valor de B/C fuera 1 el sistema seguiría siendo rentable ambientalmente ya que elimina la producción de CO₂ en su utilización.

RECOMENDACIONES

- a) Realizar balance energético para proponer nuevos modelos de procesos. Se realizó un balance energético con los gastos energéticos más grandes y no un balance global energético debido a los objetivos de la investigación que se centra en la producción de hidrógeno y su rendimiento por lo que se sugiere que para futuras investigaciones se tomen en cuenta las entalpías iniciales para ahorro de energía, así como el incremento de temperatura a la hora de mezclar el NaOH con el agua.
- b) Es importante señalar que existe un cambio de rendimientos a los extremos de temperaturas siendo el de mayor concentración más eficiente a temperatura alta y el de menor concentración más eficiente a temperatura ambiente por lo que se puede recomendar realizar un estudio de ingeniería del proceso para aumentar el rendimiento manteniendo un proceso que aproveche dichos cambios como bien podría ser almacenar el calor solar en tanques de agua salina.
- c) Para mantener precios bajos se recomienda ampliar los procesos como bien podría ser el recicló óptimo del NaOH, la presurización a bajo costo, el almacenamiento de calor y las disposiciones de la instalación.
- d) En el proceso de producción de hidrógeno no se ha tomado en cuenta el factor almacenamiento el cual podría ser muy influyente en la aplicación ya que, para poder almacenar la cantidad de masa equivalente al contenido energético de otro combustible, se puede encontrar con que la tecnología puede ser más costosa y la implementación se puede volver más complicada por la necesidad de espacio y adaptaciones del lugar donde se desea almacenar por lo que es recomendable realizar un estudio únicamente de las alternativas de almacenamiento del hidrógeno.

- e) Para una mayor precisión de los datos, se recomienda, un análisis de composición gaseosa en la corriente de salida de la electrólisis, debido a que por el incremento de la temperatura de la solución, genera vapor de agua dentro de la corriente de producción, además de que si no se utilizan electrodos inertes, producirán reacciones con la alta alcalinidad de la solución y con el tiempo la corriente podría verse contaminada con otras sustancias. Los electrodos ideales son de tipo platino e iridio, sin embargo, por el costo y dificultad para conseguirlos se optó por acero inoxidable que, aunque son más resistentes que un acero normal o el hierro, no significa que no se degraden con el tiempo.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acuerdo de París:

El Acuerdo de París exige a todas las Partes que hagan todo lo que esté en su mano por medio de contribuciones determinadas a nivel nacional y que redoblen sus esfuerzos en los próximos años. Esto incluye la obligación de que todas las Partes informen periódicamente sobre sus emisiones y sobre sus esfuerzos de aplicación.

Biocombustibles:

Son aquellos combustibles que se obtienen a partir de la biomasa o de los desechos orgánicos.

Biomasa:

Esta materia orgánica, es heterogénea. Pueden ser desde desechos de agricultura (huesos de aceituna, cáscaras de frutos secos, restos de poda de vid, etc.) a restos de madera, como pellets o serrín.

Bunker:

Es un combustible que normalmente proviene de la primera etapa del proceso de refinación (destilación atmosférica), viscoso y con alto contenido energético, lo cual lo hace apto para ser usado en calderas, hornos y para las plantas de generación eléctrica.

Cambio Climático:

Es la variación de los patrones meteorológicos estables a lo largo de un período de tiempo extenso, que puede ir de unas décadas a millones de años. Suele estar acompañado de procesos de reajuste climático que a menudo implican fenómenos meteorológicos extremos, con un alto impacto en los modos de vida de flora, fauna y la humanidad.

Combustibles Fósiles:

Se llama combustibles fósiles a los hidrocarburos (petróleo y gas) y al carbón. Estos recursos se formaron a partir de materia orgánica proveniente de plantas, microorganismos, bacterias y algas, que mediante la fotosíntesis transformaron en energía química la energía electromagnética del sol.

Diesel:

Se obtiene de la destilación del petróleo entre los 200 y 380°C. Es un líquido denso, que tiene su origen en los gasóleos. El diésel es un combustible no renovable que se utiliza para la generación de electricidad, transporte y calefacción.

Dióxido de Carbono:

Anhídrido carbónico o CO₂, se hace referencia a un gas, cuyas moléculas se componen por un átomo de carbono y dos de oxígeno, unidos por enlaces dobles covalentes.

Efecto Invernadero:

Fenómeno atmosférico que se produce cuando la radiación térmica (calor) de la superficie de la Tierra, que comúnmente es emitida hacia el espacio, se encuentra en cambio retenida por los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera debido a la contaminación del aire. Esto ocasiona un incremento de la temperatura planetaria, ya que el calor no logra escapar, como en un invernadero.

Electrolizador:

Sistema físico cuya finalidad es electrolizar una sustancia y está compuesto esencialmente por un recipiente para la sustancia a electrolizar y dos electrodos que proporcionan la energía eléctrica.

Electrodos:

Es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo, un semiconductor, un electrolito, el vacío (en una válvula termoiónica), un gas (en una lámpara de neón), etc.

Energía Eólica:

Es aquella energía obtenida mediante el aprovechamiento de la fuerza del viento. Su nombre proviene del nombre del dios del viento, *Eolo*, de acuerdo a la mitología de la Grecia antigua.

Energía Geotérmica:

Es un tipo de energía más o menos renovable, de origen volcánico, es decir, que consiste en aprovechar el calor interno de la Tierra para extraer del subsuelo aguas a elevadas temperaturas, de la cual puede extraerse la energía calórica o que puede emplearse para generar electricidad.

Energía Hidroeléctrica:

Energía eléctrica a partir de la movilización de turbinas con la fuerza de las caídas de agua naturales o artificiales.

Energía Solar Fotovoltaica:

Energía eléctrica renovable resultante de recoger la radiación térmica y lumínica provenientes del Sol.

Energías Limpias:

Aquellas formas de obtención de energía que producen un mínimo o nulo impacto ecológico en el medio ambiente, durante sus procesos de extracción y generación. Es decir, se trata de energías ecológicas o eco-amigables.

Energías no Renovables:

que aprovechan recursos minerales y orgánicos cuya formación tomó miles de años, como el petróleo, el carbón mineral o el uranio. A pesar de ser muy potentes y eficaces, estos métodos tienen sus días contados, pues su materia prima no se genera a un ritmo lo suficientemente veloz.

Energías Renovables:

Aquellas que pueden emplearse sostenidamente en el tiempo sin riesgo (o con un riesgo mínimo) de que se agoten o extingan.

Gasolina:

Es una mezcla de hidrocarburos derivada del petróleo que se utiliza como combustible en motores de combustión interna con encendido a chispa convencional o por compresión, así como aplicaciones en estufas, lámparas, limpieza con solventes y otras más

Hidrógeno:

Primer elemento de la tabla periódica. En condiciones normales es un gas incoloro, inodoro e insípido, compuesto de moléculas diatómicas, H₂. El átomo de hidrógeno, símbolo H, consta de un núcleo de unidad de carga positiva y un solo electrón. Tiene número atómico 1 y peso atómico de 1.00797. Es uno de los

constituyentes principales del agua y de toda la materia orgánica, y está distribuido de manera amplia no sólo en la Tierra sino en todo el universo.

Protocolo de Kioto:

Presenta como objetivo global la reducción de un 5% en las emisiones respecto de 1990 (cubre los 6 principales GEI), focalizado mediante un compromiso de los 38 países industrializados incluidos en el *Anexo Uno* del Protocolo con objetivos jurídicamente vinculantes y calendarios de cumplimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Aleación Tubos. (2020). *tubos-acero-aleacion*. Obtenido de tubos-acero-aleacion: <https://www.tubos-acero-aleacion.com/acero-inoxidable-316-tuberia-tubos.html>
- Alibaba. (2019). *Alibaba.com*. Obtenido de Alibaba.com: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/800l-ss304-liquid-homogenizer-mixer-tank-for-food-62367508867.html?spm=a2700.7724857.0.0.21d24bdfUDB0eJ&s=p>
- Alibaba. (2020). *Alibaba.com*. Obtenido de Alibaba.com: https://www.alibaba.com/product-detail/alkaline-water-electrolyzer-hydrogen-generator-electrolyzer_62493989079.html?spm=a2700.details.deiletai6.3.2ff76a30ZH5HMn
- Alibaba. (2020). *Alibaba.com*. Obtenido de Alibaba.com: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/strength-brand-asme-ce-approved-propane-hydrogen-gas-fuel-tank-60804213682.html?spm=a2700.7724857.0.0.4bcd15612rsTr4>
- Asociación de Empresas de Energías Renovables. (2017). *appa*. Obtenido de <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-tipos-y-ventajas/tipos-de-fuentes-de-energia-renovable/>
- Asociación española del hidrógeno. (2019). *aeh2*. Obtenido de aeh2: http://www.aeh2.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=41&lang=en
- Basagoitia, J. (2011). *Política energética: obtención de hidrógeno mediante electrólisis del agua con energía solar. Una Aproximación teórica*. San Salvador, San Salvador, El Salvador: Universidad Tecnológica.
- Blank, L. (2006). *Ingeniería Económica*. México: Mc Graw Hill.
- Brenda Guzmán, C. E. (2011). *Producción de Hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica*. Salta, Argentina, Salta, Argentina: Universidad de Salta.
- Carbonell, M. (2008). *HogarSense*. Obtenido de <https://www.hogarsense.es/energia-solar/radiacion-solar-directa-e-indirecta>
- Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica*. México D.F: McGrawhill.
- Centro de estudios cervantinos. (2020). *Centro de estudios cervantinos*. Obtenido de <https://www.centroestudioscervantinos.es/energia-no-renovable/>
- CNE. (2019). *estadisticas.cne.gob*. Obtenido de <http://estadisticas.cne.gob.sv/>
- Direct Industry. (2020). *directindustry.es*. Obtenido de directindustry.es: <https://www.directindustry.es/prod/jp-sauer-sohn-maschinenbau-gmbh/product-5707-2304478.html>
- Direct Industry. (2020). *Direct Industry*. Obtenido de <https://www.directindustry.es/prod/steeltailor/product-35080-2289023.html>
- eaprende.com*. (13 de abril de 2009). Obtenido de <https://www.eaprende.com/blog/2009/04/13/historia-el-hidrogeno/>
- Ecointeligencia. (2015). *ecointeligencia*. Obtenido de ecointeligencia: <https://www.ecointeligencia.com/wp-content/uploads/2015/06/contaminacion-antropogenicas.jpg>
- Educ.ar. (2020). *Educ.ar*. Obtenido de <http://energiasdemipais.educ.ar/la-matriz-energetica-argentina-y-su-evolucion-en-las-ultimas-decadas/>
- EIA. (13 de octubre de 2020). *Energy Information Administration*. Obtenido de Gasoline and Diesel Fuel Update: <https://www.eia.gov/petroleum/gasdiesel/>
- ENF SOLAR. (2019). *ENF SOLAR- Empresas y Productos de la Industria de la Energía Solar*. Obtenido de ENF SOLAR: <https://es.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/30820>
- Ercros S.A. (2020). *Ercros S.A*. Obtenido de Ercros S.A: http://www.ercros.es/index.php?option=com_content&view=category&id=40&Itemid=1496&lang=es&limitstart=35
- Estévez, R. (23 de Junio de 2015). *Ecointeligencia*. Obtenido de <https://www.ecointeligencia.com/2015/06/protocolo-kioto/>

- Galdiano, M. (2010). *Aprovechamiento de energías renovables*. Málaga.
- GOVERN DE LAS ILLES BALEARS. (2020). *GOVERN DE LAS ILLES BALEARS*. Obtenido de http://www.caib.es/sites/canviclimatic2/e-s/que_es_el_cambio_climatico-7121/
- Hortal, M. A. (2012). *El Hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado*. Madrid, España: Ediciones Diaz de Santo, S.A.
- INFRASAL. (2020). *infrasal.com*. Obtenido de http://www.infrasal.com/gases/images/pdf/manual_de_seguridad_web.pdf
- Instituto Catalán de Energía. (2020). *icaen.gencat.cat*. Obtenido de icaen.gencat.cat: <http://icaen.gencat.cat/es/energia/renovables/geotermica/tipus/>
- Kraus, R. S. (2012). *PrQuest Ebook central*. Obtenido de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouessp/reader.action?docID=3204062&ppg=1>
- Linde, A. (2012). *Consejo de Seguridad "Manipulación del Hidrógeno"*. Madrid.
- Made in China. (2020). *es.made-in-china.com*. Obtenido de https://es.made-in-china.com/co_focussolar/product_Integrated-Heat-Pipe-Pressure-Solar-Water-Heater-300L_rhneunysg.html
- Mendoza, E. E. (2004). *Corrosión*. San Salvador.
- Moreno, G. (7 de 12 de 2018). *statista.com*. Obtenido de <https://es.statista.com/grafico/16345/paises-que-mas-petroleo-producen/>
- National Geographic. (5 de septiembre de 2010). *National Geographic*. Obtenido de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/efectos-del-calentamiento-global>
- Priego, A. P. (2009). *Aprovechamiento de Recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica, El caso de la producción de Hidrógeno*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Raffino, M. E. (3 de 12 de 2018). *concepto.de*. Obtenido de <https://concepto.de/energia-hidraulica/>
- Rayner-Canham, G. (2000). *Química Inorgánica Descriptiva*. México: Pearson Educación.
- Red Cultural del Banco de la Republica de Colombia. (2020). *Banrepcultural*. Obtenido de Banrepcultural: <https://enciclopedia.banrepcultural.org/index.php/Combustibles>
- Ruiz, G. (05 de febrero de 2020). *ERONOVABLE.COM*. Obtenido de <https://erenovable.com/como-funcionan-los-paneles-solares/>
- Ruiz, X. R. (2014). *Estudio sobre la aplicación del hidrógeno como combustible alternativo a bordo de buques*. Barcelona, Catalunya.
- Santos, E. M. (2017). *Reactor de cámara única para la generación de hidrógeno a partir de residuos orgánicos*. Madrid: Universidad Internacional Meléndez Pelayo.
- SIGET. (2010). *Super Intendencia general de electricidad y telecomunicaciones*. Obtenido de <https://www.siget.gob.sv/estadisticas-electricidad/?cp=1>
- SIGET. (2020). *Super Intendencia general de electricidad y telecomunicaciones*. Obtenido de <https://www.siget.gob.sv/tarifas-electricidad-ano-2020/>
- SOLARGIS. (2019). *Datos meteorológicos y software para invertir en energía solar*. Obtenido de <https://solargis.com/es>
- Soluciones Led. (2020). *soluciones-led.com*. Obtenido de [soluciones-led.com](https://www.soluciones-led.com/product/panel-solar-mono-400w-72-celdas/): <https://www.soluciones-led.com/product/panel-solar-mono-400w-72-celdas/>
- UES-FIA-EIQIA-AIN-115. (2019). Metodología de la investigación. En E. G. Ayala. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, Aprovechamiento Industrial de Recursos Naturales.
- United Nations for the Climate Change. (Octubre de 2018). *United Nations for the Climate Change*. Obtenido de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>
- Urbina, G. B. (2013). *Evaluación de proyectos*. México: Mc Graw Hill.
- Victron energy. (2019). *victron energy, blue power*. Obtenido de <https://www.victronenergy.com.es/upload/documents/Datasheet-BlueSolar-PWM-Light-Charge-Controllers-12-24V-ES.pdf>
- Viviana A. Venturino, M. V. (2011). Caracterización de electrolizadores. *Universidad Tecnológica Nacional*, 6.

ANEXO A

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD DE SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO
(Ercros S.A, 2020)

HIDRÓXIDO SÓDICO (DISOLUCIÓN)**1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA Y DE LA SOCIEDAD****1.1. IDENTIFICACION DE LA SUSTANCIA**

Nombre comercial:	HIDRÓXIDO SÓDICO LÍQUIDO SOSA CÁUSTICA (disolución 50%, 32%, 25%)
Nombre químico:	Hidróxido sódico (disolución)
Forma comercial:	Disolución acuosa 50%, 32%, 25%
Sinónimos:	Lejía de sosa, Sosa líquida, Sosa cáustica
Fórmula química:	NaOH
Peso molecular	40,01
Nº CAS:	1310-73-2
Nº EINECS (CE):	215-185-5
Nº CLASIFICACION CE:	011-002-00-6
Nº UN	1824

1.2. USOS DE LA SUSTANCIA

Manufacturas químicas.
Textiles sintéticos.
Papel y celulosas.
Jabón y detergentes.
Vidrios.
Neutralización.
Regeneración de resinas.
Purificación de aceites vegetales y minerales.
Refino de petróleo.
Pelado químico de frutas.
Aluminio.

1.3. IDENTIFICACION DE LA EMPRESA

ERCROS
Avda. Diagonal 595
08014 Barcelona
Tel: 934 393 009 Fax: 934 308 073

1.4. TELÉFONO DE EMERGENCIA

Fca de Flix:	Tel: 977 410 125	Fax: 977 412 000
Fca Palos:	Tel: 959 36 91 53	Fax: 959 369 19
Fca. Vilaseca:	Tel: 977 37 03 54	Fax: 977 370 407

Para el servicio de información Toxicológica, véase el punto 4.

2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

Composición del producto	Nº CAS	% p/p	Clasificación del peligro	Frases de riesgo
HIDRÓXIDO SODICO AGUA	1310-73-2 7732-18-5	49,0 min 51,0 máx	CORROSIVO(C)	R-35
HIDRÓXIDO SODICO AGUA	1310-73-2 7732-18-5	31 mín 69 máx	CORROSIVO(C)	R-35
HIDRÓXIDO SODICO AGUA	1310-73-2 7732-18-5	24,5 mín 75,5 máx	CORROSIVO(C)	R-35

3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

3.1 PELIGROS PARA LAS PERSONAS:

Corrosivo.

Tiene una acción corrosiva sobre la piel y ojos, produciendo quemaduras graves.

Por ingestión puede causar perforación intestinal.

3.2 PELIGROS PARA EL MEDIO AMBIENTE:

Corrosivo.

Alcalinización del terreno y efluentes.

Peligro para la fauna y flora acuática en altas concentraciones.

3.3 PELIGROS FÍSICO-QUÍMICOS:

Reacción muy exotérmica con ácidos fuertes.

El calor generado en contacto con el agua (calor de disolución) puede bastar para producir ignición de otros materiales combustibles.

La reacción con metales puede generar hidrógeno (gas inflamable entre el 4% y el 75% en volumen en aire).

4. PRIMEROS AUXILIOS

Servicio de Información Toxicológica

Teléfono 91.562.04.20

Cítese la referencia SIT.A 258/05

NECESIDAD DE ASISTENCIA MÉDICA

Inmediata

Clase de riesgo

Acciones a efectuar

CONTACTO CON LA PIEL

Lavar la zona afectada con abundante agua durante 15 minutos como mínimo, mientras se quita la ropa contaminada y el calzado. Acudir inmediatamente al médico

CONTACTO CON LOS OJOS

Lavarlos con abundante agua durante 30 minutos como mínimo. Acudir inmediatamente al médico.

INGESTIÓN

No provocar el vómito.

Si está consciente, dar a beber agua.

No dar de beber ni comer. Acudir inmediatamente al médico.

4. PRIMEROS AUXILIOS (CONTINUACIÓN)

INHALACIÓN

Retirar al afectado de la zona contaminada, al aire libre, abrigado, tendido y en reposo. Si no respira hacer respiración artificial. Si respira con dificultad, dar oxígeno. Acudir inmediatamente al médico.

MEDIDAS ESPECIALES EN EL LUGAR DE TRABAJO

Duchas y lavajos de seguridad.

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

AGENTES DE EXTINCIÓN ADECUADOS:

El producto no es inflamable. Utilizar agua pulverizada para refrigerar los recipientes expuestos al fuego.

AGENTES DE EXTINCIÓN QUE NO DEBEN USARSE:

Polvo de CO₂ (Nieve carbónica).

RIESGOS ESPECIALES QUE RESULTEN DE LA EXPOSICIÓN A LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN O GASES PRODUCIDOS:

Controlar las aguas del incendio, evitar que alcancen cauces de agua o alcantarillas.

El calor generado en contacto con el agua (calor de disolución) puede bastar para producir ignición de otros materiales combustibles

EQUIPO DE PROTECCIÓN ESPECIAL PARA EL PERSONAL DE LUCHA CONTRA-INCENDIOS:

Usar equipo de respiración autónomo para la protección de las vías respiratorias, así como ropa, guantes y calzado adecuados para la protección de la piel.

Situarse siempre de espaldas al viento.

6. MEDIDAS A TOMAR EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

MEDIDAS DE PRECAUCIÓN RELATIVAS A PERSONAS:

Restringir el acceso al área afectada.

Evitar el contacto con los ojos, la piel y las vías respiratorias. No actuar sin el equipo de protección adecuado (Ver sección nº 8).

MEDIDAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL:

Evitar que el producto llegue a las alcantarillas o aguas superficiales. Si es necesarios se pueden hacer diques de contención a base de material inerte y absorbente: tierra o arena. Si el producto llegase a un cauce natural de agua, avisar a las autoridades de Protección Civil.

MÉTODOS DE LIMPIEZA:

Absorber el derrame con arena, tierra o arcilla.

Trasladar los productos absorbentes a vertedero controlado o almacenamiento seguro para que sean tratados por un gestor de residuos autorizado.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

7.1 MANIPULACIÓN:

No fumar, ni comer, ni beber cuando se maneje el producto.

Antes de manipular el producto asegurarse de que el envase a utilizar está limpio, seco y es el adecuado.

Los envases deben estar bien cerrados y convenientemente etiquetados.

Precaución especial por si hubiese restos de productos como aluminio, zinc, estaño, productos ácidos o productos orgánicos.

Prevenir cualquier posibilidad de contacto del producto con la piel u ojos.

Utilizar siempre las prendas de protección recomendadas.

Las disoluciones prepararlas agregando sucesivamente pequeñas cantidades de agua, o viceversa, evitando el agua caliente y con precaución a las salpicaduras. Es recomendable la agitación o recirculación y, a ser posible, con refrigeración, evitando pasar de 10 °C por minuto y sin llegar a 90 °C.

7.2 ALMACENAMIENTO:

Material recomendado :

Acero al carbono revestido con pinturas epoxi, acero inoxidable, níquel.

Dotar a los depósitos de almacén de cubetos de recogida y canalizaciones antiderrames.

Material incompatible ;

No almacenar en: Aluminio, estaño, zinc y sus aleaciones (bronce, latón, etc.), cromo y plomo.

Condiciones de almacenamiento: Lugar fresco y ventilado, al abrigo de la humedad y alejados de ácidos, hidrocarburos halogenados, nitroparafinas, etc. El suelo será impermeable y antideslizante.

Tener suministro o fuente de agua en el local de almacenaje. Se dispondrán de duchas y lavajos de emergencia. Dotar a los depósitos de almacén de cubetos de recogida y canalizaciones antiderrames.

Rango/Límite de Temperatura y Humedad: Para temperatura mayor de 50°C deberán usarse aceros inoxidables y níquel. Prever la posibilidad de solidificación a temperaturas inferiores a 15°C (calentadores, calorifugado).

Condiciones especiales: Evitar humedad y aireación del producto. Se carbonata en contacto con aire y humedad.

Normas legales de aplicación: RD-379/2001.(ITC-MIE APQ-6) Reglamento de almacenamiento de productos químicos.

RD-363/1995 Clasificación y envasado de sustancias peligrosas.

USOS ESPECÍFICOS:

En las diferentes aplicaciones del producto, deberá evitarse el contacto directo incontrolado con otros productos como ácidos, metales, productos orgánicos, etc.

8.0 CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

8.1 VALORES LÍMITES DE LA EXPOSICIÓN:

VLA-ED: ---- VLA-EC: 2 mg/m³ (INSHT 2006).

TLV-TWA: --- TLV-STEL: 2 mg/m³ (ACGIH 2005).

8.2 Control de la exposición:

8.2.1. Controles de la exposición profesional:

8.2.1.1 Protección respiratoria:

Caso de emisión de aerosoles de hidróxido sódico utilizar máscara con filtro para partículas (EN 143 P3).

8.2.1.2 Protección manos:

Guantes para riesgos químicos.(EN 374)

8.2.1.3 Protección ojos:

Gafas de montura integral o pantalla facial de protección.(EN 166). La máscara completa de protección respiratoria (EN 136) ofrece igualmente protección total para los ojos.

8.2.1.4 Protección cutánea:

Traje tipo antiácido o mandil de plástico (EN 340)

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL (CONTINUACIÓN)

8.2.2. Controles de la exposición del medio ambiente:

Evitar que penetre en el alcantarillado y/o aguas superficiales.

Sistema de medida: pH, volumetría ácido-base.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

9.1 INFORMACIÓN GENERAL

Aspecto: Incoloro, transparente, viscoso.
Olor: Inodoro.
Estado físico: Líquido.

9.2 INFORMACIÓN EN RELACIÓN CON LA SALUD, SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE

pH (solución 100 g/l H₂O): 14
Punto/intervalo de ebullición(°C): 143 (50%); 116(30%)
Punto de inflamación: N.A
Inflamabilidad: N.A
Propiedades explosivas: N.A
Propiedades comburentes: N.A
Presión de vapor: 1(739°C)
Densidad relativa(H₂O=1), 20°C 1,52(50%); 1,35(32%); 1,27(25%)
Solubilidad en agua (g/100g): 109(20°C)
Coefficiente de reparto n-octanol/agua: N.D.D
Viscosidad:
50% 78 cp (20°C) 15 cp(50°C)
30% 13 cp (20°C) 4,2 cp(50°C)
20% 4,2 cp (20°C) 1,8 cp(50°C)

9.3 OTROS DATOS

Temperatura de cristalización : 12°C(50%); +1(30%); -20(25%); -34(20%)

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estable:

Inestable:

10.1 CONDICIONES A EVITAR:

La disolución acuosa y la neutralización, deben hacerse con precaución para evitar ebullición y salpicaduras, al ser fuertemente exotérmicas.

10.2. MATERIAS A EVITAR:

Reacciona con aluminio, estaño, zinc y sus aleaciones, cobre, plomo, etc. desprendiendo hidrógeno.

Reacción muy exotérmica con ácidos fuertes y gran número de productos orgánicos.

Reacciona peligrosamente con ácido acético, aldehído acético, cloruro de alilo, trifluoruro de cloro, cloroformo, alcohol metílico, cloronitrotolueno, ácido clorosulfónico, glioxal, cianhidrina, ácido hidroclicó, ácido hidrofúrico, hidroquinona, ácido nítrico, ácido sulfúrico y oleum, nitropropano, fósforo, propiolactona, pentóxido de fósforo, tetraclorobenceno, tetrahidrofurano, acroleína, acrilonitrilo, etc.

La sosa con el nitrometano y las nitroparafinas forman sales que explotan al choque..

10.3. PRODUCTOS DE DESCOMPOSICIÓN PELIGROSOS:

Si se descompone se producen gases tóxicos de óxido de sodio

11. INFORMACIONES TOXICOLÓGICAS

11.1 TOXICIDAD AGUDA:

Contacto con la piel	Quemaduras intensas y úlceras penetrantes en la piel.
Contacto con los ojos	Quemaduras en los ojos. Puede causar ulceración de la conjuntiva y la córnea.
Ingestión	Quemaduras en boca, esófago, puede causar perforación intestinal. Toxicidad Oral-Conejo LD ₅₀ 500 mg/kg (Producto 100%)
Inhalación	Irritación de vías respiratorias.

11.2 TOXICIDAD CRÓNICA

No clasificado como carcinógeno por IARC, OSHA o NTP.
No hay indicios de potencial mutagénico, ni teratogénico.

12. INFORMACIONES ECOLÓGICAS

12.1. Ecotoxicidad:

El peligro del producto en el medio ambiente está causado por el ión hidroxilo (efecto pH). Por este motivo el efecto en los organismos depende de la capacidad tampón del ecosistema acuático o terrestre. La elevada solubilidad en agua y la baja presión de vapor indican que el producto se encontrará predominantemente en el medio acuático.

Los efectos tóxicos en organismos acuáticos se deben básicamente a una variación de pH del medio (valores de LC50 entre 33 y 189 mg/l)

Toxicidad aguda en peces:

- ◆ Especie: *Gambusia affinis* (agua dulce)
Tiempo de exposición: 96h; LC₅₀: 125 mg/l

Toxicidad aguda en invertebrados acuáticos:

- ◆ Especie: *Ceriodaphnia*
Tiempo de exposición: 48h; LC₅₀: 40 mg/l

Toxicidad aguda en Algas:

Datos no disponibles

12.2. Movilidad. (Agua/Suelo):

Gran solubilidad en el agua y movilidad.

12.3. Persistencia y degradabilidad:

No aplicable

12.4. Potencial de bioacumulación:

No se espera bioacumulación.

13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN

Eliminación del producto, de los envases usados y de residuos

Absorber el residuo con arena, tierra y arcilla.

Los absorbentes contaminados se tratarán por un gestor autorizado, así como los envases usados y residuos.

El producto se puede neutralizar con ácido clorhídrico muy diluido, añadiéndolo muy lentamente y siempre que lo haga personal especializado y con las prendas de protección adecuadas.

Consulte las regulaciones vigentes de la Comunidad Europea, Estatales y Locales, relativas a la eliminación de este material y los recipientes vacíos del mismo.

14. INFORMACIONES RELATIVAS AL TRANSPORTE

Transporte por carretera ADR 2005:

Nombre	Hidróxido sódico en solución
Nº UN	1824
Clase	8
Etiqueta	8
Grupo de embalaje:	II
Paneles:	80 – 1824

Transporte por ferrocarril (RID 2005)

Nombre	Hidróxido sódico en solución
Nº UN	1824
Clase	8
Etiqueta	8
Grupo de embalaje:	II
Paneles:	80 – 1824

Transporte por barco (IMDG)

(Enm. 32-04)

Nombre	Hidróxido sódico en solución
Nº UN	1824
Clase	8
Etiqueta	8
Grupo de embalaje:	II
FEm:	F-A, S-B

15. INFORMACIONES REGLAMENTARIAS

Clasificación de peligrosidad del producto

Corrosivo

Símbolo de peligrosidad del producto:

C (Corrosivo)



16. OTRAS INFORMACIONES

Frases R y S:

R 35	Provoca quemaduras graves.
S-1/2	Consérvese bajo llave y manténgase fuera del alcance de los niños.
S- 26	En caso de contacto con los ojos, lávense inmediatamente con abundante agua y acúdase a un medico.
S- 37/39	Úsense guantes adecuados y protección para los ojos / cara.
S- 45	En caso de accidente o malestar acúdase inmediatamente al médico (si es posible muéstresele la etiqueta)

La Ficha de Datos de Seguridad de este producto ha sido modificada en su totalidad.

La información de esta Ficha se facilita también a los efectos previstos en el Artículo 41(Obligaciones de los fabricantes, importadores y suministradores) de la Ley 31 / 1995 de 8 de Noviembre B.O.E. 10-11-95, sobre Prevención de Riesgos Laborales. Directiva 89 / 391 /CEE.

Estas hojas están confeccionadas según la Directiva 2001/58/CE DOCE 07-08-2001 que modifica la Directiva 91/155/CEE y aplica el artículo 14 de la Directiva 1999/45/CE y el artículo 27 de la Directiva 67/548/CEE. adaptación: Orden de 5 de Octubre de 2000 sobre modificación del Reglamento de sustancias nuevas, clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas, aprobado por R.D. 363/95. Artículo 23 RD 363/95, RD 99/2003 de 24 de Enero de 2003 (BOE 4 de Febrero de 2003) en el que se definen y fijan las modalidades del sistema de información específica respecto a las sustancias y preparados peligrosos (fichas de datos de seguridad) y RD 255/2003 de 28 de Febrero por el que se aprueba el Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos.

Fuentes de información en la elaboración de esta Hoja de Seguridad:

- HANDBOOK OF REACTIVE CHEMICALS HAZARDS. BRETHERIC 4ª Ed. 1990
- DANGEROUS PROPERTIES INDUSTRIAL MATERIALS (TENTH EDITION) SAX
- HAZARDOUS CHEMICALS DATA BOOK (2nd EDITION) G.WEIS.
- LIMITES DE EXPOSICIÓN PROFESIONALES **INSHT** (2006) / **ACGIH** (2005).
- IARC (International Agency for Research on Cancer).
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health).
- NTP (National Toxicology Program).
- ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienist).
- OSHA (Occupational Health and Safety Assessment)
- INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo).
- SYNDICAT DES HALOGÉNES ET DÉRIVÉS
- EUROCHLOR
- BANCO DE DATOS IUCLID
- NORMA ESPAÑOLA UNE-EN 896

Abreviaturas utilizadas

N.A. = no aplicable N.D.D = no hay datos disponibles < MENOR QUE > MAYOR QUE

VLA: Valor Límite Ambiental, **ED**: Exposición diaria, **EC**: Exposición de corta duración.

TLV: Threshold Limit Value (Valor límite umbral), **TWA**: Time Weighted Average (Media ponderada en el tiempo), **STEL**: Short Term Exposure Limit (Límite de exposición de corta duración), **C**: Ceiling (Techo).

LC₅₀: Lethal Concentration, 50 percent; EC₅₀: Effect Concentration, 50 percent

Cualquier producto químico puede ser manejado en condiciones seguras, si se conocen sus propiedades físicas y químicas y se usan las medidas y prendas de seguridad adecuadas.

Los datos contenidos en este prospecto son una guía para el usuario y están basados en informaciones bibliográficas y experiencias propias, intentando reflejar el estado actual de la técnica pero que, de ningún modo, pueden comprometer nuestra responsabilidad.

Dicha información no podrá ser usada en sustitución de procesos patentados.

Los usuarios deberán cumplir con las disposiciones legales y reglamentos en vigor y, en especial, los referentes a Seguridad e Higiene, Almacenamiento y Transporte de Mercancías Peligrosas.

Recomendamos a nuestros clientes que realicen las correspondientes pruebas antes del uso del producto en nuevos campos no suficientemente experimentados.

ERCROS

Domicilio Social:

Avda Diagonal 595
08014 Barcelona
Tel:934 393 009 –
Fax:934 874 058

Fábrica:

Flix (Tarragona)
Afueras s/n
43750 Flix (Tarragona)
Teléf.: 977 410 125
Fax: 977 412 000

Fábrica:

Palos de la Frontera (HUELVA)
Zona Nuevo Puerto, s/n
21810 - Palos de la Frontera (Huelva)
Teléf.: 959 36 91 53
Fax: 959 36 91 93

Fábrica:

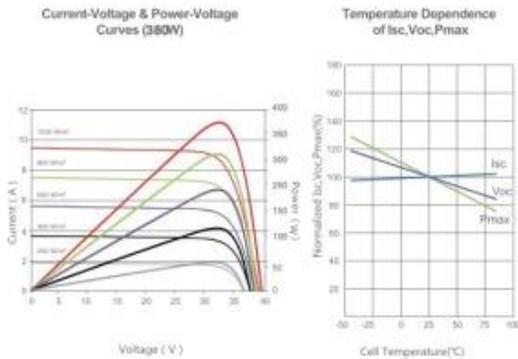
Vilaseca (TARRAGONA)
Autovía Tarragona-Salou
C31B, Km 6
43480 Vila-Seca (Tarragona)
Teléf: 977 37 03 54
Fax: 977 37 04 07

ANEXO B

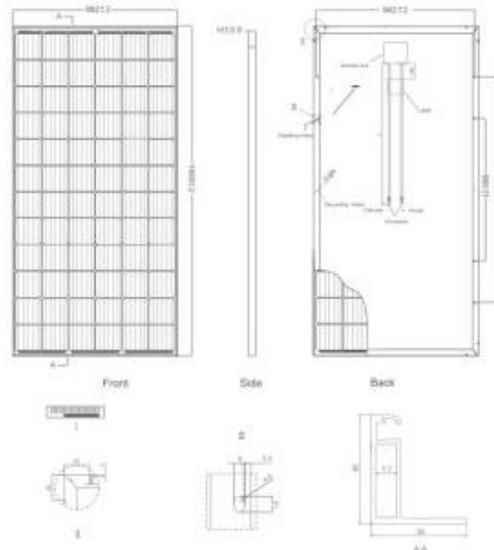
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EQUIPO DE ESCALAMIENTO INDUSTRIAL

I. Especificaciones técnicas Panel Solar propuesto (Soluciones Led, 2020)

Electrical Performance & Temperature Dependence



Engineering Drawings



Mechanical Characteristics

Cell Type	Mono-crystalline PERC	156×156mm (6 inch)
No. of cells	72 (6×12)	
Dimensions	1956×992×40mm (77.01×39.05×1.57 inch)	
Weight	22.5 kg (49.6 lbs.)	
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass	
Frame	Anodized Aluminium Alloy	
Junction Box	IP67 Rated	
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² , Length 900mm or Customized Length	

Packaging Configuration

(Two pallets =One stack)
26pcs/pallet , 52pcs/stack, 624 pcs/40'HQ Container

SPECIFICATIONS

Module Type	YS350M-72	YS360M-72	YS370M-72	YS380M-72	YS390M-72	YS400M-72	YS410M-72
Maximum Power (Pmax)	350W	360W	370W	380W	390W	400W	410W
Maximum Power Voltage (Vmp)	39.1V	39.5V	39.9V	40.3V	40.7V	41.1V	41.5V
Maximum Power Current (Imp)	8.94A	9.12A	9.27A	9.43A	9.58A	9.73A	9.87A
Open-circuit Voltage (Voc)	47.5V	48.0V	48.4V	48.8V	49.2V	49.7V	50.2V
Short-circuit Current (Isc)	9.38A	9.51A	9.64A	9.77A	9.82A	9.97A	10.1A
Module Efficiency STC (%)	18.04%	18.55%	19.07%	19.59%	20.10%	20.61%	21.13%
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C						
Maximum system voltage	1000VDC or 1500VDC						
Maximum series fuse rating	20A						
Power tolerance	0~+3%						
Temperature coefficients of Pmax	-0.39%/°C						
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C						
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C						
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C						

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, AM=1.5

NOCT: Irradiance 800W/m², Ambient Temperature 20°C, AM=1.5, Wind Speed 1m/s

* Power measurement tolerance: ± 3%

The company reserves the final right for explanation on any of the information presented hereby. Yangze Solar.

II. Especificaciones técnicas calentador solar. (Made in China, 2020)

WB-HP-SS/SP-150L-15

WB-HP-SS/SP-180L-18

WB-HP-SS/SP-200L-20

WB-HP-SS/SP-240L-24

WB-HP-SS/SP-300L-30



Part Code	Evacuated Tube			Water Tank			Loading Qty (sets)		
	Size	No. (pcs)	Aperture Area (m ²)	Dimension (mm)	Insulation (mm)	Capacity (L)	20GP	40GP	40HQ
WB-HP-SP-150L-15	Φ58 X 1800	15	1.42	Φ460 X 1330	50	150	50	105	120
WB-HP-SP-200L-20	Φ58 X 1800	20	1.89	Φ460 X 1705	50	200	38	82	91
WB-HP-SP-240L-24	Φ58 X 1800	24	2.27	Φ460 X 2005	50	240	32	68	78
WB-HP-SP-300L-30	Φ58 X 1800	30	2.84	Φ460 X 2455	50	300	26	55	64

Información Básica

No. de Modelo.	WB-HP-SP-300L-30	Max. Capacidad	> 200L
Estructura	Tipo de Compacto	Presión	A Presión
Material del Interior	Acero Inoxidable	Componentes coleccionista	Tubo Vacio de Cristal
Composición	Soporte	Certificación	ISO9001

Información Adicional

Marca	Wombat	Embalaje	Wooden Case, Pallet
Estándar	150L, 200L, 300L	Origen	Jiangsu
Código del HS	84149010	Capacidad de Producción	11000sets/Year

III. Especificaciones técnicas y de venta electrolizador Alibaba (2020).



alkaline water electrolyzer hydrogen generator electrolyzer

FOB Reference Price: [Get Latest Price](#)

\$20,000.00 - \$500,000.00 / Set | 1 Set/Sets (Min. Order)

Model Number:

Warranty: **1 Year** for machinery warranty

Lead Time:	Quantity(Sets)	1 - 1	>1
	Est. Time(days)	60	Negotiable

Customization: Customized logo (Min. Order: 1 Sets)
Customized packaging (Min. Order: 1 Sets) [More](#) ∨

Structure Characteristics

- 1, The hydrogen production capacity of a single device of this hydrogen production system is 5Nm³ / h-10Nm³ / h. It is a hydrogen station layout.
- 2, The hydrogen production system integrates an electrolytic cell, a separator frame and a hydrogen drying device, and has the characteristics of high integration, high automation, small size, small footprint, and environmental protection requirements.
- 3, The core cell of the device uses a new process to increase the current density and reduce the volume and weight of the cell.
- 4, Combining the hydrogen production system and the drying system into one, which is more convenient for users to install and operate, and saves floor space; it can realize full-automatic control, can be connected to users' DCS, and reaches an unattended level.
- 5, The hydrogen purity of the product reaches 99.99%, the dew point reaches -60°C, and the oxygen purity reaches 99.2%.

Overview

Quick Details

Applicable Industri... Manufacturing Plant, Farms, Cutting industry
 Showroom Location: India, Thailand, South Korea
 Place of Origin: China
 Production Rate: 5-15Nm³/h
 Dimension(L*W*H): Actual size
 Warranty: 1 Year
 Key Selling Points: Easy to Operate
 Capacity: 5-15Nm³/h
 Pressure: 1.5 ~3.2Mpa
 H2 alkali content: < 1mg/m³
 application: hydrogen generator electrolyzer

Local Service Locat... Italy, India, Russia, Japan, South Korea
 Condition: New
 Usage: Hydrogen
 Weight: Actual weight
 Certification: As customer's request
 After-sales Service ... Video technical support, Online support, Field installation, co...
 raw material: water
 Purity: > 99.8%
 Operating temperat... around 85°C
 H2 water content: <4 g/m³
 keyword: alkaline water electrolyzer

H2 capacity	O2 capacity	H2 purity	O2 purity	Operating load	Working pressure	H2 water content	H2 alkali content	working temp.	cooling water	DC power	Dimensions	Weight	alkali concentration	alkali circulation
5	2.5	≥99.8%	≥98.5%	50%~100%	1.5~3.2	≤4	≤1	85±5	1.3	≤4.5	940*850*780	1350	30% KOH0.3~0.35	
10	5	≥99.8%	≥98.5%	50%~100%	1.5~3.2	≤4	≤1	85±5	1.9	≤4.5	1355*850*780	1750	30% KOH0.5~0.6	
15	7.5	≥99.8%	≥98.5%	50%~100%	1.5~3.2	≤4	≤1	85±5	2.6	≤4.5	1730*850*780	2250	30% KOH0.7~0.8	

IV. Especificaciones técnicas controlador de carga Direct Industry. (2020)



CARACTERÍSTICAS

Aplicaciones	para batería
Sector	para aplicaciones solares
Otras características	MPPT
Tensión	12 V, 24 V, 48 V
Capacidad	50 A

Fabricante profesional MPPT 30A-50A 12V/24V/48V auto Controlador solar portátil Panel solar Regulador de la batería Controlador de carga Pantalla LCD

Introducción:

El controlador solar SOLARVERTECH MPPT (también conocido como regulador de carga solar inteligente, regulador de carga solar, regulador fotovoltaico) puede regular de forma inteligente el voltaje de trabajo de los paneles solares, permitiendo que los paneles solares trabajen siempre en el punto de máxima potencia de la curva V-A. Comparado con el controlador solar ordinario, este controlador MPPT puede aumentar la eficiencia de los módulos PV en un 10%-30%.

Nuestros controladores solares MPPT 10A--80A incluyen series de 12V, 24V y 48V.

Características

- Marca: SOLARVERTECH /OEM
- 12V/24V/48V auto. trabajo.
- La carga en varias etapas optimiza el rendimiento de la batería.
- Eficiencia del MPPT >99,7%, peak eficiencia de conversión 98,5%.
- Entrada de voltaje PV solar de amplio rango 17-120V DC.
- Compatibles con baterías de GEL, AGM, inundadas, de plomo ácido selladas y de litio.
- Pantalla LCD, información del sistema intuitiva.
- Protección completa.
- Excelente diseño de refrigeración del disipador de calor, funcionamiento silencioso.

Detalles rápidos

- Controlador del cargador MPPT48-50A
- Tiempo de trabajo (h):1-24H
- Máxima potencia fotovoltaica: De acuerdo con la carga
- Voltaje máximo PV:48V
- Certificado: CE RoHS ISO9001
- Garantía: 2 años,
- Pantalla: Pantalla LCD
- Certificación: CE RoHS ISO9001
- Tipo de batería:Plomo Acido
- Material: Aluminio
- Corriente nominal: 50A
- Eficiencia:97.5%
- Protección: Cortocircuito
- Voltaje del sistema: 12V/24V/48V

V. Especificaciones técnicas tubos de acero inoxidable 316 (Aleación Tubos, 2020).

Tubo y tubo de acero inoxidable TP316 Composición química

Acero	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Mo (%)	Cr (%)	Ni (%)	N (%)
316	.08 máx	2 máx	1 máx	.045 máx	.03 min	2.00 - 3.00	16.00 - 18.00	11.00 - 14.00	67.845 min

Propiedades mecánicas de tuberías y tubos de acero TP316

Densidad	Alcance de fusión, °C	Elongación%	Resistencia a la tracción (Mpa)	Fuerza de producción (Mpa)
8	1400 °C	35	515	205

Norma equivalente de tuberías y tubos de acero inoxidable 316

Estándar	SS 316
UNS	S31600
WERKSTOFF NR.	1.4401 / 1.4436
AFNOR	Z7CND17-11-02
JIS	SUS 316
GOST	-
BS	316S31 / 316S33
EN	X5CrNiMo17-12-2 / X3CrNiMo17-13-3

Especificación de tuberías y tubos de acero inoxidable 316

Normas: ASTM A312, A213, A249, A269, A358, A409, A554

Diámetro exterior: 6.00 mm OD hasta 914.4 mm OD, Tamaños hasta 24 "NB

Rango de espesor: 0,3 mm - 50 mm, SCH 5, SCH 10, SCH 40, SCH 80, SCH 80S, SCH 160, SCH XXS, SCH XS

Forma: Tubos redondos / tubos SS 316, Tubos redondos / tubos SS 316, Tubos redondos / tubos SS 316, Tubos redondos SS 316, Forma SS 316 "U", Bobinas secas Pan SS 316, Tubos hidráulicos SS 316

Longitud: sola aleatoria, doble aleatoria y longitud requerida

End : extremo liso, extremo biselado, tenso

ACABADO: Sin costura, soldada, cepillada, en escabeche, solución recocida y en escabeche hasta O.D. 219.1 mm, grano pulido 120 - 600, pulido espejo