

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**Diseño de un sistema automatizado de extracción de hidrógeno mediante pulsos eléctricos
para la alimentación de una celda de combustible**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

Ing. Juan Manuel Rojas Castellanos

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Pastor Rodríguez Jarquín

CODIRECTOR DE TESIS

M.C. Blanca Estela Gonzáles Sánchez

Fecha: marzo 2020



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 22/02/2021

Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación

Asunto: Autorización de Impresión

OPCION: I

C. JUAN MANUEL ROJAS CASTELLANOS

Candidato a Grado de Maestro en:

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

" DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE PULSOS ELÉCTRICOS PARA LA ALIMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE".

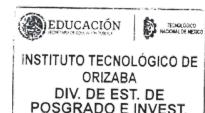
Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

Dr. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Avenida Oriente 9 No. 852
Col. Emiliano Zapata, C.P. 94320
Orizaba, Veracruz, México.
Teléfono: 272-110-53-60
Email: cyd_orizaba@tecnm.mx
www.orizaba.tecnm.mx





“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Orizaba, Veracruz, **Diciembre 15, de 2020.**

Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.
JUAN MANUEL ROJAS CASTELLANOS

La cual lleva el título de:
**DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE PULSOS
ELÉCTRICOS PARA LA ALIMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE**

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN

FIRMA

SECRETARIO: DR. IGNACIO HERRERA AGUILAR

FIRMA

VOCAL: DR. ALBINO MARTÍNEZ SIBAJA

FIRMA

VOCAL SUP.: DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ

FIRMA

FTI-TI-013



Agradecimientos

Me gustaría empezar diciendo que las siguientes palabras expresan solo una mínima parte de lo que realmente tendría que agradecer y que a cada una de las personas que a continuación enumero son a las que considero las más importantes para que yo pudiera realizar el siguiente proyecto.

Mi madre, Magdalena Castellanos Carrasco y mi padre, Octavio Rojas Jiménez, que no solo han sido los pilares más importantes para mí, también son las personas que a pesar de cualquier circunstancia confiaron y me apoyaron, dándome la oportunidad de estudiar un posgrado aun entendiendo que esto significara un gasto extra para ellos.

Mi pareja y madre de mi hija, Gabriela Cabrera Betanzos, que, a pesar de las dificultades de estar lejos y distanciarnos por tiempos muy prolongados, me alentaba para concluir el proyecto mientras cuidaba a la persona que hasta hoy es la mas importante en mi vida.

Mi hija, Danna Lilian Roja Cabrera, que desconociendo por su edad al día de hoy cuán importante es que este en mi vida y las fuerzas que me daba para poder terminar este proyecto, me hacía valorar cada instante que estaba lejos de ella y así esforzarme para concluir de la mejor manera el posgrado.

Mis compañeros, Osiel, Lizeth y Daniel, que fueron un gran apoyo para cuando me sentía solo o estresado, dando por sentado que no solo fueron mis compañeros, también se convirtieron en mis amigos.

A Daniel Iván Arias Guevara y a su familia, por abrirme las puertas de su casa, dándome la oportunidad de trabajar ahí para realizar el prototipo de mi proyecto de tesis. Y un agradecimiento especial a su madre Columba Guevara, quien durante todo este tiempo siempre me brindo un plato de comida y asilo si es que tenía que quedarme para seguir trabajando, donde a pesar de las molestias que yo sentía le daba, siempre me hizo sentir como parte de su familia.

Al cuerpo de docentes del programa, Blanca Estela Gonzales Sánchez, Oscar Osvaldo Sandoval González, Ignacio Herrera Aguilar, José de Jesús Agustín Flores Cuautle, Fernando Vera Monterrosas, Miguel Ontiveros González, Mario Alberto García Martínez, quienes durante mi estancia en el posgrado me enseñaron que siempre podemos aprender cosas nuevas.

A mi asesor José Pastor Rodríguez Jarquin, quien fue mi mentor y me tuvo mucha paciencia durante este proceso, que a pesar de que algunas veces me encontraba cabizbajo, siempre tenía palabras de aliento que me ayudaban a sentirme mejor, ayudándome mucho en la realización de mi proyecto y a encontrar apoyo para superar situaciones personales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que aportaron para mi preparación académica y la realización de mi trabajo de investigación

CONTENIDO

CONTENIDO	2
Índice de Figuras.....	5
Índice de Tablas	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	10
1.1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>10</i>
1.2. <i>PROBLEMÁTICA</i>	<i>11</i>
1.3. <i>JUSTIFICACIÓN</i>	<i>17</i>
1.4. <i>HIPÓTESIS</i>	<i>18</i>
1.5. <i>OBJETIVO GENERAL</i>	<i>18</i>
1.6. <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	<i>18</i>
1.7. <i>METODOLOGÍA</i>	<i>20</i>
1.8. <i>ESTADO DEL ARTE</i>	<i>21</i>
1.9. <i>ESTADO DEL CAMPO</i>	<i>22</i>
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	24
2.1 <i>RESUMEN DEL CAPITULO</i>	<i>24</i>
2.2 <i>DEFINICIÓN DE ENERGÍA</i>	<i>24</i>
2.3 <i>CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE ENERGÍA</i>	<i>26</i>
2.4 <i>ENERGÍA SOLAR</i>	<i>27</i>
2.4.1 <i>EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO</i>	<i>29</i>
2.4.2 <i>EFFECTO FOTOELÉCTRICO</i>	<i>33</i>
2.5 <i>CELDA SOLAR</i>	<i>33</i>
2.5.1 <i>EFFECTOS DE LA RADIACIÓN Y LA TEMPERATURA EN UNA CELDA SOLAR</i>	<i>35</i>
2.5.2 <i>EFICIENCIA DE LA CELDA SOLAR</i>	<i>35</i>
2.5.3 <i>TIPOS DE CELDAS SOLARES</i>	<i>36</i>
2.5.4 <i>CONEXIÓN DE CELDAS SOLARES</i>	<i>38</i>
2.6 <i>HIDRÓGENO</i>	<i>39</i>
2.6.1 <i>CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓGENO</i>	<i>39</i>

2.7 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	44
2.7.1 REFORMADO A VAPOR DE AGUA	47
2.7.2 GASIFICACIÓN	48
2.7.3 ELECTRÓLISIS.....	49
2.7.4 ENERGÍA TÉRMICA	56
2.7.5 ELECTRÓLISIS A ALTA TEMPERATURA	56
2.8 LA ELECTROCOAGULACIÓN.....	56
2.9 REACCIONES DE NEUTRALIZACION	57
2.10 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO.....	59
2.11 CELDAS DE COMBUSTIBLE	59
2.12 ELECTROQUÍMICA.....	60
2.13 CONDUCTIVIDAD DEL AGUA.....	61
2.13.1 CÓMO MEDIR LA CONDUCTIVIDAD.....	62
2.13.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	63
2.13.3 MEDIDAS DE CONDUCTIVIDAD	63
2.14 ELECTOLISIS (REACCIONES QUÍMICAS).....	64
2.15 LEY DE FARADAY.....	65
2.16 ECUACIÓN DE ESTADO	67
2.17 DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE MÍNIMO PARA INICIAR LA ELECTRÓLISIS	67
2.18 MINIMO DE VOLTAJE PARA EFECTUAR LA ELECTRÓLISIS.....	68
2.19 EFICACIA DE POTENCIAL.....	69
2.20 EFICACIA DE CORRIENTE.....	69
2.21 ESTABILIDAD QUÍMICA.....	70
2.22 SENSOR DE CORRIENTE ACS712 (30A).....	70
2.23 TERMOPAR TIPO K Y MODULO MAX6675.....	71
2.24 SENSOR DE FLUJO D6F-A3 OMRON	72
2.25 MEDIDOR TDS DE MANO.....	72
2.26 SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO.....	73
2.27 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	74
2.28 TIPOS DE CONTROLADORES.....	75
2.28.1 CONTROL PROPORCIONAL (P).....	75
2.28.2 CONTROL INTEGRAL.....	76
2.28.3 CONTROL PROPORCIONAL - INTEGRAL (PI).....	76

CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL	78
3.1 RESUMEN DEL CAPITULO.....	78
3.2 CONSTRUCCIÓN.....	78
3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA GENERADOR DE HIDRÓGENO.	78
3.2.2 PARÁMETROS DEL ELECTROLIZADOR.....	79
3.2.3 PROTOTIPOS DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	79
3.2.4 MATERIALES	82
3.2.5 CONTRUCCIÓN DEL ELECTROLIZADOR (DISEÑO 1).....	89
3.2.6 MANUFACTURA DEL ELECTROLIZADOR (DISEÑO 2).....	94
3.2.7 PRODUCCIÓN TEÓRICA DE GASES EN EL ELECTROLIZADOR	95
3.3 DISEÑO DE CONTROL DE CORRIENTE	96
3.3.1 MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSOS (PWM)	96
3.3.2 CÁLCULO DEL CIRCUITO DE CONTROL	97
3.3.3 DISEÑO DEL PCB DEL CIRCUITO DE CONTROL	100
3.3.4 DISEÑO DEL CONTROLADOR PI	101
3.4 MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD EN EL AGUA A UTILIZAR.....	107
3.4.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA A UTILIZAR.....	107
3.4.2 METODOLOGÍA EN LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN LAS MUESTRAS DE AGUA	108
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	111
4.1 RESUMEN	111
4.2 EMBALAJE DEL SISTEMA DE CONTROL DE CORRIENTE	112
4.3 PROTOTIPOS ARMADOS PARA EXPERIMENTACIÓN.....	114
4.4 DATOS EXPERIMENTALES	115
4.4 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	119
4.5 PUREZA DEL GAS.....	122
CONCLUSIONES.....	125
Bibliografía	127

Índice de Figuras

FIGURA 1. CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA 2017. FUENTE: WORLD ENERGY BALANCES: OVERVIEW (2017 EDITION).....	12
FIGURA 2. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y EL CONSUMO NACIONAL DE ENERGÍA (FUENTE: SISTEMA DE INFORMACIÓN ENERGÉTICA, SENER.)	13
FIGURA 3. ÍNDICE DE INDEPENDENCIA ENERGÉTICA (FUENTE: SISTEMA DE INFORMACIÓN ENERGÉTICA, SENER.)	13
FIGURA 4. MEZCLA DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD DE LA OCDE 2016 (FUENTE: WORLD ENERGY BALANCES 2017)	14
FIGURA 5. OCDE CONSUMO FINAL TOTAL POR SECTOR (FUENTE: WORLD ENERGY BALANCES 2017)	14
FIGURA 6. ESTRUCTURA DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PRIMARIA, 2016 (PETAJOULES)	15
FIGURA 7. CONSUMO ENERGÉTICO EN MÉXICO	16
FIGURA 8. TOTAL, FINAL CONSUMIDO POR SECTORES	16
FIGURA 9. FORMAS DE ENERGÍA.	27
FIGURA 10. DISTANCIA TIERRA-SOL.....	28
FIGURA 11. LONGITUD Y OTRAS PROPIEDADES DE ONDA.	29
FIGURA 12. LONGITUD DE ONDA.....	29
FIGURA 13. COMPONENTES DE LA RADIACIÓN SOLAR.	31
FIGURA 14. LONGITUD DE LA TRAYECTORIA DE LA LUZ SOLAR AL ATRAVESAR LA MASA DE AIRE DE LA ATMOSFERA.	32
FIGURA 15. FORMAS DE CAPTACIÓN.	33
FIGURA 16. CURVA CORRIENTE VOLTAJE Y POTENCIA DE LA CELDA SOLAR.	34
FIGURA 17. EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA RADIACIÓN EN LA CURVA I-V DE LA CELDA SOLAR	35
FIGURA 18. CELDA MONOCRISTALINA.....	36
FIGURA 19. CELDA POLICRISTALINA.....	37
FIGURA 20. CELDA DE SILICIO AMORFO.....	38
FIGURA 21. VÍAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO (FUENTE: INTA).....	45
FIGURA 22. CLASIFICACIÓN DEL HIDRÓGENO EN HIDRÓGENO LIMPIO Y SUCIO.	46
FIGURA 23. FUENTES DE ENERGÍA A PARTIR DE LAS QUE SE PRODUCE HIDRÓGENO ACTUALMENTE. (FUENTE: LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO)	47
FIGURA 24. PROCESO DE REFORMADO A VAPOR DE AGUA.	47
FIGURA 25. PROCESO DE GASIFICACIÓN.	49
FIGURA 26. PROCESO DE ELECTRÓLISIS.....	50
FIGURA 27. ENERGÍA POR UNIDAD DE VOLUMEN DE DISTINTOS COMBUSTIBLES	55
FIGURA 28. ENERGÍA POR UNIDAD DE MASA DE DISTINTOS COMBUSTIBLES.....	55
FIGURA 29. SENSOR DE CORRIENTE ACS712.....	71
FIGURA 30. TERMOPAR Y MODULO MAX6675.....	72
FIGURA 31. SENSOR DE FLUJO.....	72
FIGURA 32. MEDIDOR TDS DE MANO	73
FIGURA 33. ENTRADA Y SALIDA DE UN SISTEMA.....	74
FIGURA 34. SISTEMA DE CONTROL DE LAZO ABIERTO	74
FIGURA 35. SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO.....	75
FIGURA 36. CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL	77
FIGURA 37. ELECTROLIZADOR DISEÑO 1.....	80
FIGURA 38. DISEÑO DEL SEPARADOR EPDM.....	80
FIGURA 39. ELECTROLIZADOR DISEÑO 2.....	81
FIGURA 40. ACERO INOXIDABLE 316L.....	82

FIGURA 41. MANGUERA PARA ÁCIDOS Y QUÍMICOS.....	84
FIGURA 42. ABRAZADERAS	84
FIGURA 43. HIDRÓXIDO DE SODIO	85
FIGURA 44. DEPOSITO	86
FIGURA 45. AGUA DESTILADA	87
FIGURA 46. AGUA SUPERFICIAL	87
FIGURA 47. TIPOS DE CONECTORES.....	88
FIGURA 48. CONFIGURACIÓN DE PLACAS NEUTRAS.....	89
FIGURA 49. FORMA ESPECÍFICA DEL AISLANTE EPDM	90
FIGURA 50. COTE DE PLACAS	91
FIGURA 51. PERFORACIÓN DE PLACAS.....	91
FIGURA 52. MATERIAL LISTO PARA ARMAR	92
FIGURA 53. ELECTROLIZADOR ARMADO (A).	93
FIGURA 54. ELECTROLIZADOR ARMADO (B).	93
FIGURA 55. MATERIALES DISEÑO2	94
FIGURA 56. ELECTROLIZADOR ARMADO	95
FIGURA 57. MOTOR SPEED CONTROL PWM.....	97
FIGURA 58. CIRCUITO DE CONTROL.	98
FIGURA 59. SIMULACIÓN DE CIRCUITO.....	100
FIGURA 60. DISEÑO PCB DEL CIRCUITO	100
FIGURA 61. CIRCUITO ARMADO	101
FIGURA 62. CURVA DE RESPUESTA EN FORMA DE S.	101
FIGURA 63. ENTRADA DE SEÑAL ESCALÓN	102
FIGURA 64. GRAFICA CON LA ENTRADA DE SEÑAL ESCALÓN.....	102
FIGURA 65. CURVA DE RESPUESTA	103
FIGURA 66. DIAGRAMA DE BLOQUES EN SIMULINK.	105
FIGURA 67. SIMULACIÓN PI	106
FIGURA 68. SIMULACIÓN PID.....	106
FIGURA 69. LAGUNA DE NOGALES, VER.....	107
FIGURA 70. RECOLECCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL (A).....	108
FIGURA 71. RECOLECCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL (B).....	108
FIGURA 72. CONDUCTIVIDAD EN AGUA A) AGUA SUPERFICIAL B) AGUA DE LA LLAVE C) AGUA DESTILADA.....	109
FIGURA 73. PESO EQUIVALENTE SEGÚN PORCENTAJE DE LA SOSA CAUTICA. A)3% B)5% C)10%.....	110
FIGURA 74. INSERCIÓN DEL ELECTROLITO EN EL AGUA.....	110
FIGURA 75. COMBINACIÓN DE AGUA CON EL ELECTROLITO A) MEZCLA NO HOMOGÉNEA, B) MEZCLA HOMOGÉNEA.....	111
FIGURA 76. CONEXIÓN DE LOS COMPONENTES	112
FIGURA 77. DISPOSITIVOS DENTRO DE LA CAJA	113
FIGURA 78. PARTE FRONTAL DE LA CAJA	113
FIGURA 79. PROTOTIPO NO.1 ARMADO	114
FIGURA 80. PROTOTIPO NO.2 ARMADO	115
FIGURA 81. COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE CON 3% DE NAOH.....	116
FIGURA 82. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA CON 3% DE NAOH.....	116
FIGURA 83. COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE CON 5% DE NAOH.....	117
FIGURA 84. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA CON 5% DE NAOH.....	117
FIGURA 85. COMPORTAMIENTO DE LA CORRIENTE CON 10% DE NAOH.....	118
FIGURA 86. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA CON 10% DE NAOH.....	118

FIGURA 87. CONTROL PI CON 5% DE NAOH	119
FIGURA 88. PRODUCCIÓN DE GAS HIDRÓGENO	120
FIGURA 89. EXPERIMENTACIÓN LLENANDO BOLSA PLÁSTICA. A) BOLSA VACÍA B) BOLSA LLENA	121
FIGURA 90. BOLSA PLÁSTICA CON 5L DE GAS HIDRÓGENO.....	121
FIGURA 91. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE GAS.....	122
FIGURA 92. MUESTRAS TOMADAS MEDIANTE DIFERENCIA DE MASAS	122
FIGURA 93. ANÁLISIS DEL GAS HIDRÓGENO OBTENIDO DEL AGUA DESTILADA	123
FIGURA 94. SIN DETECCIÓN DE OXÍGENO EN LA MUESTRA.....	123
FIGURA 95 . ANÁLISIS DEL GAS HIDRÓGENO OBTENIDO DEL AGUA DE GRIFO.....	124
FIGURA 96. ANÁLISIS DEL GAS HIDRÓGENO OBTENIDO DEL AGUA SUPERFICIAL	125

Índice de Tablas

TABLA 1. FORMAS DE ENERGÍA. (SANCHEZ SANTIAGO, (2003), “ENERGÍAS RENOVABLES, CONCEPTOS Y APLICACIONES”, PÁG. 5)	25
TABLA 2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL HIDRÓGENO.	40
TABLA 3. ENERGÍA LIBERADA DE COMBUSTIBLES.	40
TABLA 4. ENERGÍA MÍNIMA DE LA CHISPA PARA LA IGNICIÓN DE UNA MEZCLA DE HIDRÓGENO-AIRE.....	42
TABLA 5. COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDROGENO [36].....	51
TABLA 6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CELDAS ELECTROLIZADORAS.....	52
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIDOR TDS.....	73
TABLA 8. CONTROLADORES A UTILIZAR EN LOS PROCESOS INDUSTRIALES.....	77
TABLA 9. COMPARATIVA DE ACEROS INOXIDABLES SERIE 300 AUSTENÍTICOS.....	83
TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO PWM.....	97
TABLA 11. SINTONÍA POR ZIEGLER Y NICHOLS	103
TABLA 12, MEDIDA DE TDS CON SOSA CAUSTICA EN EL AGUA.....	111

RESUMEN

El desarrollo de este proyecto presenta la opción para el diseño, desarrollo y construcción de dispositivos capaces de aprovechar el hidrógeno como vector energético, es decir, presentar al hidrogeno como una fuente potencial de energía renovable, teniendo como antecedentes al deterioro del medio ambiente y cada vez una mayor demanda de energía por parte del ser humano, se pretende concientizar sobre las fuentes de energía provenientes de los hidrocarburos en comparación con fuentes de energías renovables.

El proyecto explica el diseño, construcción, montaje y pruebas de dos prototipos de electrolizador, se experimentó con diferentes tipos de agua en el proceso de electrolisis y se presentan los resultados de la experimentación variando el porcentaje del electrolito en el agua, se estudió la continuidad de los tipos de agua con y sin hidróxido de sodio variando estos parámetros para llevar a cabo una mejor electrólisis. Para conseguir este objetivo, se desarrolló un análisis acerca del comportamiento de la corriente y temperatura al variar los parámetros dentro del electrolizador, se observó que, dentro de las condiciones de operación, las que más destacan son el porcentaje de electrolito utilizar, materiales y forma de los electrodos, distancia entre electrodos y corriente eléctrica suministrada.

Se desarrollo un control PI para el control de la corriente que se suministrara de la fuente de alimentación con el fin de poder conectar fuentes renovables que alimenten al electrolizador sin el riesgo de sobrecalentar esta fuente. El proceso de fabricación se adaptó a los materiales existentes en el mercado local para lograr la viabilidad del proyecto.

Además, se detalla el proceso de diseño, fabricación, montaje y experimentación para el funcionamiento adecuado de los prototipos aquí expuestos.

ABSTRACT

This work presents the design methodology, development and manufacturing of devices capable of using hydrogen as an energetic vector, in other words, using hydrogen as a potential source of renewable energy. Having as a basement the environmental detriment and the increasing energy demand, this work intends to raise awareness about the use of hydrocarbons as a primary energy source in comparison with renewable energy sources.

This project explains in detail the design, manufacturing, assembly and test for two electrolyzer devices, the test phase was performed working with different types of water in addition with different concentration rates of water-electrolyte. The results are presented. The current continuity was evaluated under different types of water, with and without a diluted sodium hydroxide solution. By adjusting its concentration ratio, it was determined the best conditions to perform the electrolysis process. To achieve this objective, it was carried out an analysis of the current behavior based on the temperature and the electrolyzer concentration at different rates, the results showed that, under different working conditions, the most important parameters are, electrolyzer concentration ratio, shape and material of the electrodes, distance between each electrode and the current supply.

It was designed a PI control to limit the current supply from the power source to allow connect another power supply coming from renewable energies, to avoid the risk of overheating the main power source. For the feasibility of the manufacturing process it were used commercial materials available in the market.

In detail it is described the design, manufacturing, assembly, and testing process to assure the proper working of both prototypes.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La energía es, ha sido y seguirá siendo de suma importancia para el desarrollo de la vida humana. Vivimos en una era donde las principales fuentes de energía están basadas en petróleo, carbón y gas natural [1]. La constante explotación y uso de estos combustibles nos ha llevado a crear dos situaciones nada prometedoras. Primero, el aumento de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero que han ayudado al cambio climático. Segundo, el crecimiento poblacional desmedido hace que exista una demanda energética mayor, por lo cual se registra un declive en las reservas de petróleo [1]. Estas situaciones hicieron buscar fuentes alternativas de energía como lo son la energía solar, la eólica y la geotérmica. Estas energías renovables a pesar de ser inagotables, en comparación con el petróleo se producen a medidas muy bajas, ya que tienen el problema de la aleatoriedad, es decir, la producción de energía depende de factores como el tiempo y el clima, de igual forma, para el almacenamiento de la energía producida se ocupan baterías, las cuales se han detectado diferente falla como es la baja potencia eléctrica de suministro, poca durabilidad y disminución en la capacidad de almacenamiento. A pesar de ello, para que el hidrógeno sea rentable, hay cosas por resolver, la afinidad parece indicar que el Hidrógeno es una muy buena opción para mejorar la eficiencia energética y mejorar la conservación del medio ambiente. El hidrógeno ayudará a resolver los problemas de guardar y trasladar energía, ya que en un futuro se espera una mayor demanda en las energías renovables, pero además durante el periodo de transición permitirá que el uso de combustibles fósiles sea más competente y menos contaminante. Además, al utilizar del hidrógeno se puede reducir la contaminación, mejorar la calidad del aire y disminuir la contaminación del medio ambiente [2].

El hidrógeno en sus principios se ha generado por la reformación de gases de origen fósil para la producción de fertilizantes, lo cual no es factible para el uso del hidrógeno como combustible. El hidrógeno también puede generarse a partir de un proceso llamado electrólisis del agua, usando energía eléctrica con su origen en energía renovable como puede ser solar fotovoltaica o energía eólica. Actualmente existen dos tipos de generadores de Hidrógeno más ocupados en el mundo, el primer tipo son los llamados reactores electroquímicos de soluciones alcalinas con electrodos de metal y el segundo tipo llamadas celdas electrolizadoras tipo PEM (Protón Exchange Membrane).

El hidrógeno es perfecto para poder almacenar energía, un ejemplo de esto es la energía eléctrica producida por en un sistema fotovoltaico, ya que esa energía eléctrica al separar el hidrogeno del agua

en la electrolisis queda almacenada en este en forma de combustible con el fin de poder ser utilizada y transportada para otros procesos [2].

A pesar de ello, no se cuenta con un sistema eficiente de almacenamiento del hidrógeno y existe una extensa serie de investigación hacia este problema. Se estima que el Hidrogeno será mayormente aprovechado en cuanto existan sistemas sostenibles de generación de hidrógeno, dispositivos adecuados de almacenamiento y sistemas capaces de eficientizar su combustión. [3]

1.2. PROBLEMÁTICA

En la actualidad una de las mayores preocupaciones a nivel mundial es encontrar un método para la obtención de fuentes de energía limpia y renovables. Hoy en día nadie desconoce el deterioro de la capa de ozono, escudo natural de nuestro planeta contra la radiación ultravioleta. Durante mucho tiempo los países de primer mundo han tratado de desarrollar fuentes más limpias de energía eléctrica. Hoy en día se está tratando de hacer uso de las pilas de combustible en la producción de potencia tanto a gran escala como a pequeñas aplicaciones.

Según [4] al observarse el aumento en la demanda energética a nivel mundial, los problemas sobre el abastecimiento de energía y la presencia de escasez de los yacimientos en fuentes no renovables, países de primer mundo han optado por implementar regulaciones con el uso de la energía como, por ejemplo, estandarizar normas y códigos para la reducción en el consumo de energía. Por otro lado, en países donde toda esta información no es tan relevante y/o está escasamente documentado. El estudio de [5] nos demuestra que en la mayoría de los países europeos existen leyes de estándares de energía. Cerca de la mitad de los países de la OCDE de Asia y América se tienen la mitad de estas leyes y la mitad de los estándares voluntarios. En México tenemos leyes para la regulación de la energía, pero se observa que para toda América Latina hay un 58% de cumplimiento de estas normas, por lo cual podemos entender en México tiene un cumplimiento en ese porcentaje.

Entonces, en países donde su principal ingreso son los combustibles fósiles (que es el caso de México) la regulación y estandarización de uso de energías se hace complicado. En nuestro país, México, en base a las decisiones sobre la energía sustentable y las energías renovables, se derivó el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014-2018 (Pronase). El programa en su mayoría se enfoca al desarrollo de energías limpias como son las renovables que incluyen la hidráulica, eólica, solar, biomasa, minihidráulica y bioenergética, entre otras, este programa esperaba contrarrestar las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, para impulsar la eficiencia

energética, En 2015 se presentaron desafíos provenientes de la introducción de la Reforma Energética, pero se establecieron regulaciones e instituciones capaces de llevar a cabo el cambio energético que requiere México. La principal meta es el cambiar nuestra dependencia por energías fósiles, a uno de energías limpias y sobre todo la administración en el consumo energético.

Descripción del problema

En esta parte nos enfocaremos a la información estadística [6] que nos permitirá tener una descripción del problema. En la Figura 1 se muestra el consumo de energía mundial para el año 2016. Observamos que efectivamente la mayor proporción de energía es la de los combustibles fósiles (petróleo, gas natural, y carbón).

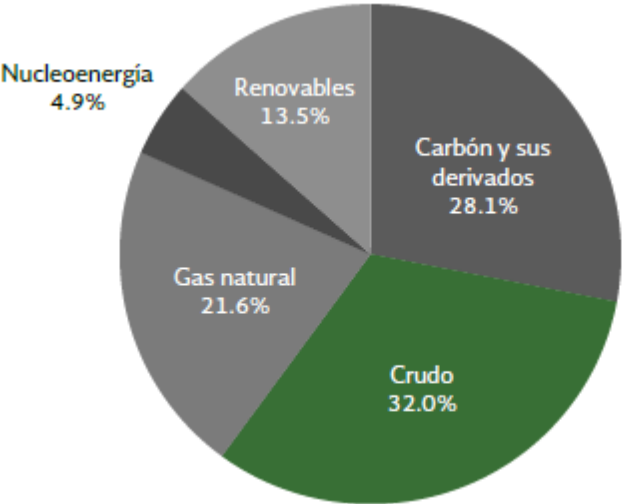


Figura 1. Consumo mundial de energía 2017. Fuente: WORLD ENERGY BALANCES: OVERVIEW (2017 edition)

Durante el año 2016, el exceso del consumo de energía en México supero el 18.5% a la producción de energía primaria. Este hecho se demuestra por el aumentó de 7.2% del consumo con respecto a la caída de 6.6% de la producción comparado al año anterior (Figura 2)

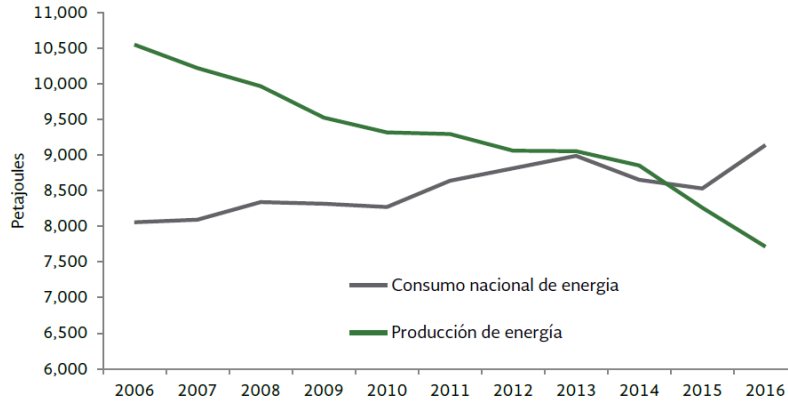


Figura 2. Evolución de la producción y el consumo nacional de energía (Fuente: Sistema de Información Energética, Sener)

Finalizando el año 2016, México mostró una autonomía en la producción de energía igual a 0.84 (Figura 3). Esto equivale a un 15.6% menos energía con la que se cuenta para diversas actividades de consumo dentro del país. Se ha observado que, durante estos diez años, este índice se ha visto en declive un promedio del 4.3%. Es por esto que se concluye que México es un país no independiente energéticamente, ya que el 2016 es el segundo año consecutivo donde México depende de las importaciones de energía para satisfacer su demanda.

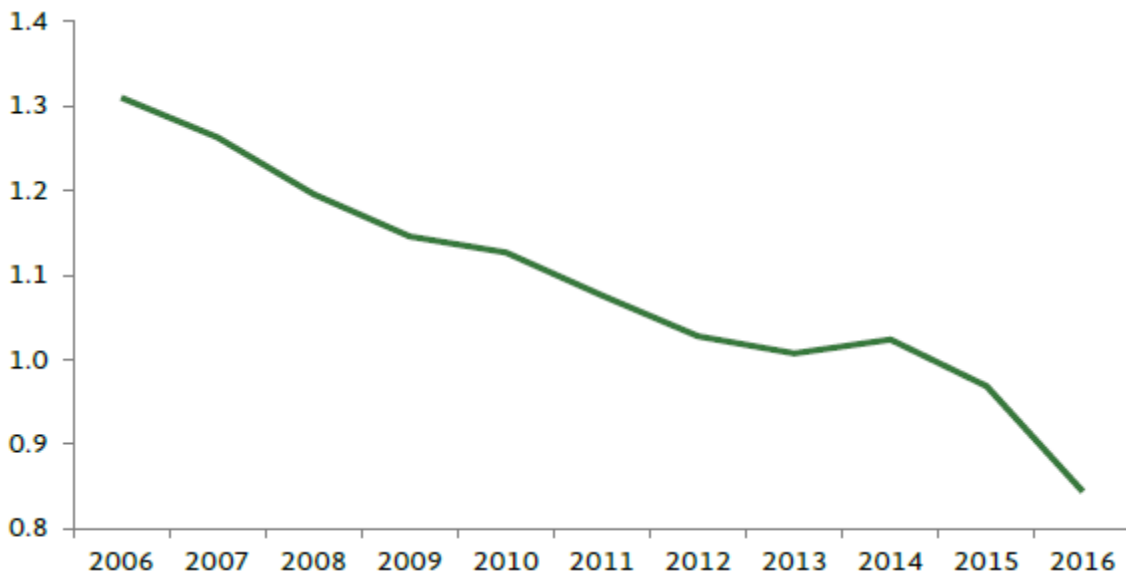


Figura 3. Índice de independencia energética (Fuente: Sistema de Información Energética, Sener)

Actualmente, la producción de energía a nivel mundial es producida a base de combustibles fósiles tal y como se muestra en la figura 4.

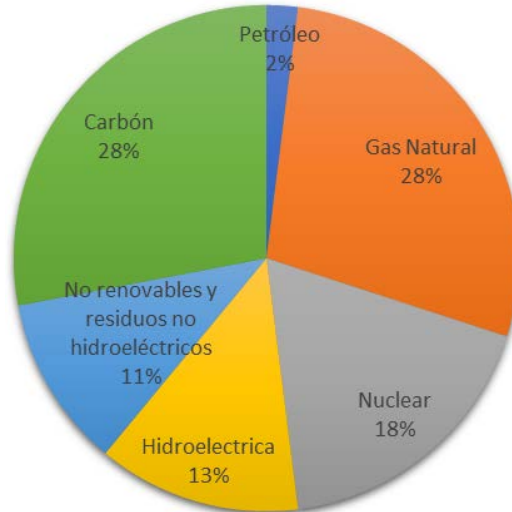


Figura 4. Mezcla de generación de electricidad de la OCDE 2016 (Fuente: World Energy Balances 2017)

La estructura de TFC de la OCDE muestra que el transporte fue nuevamente el mayor sector consumidor de energía en 2015, representa aproximadamente un tercio del consumo final de energía, seguido por la industria con 31% (Figura 5).

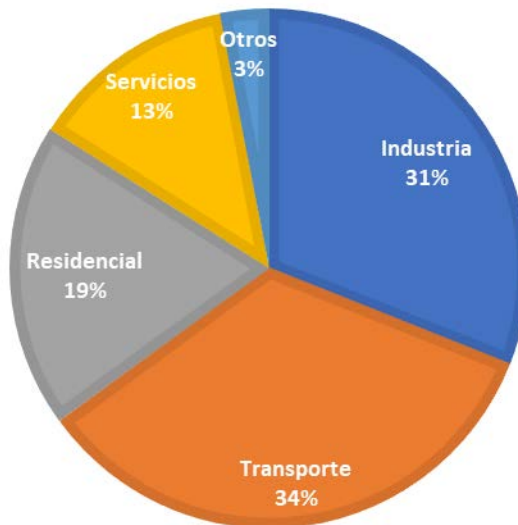


Figura 5. OCDE Consumo final total por sector (Fuente: World Energy Balances 2017)

En México, según [6], La energía eólica tuvo un avance de 18.7% comparado al año anterior, pasando de 31.48 PJ a 37.36 PJ. Este resultado fue gracias al aumento de 26.1% en la facultad de operación de las centrales eléctricas de autogeneración (Figura 6).

La energía producida por sistemas fotovoltaicos creció un 10.2%, procedente de un mayor aprovechamiento de este recurso.

También se presentó un incremento en bioenergéticos, ya que estos presentaron un incremento en la producción del biogás del 2.4%, pasando a 1.91 PJ, mientras que la biomasa, que se produce por bagazo de caña (30.5%) y leña (69.5%), tuvo un incremento de producir 359.84 PJ en 2015 a 361.70 PJ en 2016, incrementando 0.51%.

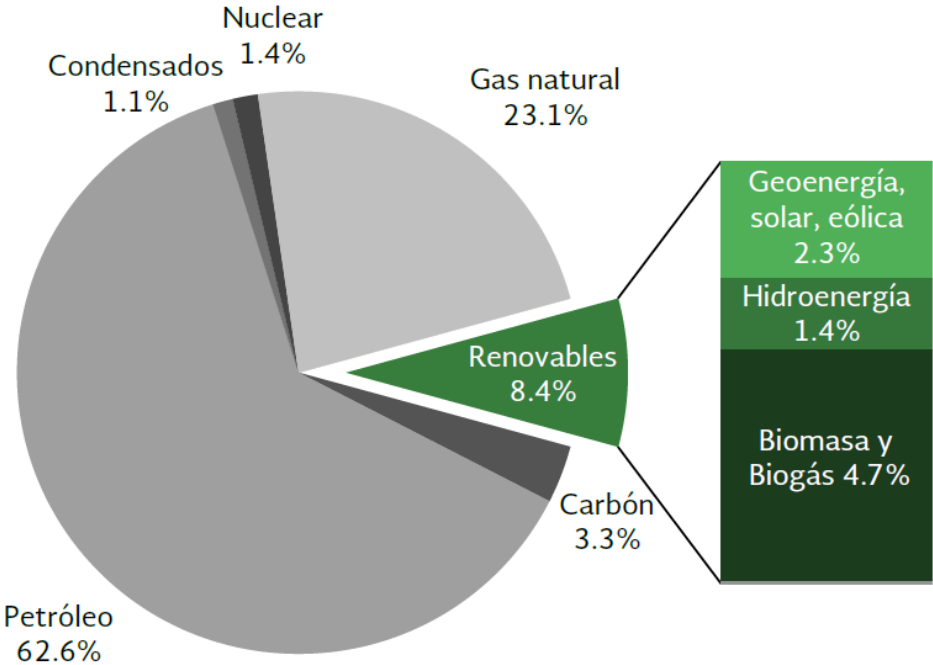


Figura 6. Estructura de la producción de energía primaria, 2016 (Petajoules)

Del consumo total de energía del año 2016 (Figura 7) un promedio del 45.4% lo consumió el sector transporte. A esto se puede observar que más del 90% que se consume en este sector le debemos su gran contribución en la contaminación atmosférica, emisores ricos para el efecto invernadero (Figura 8).

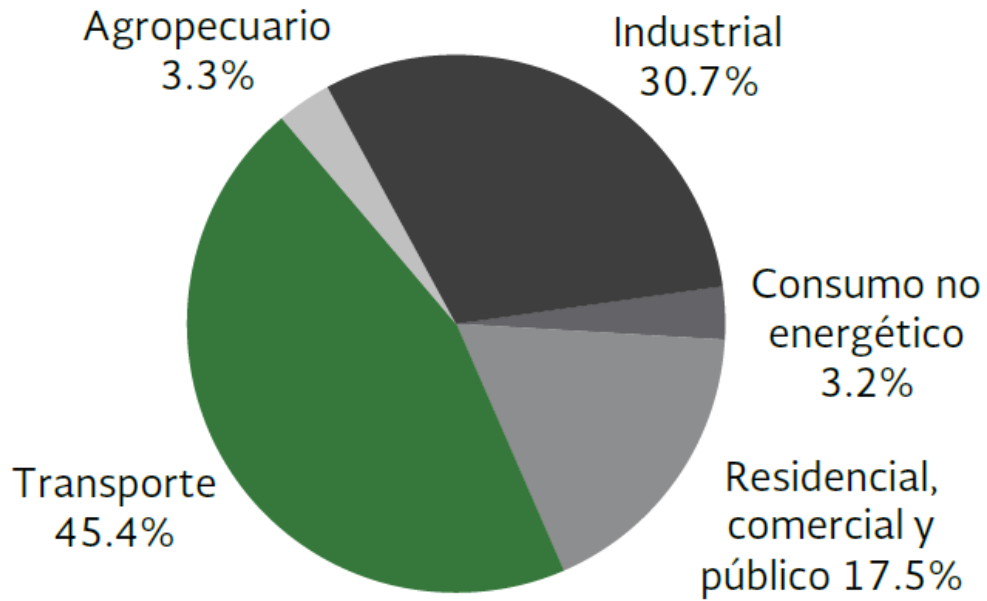


Figura 7. Consumo energético en México

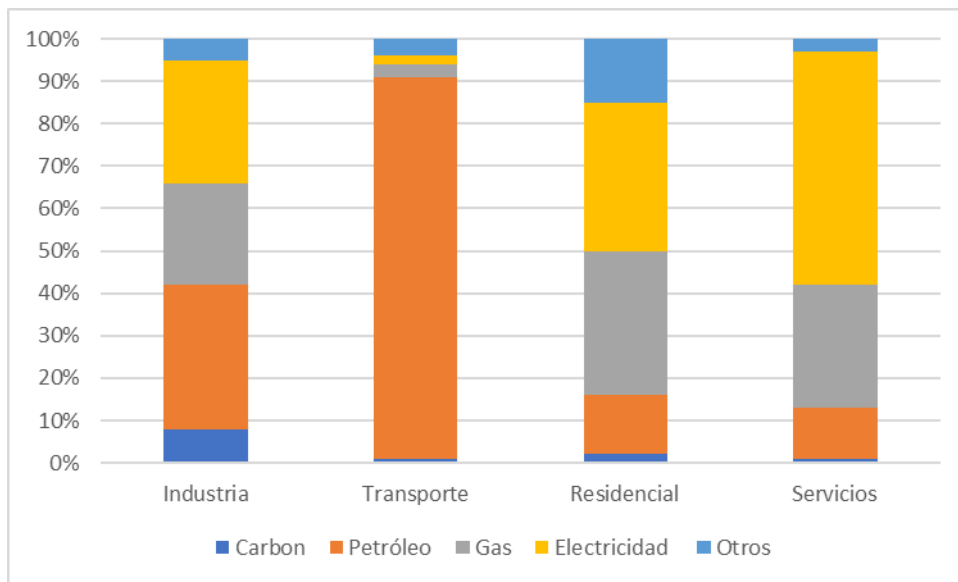


Figura 8. Total, final consumido por Sectores

El nuevo Sistema Eléctrico Nacional, necesita una cantidad considerable de recursos naturales no renovables, que producen una considerable cantidad de gases contaminantes. El uso de más fuentes de energía renovable ayudará a la reducción de la dependencia a los combustibles fósiles. A pesar que muchos países cuentan con un buen sistema de redes para la distribución de su energía, la problemática se presenta cuando se busca la accesibilidad al uso de energías renovables en las redes

para su transmisión, y a partir de aquí se encuentra el reto para la administración de éstas, especialmente durante los picos de consumo. [7]

Al centrarse al problema de hallar una fuente alternativa de energía óptima. Se observa que, aun con las obvias ventajas de las energías renovables, estas cuentan con importantes desventajas. Una de las más destacables es la discontinuidad de la generación de la energía ya que la mayoría de estos sistemas dependen del clima. Por esta razón, una solución sería el almacenamiento de esta energía para poder transportar y utilizar en cualquier momento.

Según [2] actualmente estudios demuestran que el hidrógeno puede servir como un medio de almacenamiento de energía. Y este hidrógeno puede ser obtenido por varios métodos, de los cuales la electrólisis del agua es el método que más destaca, ya que ha de mostrado ser el más práctico. Por lo cual, si nos enfocamos en utilizar la energía de alguna fuente renovable y así convertirla en energía eléctrica, para poder ser utilizada en algún método de separación de hidrogeno, almacenarlo y poder utilizarlo como combustible en el momento más adecuado.

De esta manera se ha elevado la idea de que la generación a gran escala del hidrógeno podría dar solución al abasto energético de la humanidad [8]. El problema de proveer energía empieza entonces cuando se busca separar el hidrogeno a partir de las energías limpias. En investigaciones presentes se han enfocado en dos formas de separar las moléculas del agua por medio de la electrolisis, como una opción tenemos celdas electrolizadoras tipo PEM. Otra opción es la utilización de electrolizadores de soluciones alcalinas.

Este proyecto tendrá sede en México, más específico en la ciudad de Orizaba, nos limitaremos a la investigación de un método eficiente para poder separar el hidrogeno del oxígeno en el agua en el uso de agua superficial y la posible utilización de energía solar.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Acorde a la figura 4, en el mundo el 74% de la energía eléctrica se logra adquirir gracias a plantas termoeléctricas que para su funcionamiento ocupan combustibles fósiles y solo el 17 % de la energía que se les provee a esas plantas son de recursos renovables.

Aunque las energías limpias no hacen uso de los combustibles fósiles, no existe un uso mayor en estas por el alto costos de construcción de plantas hidroeléctricas y de medios hídricos. Por otra parte, en

México se observa que más del 90% de la energía eléctrica que se obtiene es de recursos no renovables (Figura 6) y la demanda de la energía va en aumento, tal y como se aprecia en la Figura 2.

Por el contrario, las ciudades principales de la zona metropolitana del país han mostrado un gran crecimiento de la contaminación atmosférica por el uso de combustibles fósiles que, a pesar de existir programas para limitar esto como son verificación vehicular, el engomado de colores para circular etc., no se observa una disminución de los contaminantes y, por ende, altos costos derivados de ello. [9]

Este proyecto aportará en el desarrollo un método para la generación de hidrógeno, que tendrá un aporte al conocimiento y a la investigación sobre un tema de vanguardia que, a futuro, intentará aportar una idea relevante en la utilización de otra fuente de energía como lo es el hidrógeno.

La razón principal la podemos encontrar justificando dos ideas, la primera obtener resultados de una ardua investigación y experimentación que puedan ayudar a contribuir a la solución del aumento de demanda energética. De ahí justificar que mediante el uso de hidrogeno las emisiones de contaminantes por el uso de combustibles fósiles se reducirán. Por último, se demostrará que, con la investigación realizada podremos ocupar todo tipo de agua superficial, contribuyendo en una mejor eficiencia en la producción de hidrogeno.

1.4. HIPÓTESIS

Es posible mejorar la extracción de hidrogeno del agua y su almacenamiento mediante la instrumentación del proceso de electrolisis utilizando un electrolizador tipo PEM, un electrolizador de solución alcalina o un reactor electroquímico, aprovechando la energía suministrada por una o varias fuentes de energía renovables.

1.5. OBJETIVO GENERAL

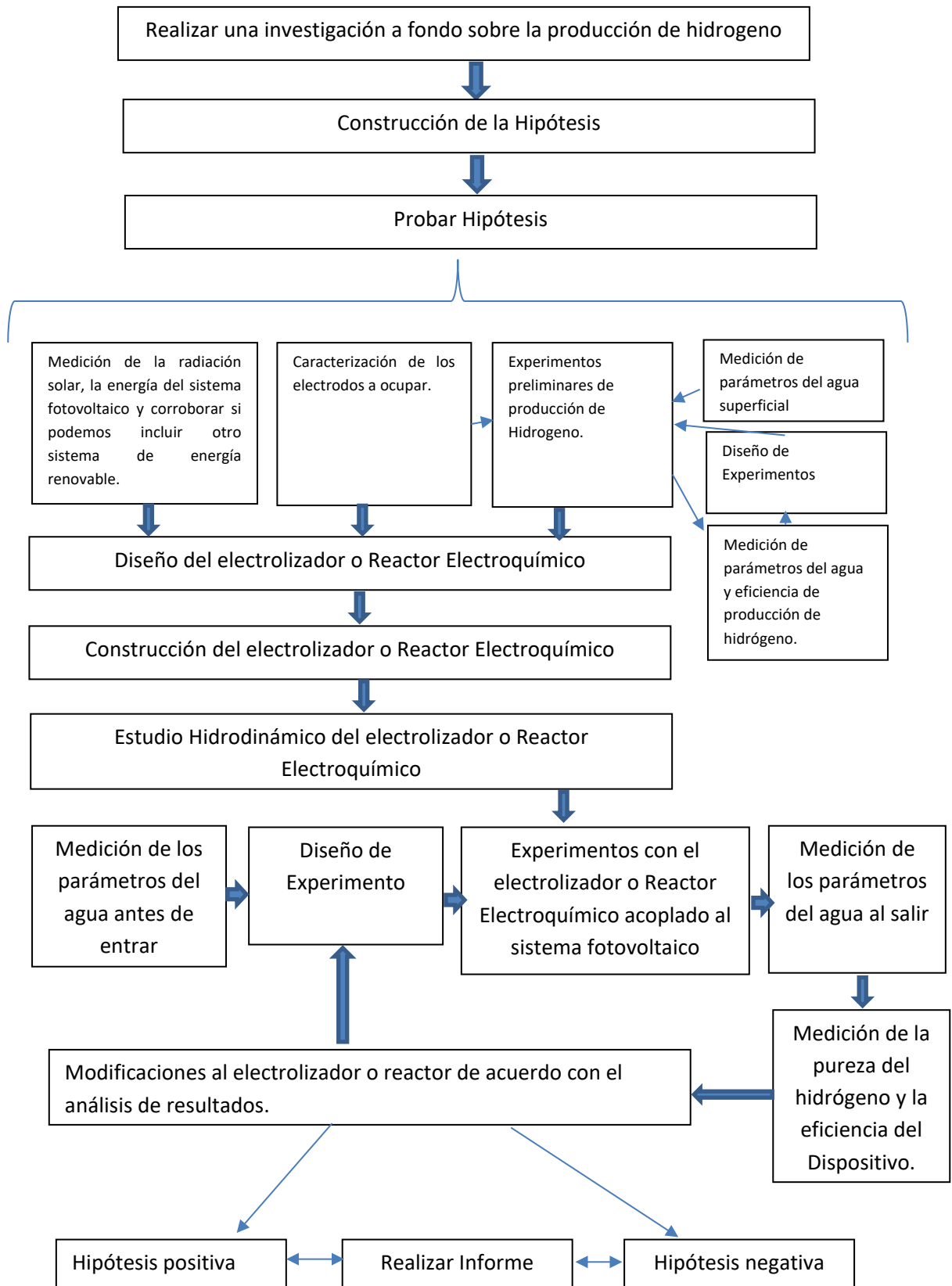
Desarrollar, diseñar y construir un electrolizador alimentado por corriente continua e instalar instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno generado por el electrolizador.

1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar las mejores alternativas posibles para la construcción de un electrolizador que genere una máxima producción de hidrógeno.
- Analizar e implementar instrumentación necesaria para la medición y utilización del hidrógeno en particular para una zona determinada.
- Diseñar y construir un modelo confiable de electrolizador alimentado por energía solar, analizar ventajas, desventajas y viabilidad.

- Cuantificar las eficiencias de la producción de hidrógeno, para establecer las condiciones de operación que corresponden a la eficiencia máxima.
- Valorar la importancia de la conservación energética y ambiental a través del uso de energías alternativas

1.7. METODOLOGÍA



1.8. ESTADO DEL ARTE

En [10] se describe el equivalente eléctrico de una celda electrolítica capaz de generar hidrógeno con el vapor sobrecalentado de agua. Se enlistan los materiales necesarios para el armado del electrolizador, así como su estudio para corroborar que son los correctos, de la misma forma se presentan leyes y ecuaciones que guían a conocer la conducta del sistema, del mismo modo se describen las variables presentes en el proceso de electrolisis, describen la espectroscopia de impedancia electroquímica, ya que como ellos explican es el método por el cual interpretan matemáticamente los fenómenos presentes dentro de su planta. Se presenta una simulación y ejecución del modelo a utilizar con características de un electrolizador de solución alcalina, con diferentes muestras de agua y porcentajes de hidróxido de sodio.

Se presenta en [11] una evaluación de distintos arreglos de electrolizadores alcalinos, por lo cual se explica que los electrolizadores alcalinos son los más utilizados ya que se están considerando que es una tecnología que está madurando, ya que está teniendo mucho auge en procesos industriales por su bajo costo en comparación con otros electrolizadores. Ocupa un electrolito de solución alcalina y su producción de hidrógeno es un parámetro cuyo valor es comparado con otros diseños. Lo que se plantea es el arreglo de diferentes prototipos, variando el área y observando el comportamiento según el tamaño para obtener el desempeño de cada uno. Se vario el área del diseño, creando uno de 18 cm² y otra de 78 cm². Se presentaron curvas de desempeño de cada arreglo para poder observar eficiencia y comportamiento a diferentes temperaturas y dar un panorama de cuál es el arreglo con mejor comportamiento.

Mediante una investigación se propone el uso de energía eléctrica de uso doméstico y energía solar para la producción de hidrogeno, lo que propone [12] es la hibridación para que en todo momento esté produciendo hidrogeno mediante un electrolizador de bajo costo, ya que se pretende utilizar el hidrogeno para cocinar, calentar agua, o alimentar una celda de combustible. Presenta una variante en diseños, los cuales se exponen de tal forma que describa las ventajas y desventajas de cada uno, pero sin perder el punto del proyecto que es la producción de hidrogeno mediante la unión de diferentes fuentes de energía.

En el trabajo [13] se presenta la revisión de los criterios físico-químicos del diseño de un electrolizador para obtener una eficiencia óptima como generador de hidrógeno y ser utilizado como combustible en procesos industriales que requieran energía térmica. El trabajo describe un sistema de control

robusto que permite el control de manera fiable sobre las variables relevantes en el proceso de la electrólisis alcalina del agua. De igual manera se calcula la geometría de los electrodos que permite intensificar las reacciones de óxido-reducción y se propone un prototipo capaz de realizar el proceso de electrólisis en distintas condiciones experimentales. Se realiza el análisis de un diseño capaz de reducir el coste de manufactura, pero dé buenos resultados en la producción de Hidrógeno.

La universidad Católica Argentina desarrollo un proyecto [14] donde se evalúa el comportamiento del acero inoxidable 316L como electrodo luego de ser sometido en un tratamiento químico de picado con HC1 1 M. Esto con la finalidad del aumento de eficiencia en la producción de hidrogeno y evitando la corrosión por el electrolito utilizado en la solución, luego de la experimentación se pudieron observar resultados que indican mejoras sobre el cátodo en parámetros como la densidad de corriente en 19% y una disminución en la resistencia en 20% en comparación si no se le aplica el tratamiento. Algo se presenta en este estudio, ya que los resultados arrojan que, si el tratamiento es aplicado en ambos electrodos o solo en el ánodo, la mejora no es tan relevante como se observó con el cátodo.

[15] nos presenta un trabajo que mediante la producción de hidrogeno puro alimenta un vehículo, lo interesante en el trabajo es que el sistema es capaz de alimentar motores de combustión interna para uso urbano, industrial y automotriz. Presenta de igual manera un sistema para poder almacenar hidrogeno en tanques, esto sin antes pasarlo por un sistema de purificación para obtener un gas lo más puro posible. También presenta experimentación en un motor de combustión interna, prestando graficas de resultados del gas en comparación con gasolina. Cabe señalar que el proceso de electrolisis se lleva acabo con energía eléctrica suministrada por paneles solares.

1.9. ESTADO DEL CAMPO

SISTEMA GENERADOR DE HIDRÓGENO PARA MÚLTIPLES FINES

El propósito de la presente invención es la de proporcionar un sistema generador de hidrógeno capaz de suministrar diversas unidades accionadas por hidrógeno y también suministrar - junto con el hidrógeno y el oxígeno - agua destilada de elevada pureza, así como ser capaz de manera similar de proporcionar servicios y cuyo sistema se pueda realizar de una manera externadamente compacta.

Aunque el proceso de electrólisis proporciona de manera ventajosa el uso de energía extraída de fuentes renovables y el almacenamiento del hidrógeno generado, también cae dentro del campo de la invención el uso de energía eléctrica a partir del sistema de suministro de energía, por ejemplo, durante horas dadas durante la noche.

Utilizar un intercambiador de calor proporciona un área destinada a la condensación del vapor de agua, permitiendo, utilizar la condensación del vapor de agua formado para obtener agua destilada de elevada pureza. [16]

CÁTODO PARA LIBERACIÓN ELECTROLÍTICA DE HIDRÓGENO

La invención presenta un procedimiento para preparar un electrodo que comprende la aplicación en uno o más recubrimientos de solución acética de $\text{Pt}(\text{NH}_3)_2(\text{NO}_3)_2$ (dinitrato de diamino de platino) a un sustrato metálico, con posterior secado a 80-100 °C, descomposición térmica a 450 - 600 °C y repetición opcional del ciclo hasta que se consiga la carga deseada (por ejemplo, 0,3-1,5 g/m² de Pt como metal); la aplicación en uno o más recubrimientos de una solución acética que contiene nitrato de rodio y opcionalmente nitratos de paladio y tierras raras a la capa interna catalítica obtenida de este modo, con posterior secado a 80 - 100 °C, descomposición térmica a 450 - 600 °C y repetición opcional del ciclo hasta que se consiga la carga deseada (por ejemplo, 1-3 g/m² como suma de Rh, Pd y tierras raras); la aplicación en uno o más recubrimientos de una solución acética de nitrato de nitrosilo de Ru a la capa intermedia catalítica obtenida de este modo, con posterior secado a 80 - 100 °C, descomposición térmica a 450 - 600 °C y repetición opcional del ciclo hasta que se consiga la carga deseada (por ejemplo, 2-5 g/m² de Pt como metal) [17]

SISTEMA DE ELECTROLISIS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO, OXÍGENO Y ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ENERGÍAS RENOVABLES (SOLAR Y EÓLICA) Y DE AGUA DE MAR DESALADA

Es un sistema de producción de hidrógeno y oxígeno, partiendo de energías renovables en conjunto con agua marina que una vez desalada se hace una mezcla con diversos componentes químicos como hipoclorito sódico, hidróxido sódico, ácido nítrico, u otros, esto con el hecho de facilitar la electrolisis. Estando basado en el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica y de la energía eólica que suministran la energía renovable al conjunto de baterías, la desaladora o al electrolizador [18]

ELECTRODOS COMPUESTOS PARA LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA

La invención presente tiene como objetivo un electrodo capaz de ser utilizado para la electrólisis del agua en medio de electrolito líquido, un procedimiento de formulación de tal electrodo, un dispositivo de electrólisis del agua que es capaz de ser utilizado en el ánodo o cátodo, por ello es capaz de estar en la producción de una mezcla hidrógeno/oxígeno o de solo hidrógeno o de solo oxígeno [19].

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 RESUMEN DEL CAPITULO

En el capítulo siguiente se establecen referencias para el desarrollo de este proyecto de investigación, por lo cual, los conceptos presentados son en los que se basaran la fase de diseño y los resultados. Se inicia por establecer conceptos que ayuden a entender el principio de la investigación, desde entender porque ver al Hidrógeno como fuente energética hasta porque seguir la investigación sobre este gas, particularmente en regiones de México, se presentan diferentes tipos de electrolizadores que existen actualmente y nos enfocaremos en uno de ellos. Se presentarán conceptos referentes al uso de energía renovable para realizar la electrolisis, enfocándonos en paneles fotovoltaicos. El proyecto hace uso de un sistema PID, el cual se basa en el sensor de corriente AC712 y otros sensores, los cuales definiremos para su principio de operación, así como el procesamiento y visualización.

2.2 DEFINICIÓN DE ENERGÍA

Al hablar de energía llega a la mente la definición de fuerza y la mayoría de las veces ambos términos son ocupados arbitrariamente. Cuando un objeto ejerce una fuerza y este la aumenta, se requerirá más energía y si esa fuerza se mantiene por un mayor periodo la demanda de energía será mayor. Por ejemplo, al empujar una piedra, se ejerce una fuerza en una dirección. Mientras más distancia se empuje a la piedra mayor será el trabajo.

La definición de trabajo es una fuerza por una distancia:

$$\text{Ecuación 1. } W = F * d$$

Donde:

F: Fuerza [N]

d: Distancia [m]

W: Trabajo [J]

“Si la energía que posee un cuerpo se pone de manifiesto realizando un trabajo, el valor de este trabajo será una medida de la energía que posee. Si por el contrario hemos realizado un trabajo sobre un cuerpo y éste lo ha almacenado en forma de energía, la medida del trabajo realizado sobre el cuerpo

nos dará el valor de la energía que permanece de forma latente en el cuerpo. Por todo ello la energía liberada o acumulada tendrá las mismas unidades que la magnitud trabajo”. [20]

El Sistema Internacional de unidades (SI) da el termino julio (J) a la unidad de trabajo y a la unidad de energía, definiendo al julio (J) como “el trabajo realizado por la fuerza de 1 newton cuando desplaza su punto de aplicación 1 metro, a lo que lo mismo, elevar una masa de 101 g un metro.”

La primera persona en utilizar el término “Energía” fue el científico inglés Thomas Young (1773 – 1829) basándose del término *energeia*, cuyo significado es “eficacia” en griego.

Es importante conocer los diferentes tipos de energía, ya que la energía de un árbol, una yunta o alguna gasolina no lo podemos considerar energía potencial, sino energía química, el agua que viene en el río a cierta velocidad, el aire que mueve a un molino de viento o el vapor que alimenta a una turbina tienen una energía cinética. Esto es, energía en movimiento que es de donde se produce el trabajo.

“Las formas de energía son distintas manifestaciones de lo mismo: Energía. Es decir, “**formas de energías**” son los distintos tipos de “visualización” en los que la energía se manifiesta en la naturaleza”. [21]

En la naturaleza existen diferentes formas donde se encuentra la energía:

Tabla 1. Formas de Energía. (SANCHEZ SANTIAGO, (2003), “Energías Renovables, conceptos y aplicaciones”, Pág. 5)

Forma	Origen	Producción	Uso
Térmica	Fricción, combustión, energía cinética	Solar, geotérmica, electricidad, química	Cocinar, calefacción, vapor
Radiante	Sol, electricidad, radiación	Solar, electricidad, química	Iluminación, comunicaciones, medicina
Mecánica	Energía Potencial	Eólica, Hidráulica, Mareomotriz, resortes	Iluminación, comunicaciones, medicinas
Eléctrica	Electromagnetismo, piezoelectricidad, electricidad estática, pilas y baterías	Centrales térmicas, centrales hidráulicas, fotovoltaica, celdas de combustible,	Motores, electrónica, calentamiento, almacenamiento de energía

		pilas y baterías	
Química	Combustibles, plantas, animales, elementos químicos, biomasa	Biomasa, petróleo, gas, carbón	Motores de combustión interna, cocinar alimentos, transformación química
Gravitacional	Tierra	Hidráulico	Mover máquinas
Magnética	Tierra, imanes	Electricidad	Electromagnetismo
Nuclear	Átomo	Centrales nucleares	Centrales nucleares, electromedicina, radiología

2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE ENERGÍA

Diferentes recursos naturales o también conocidos como fenómenos de la naturaleza son capaces de brindar energía en muchas de sus formas, es por ello que son consideradas fuentes naturales de energía o recursos energéticos. Existen dos tipos, las fuentes renovables, que son capaces de utilizarlas sin el miedo de que se acaben, como la luz de Sol, el viento, las lluvias, las corrientes de los ríos, etc.; y las fuentes no renovables, que son aquellas que se van agotando conforme se usan, como el petróleo, el gas natural o el carbón. [22]

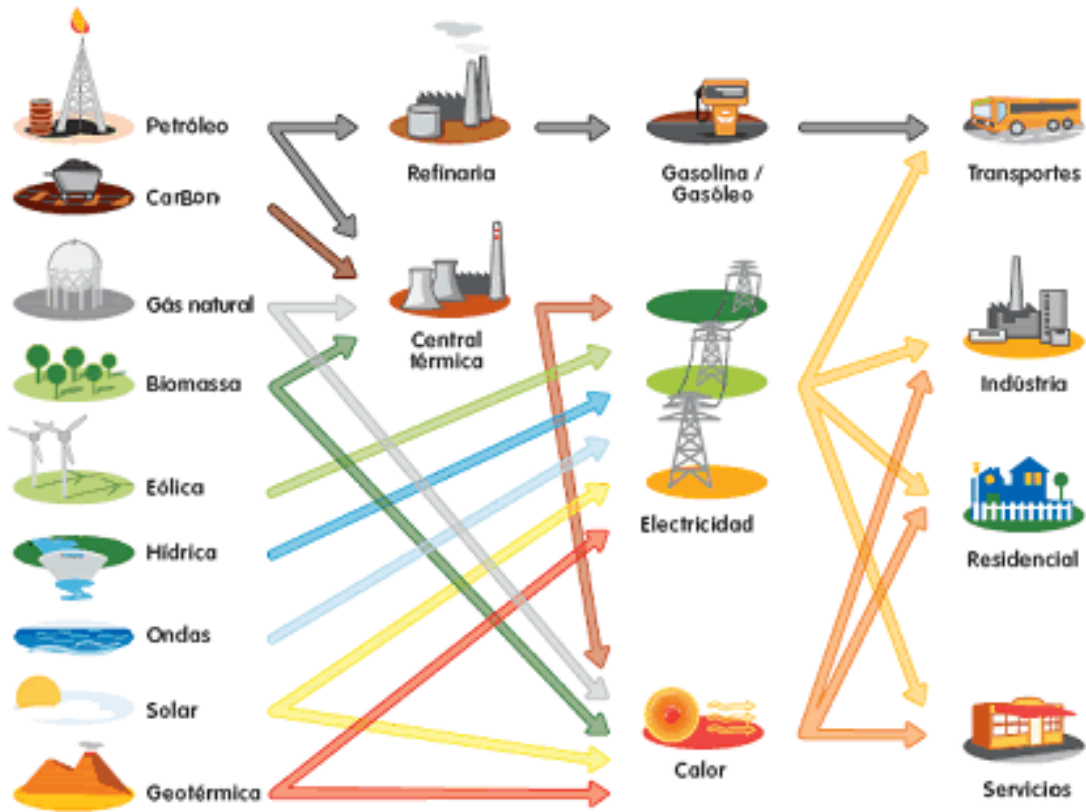


Figura 9. Formas de energía.

Las fuentes de energía renovable son también conocidas como fuentes alternativas, esto porque son consideradas como una solución diferente o alternativa a las que existen actualmente.

2.4 ENERGÍA SOLAR

Para comprender de dónde procede la energía del Sol, debemos imaginarnos en el interior de nuestra estrella de alrededor de 700 mil km de radio.

Es bien sabido que existe una inmensa fuerza de gravedad y una temperatura cercana a los 16 millones de grados dentro del Sol, aquí dentro se unen los átomos de hidrógeno para formar uno de helio, la totalidad de esta unión no se transforma completamente en helio, es por ello que el resto de la masa se transforma en energía. A pesar de esto la tierra no está expuesta a esta temperatura, ya que lo

único que podemos observar del astro es su parte exterior conocida como la fotosfera cuya temperatura ronda entre los 5.780°K.

Gracias a ley de Stefan-Boltzmann Podemos conocer la radiación emitida por un cuerpo en acorde a la temperatura de este:

$$\text{Ecuación 2. } M = \sigma T^4$$

Donde:

M: Densidad total de flujo radiante emitida por cuerpo. [W/m^2]

σ : Constante de Stefan-Boltzmann 5.67×10^{-8} . [$Wm^{-2}K^{-4}$]

T: Temperatura del cuerpo. [K]

El Sol es una esfera que puede otorgar energía en todas las direcciones y mientras la tierra hace el movimiento de translación recibe parte de esta energía como se muestra en la Figura 10. La energía que transfiere el sol es propagada en dos formas:

1. Radiación electromagnética, donde se encuentran: los rayos ultravioletas, rayos X, luz visible, radiaciones infrarrojas, microondas y las ondas de radio;
2. Viento solar, compuesto de partículas atómicas energizadas: neutrinos y protones.

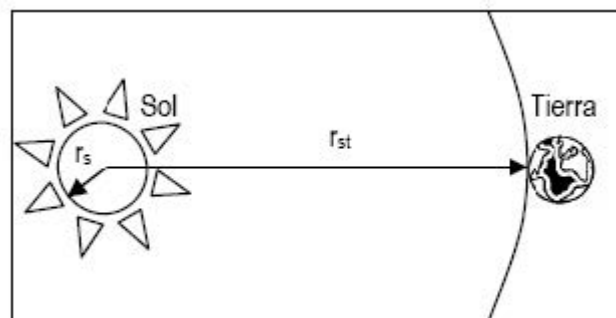


Figura 10. Distancia tierra-sol

La energía total radiada por el sol es la misma que llega a la tierra, ya que por el principio de la conservación de la energía sabemos que esta no se destruye. [21]

2.4.1 EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

La radiación electromagnética se define como un flujo de fotones, los cuales se caracterizan por ser partículas sin masa, estas viajan a la velocidad de la luz en forma de onda y su longitud dependerá de la cantidad (o paquete) de energía que transporten, ya que los fotones transportan la energía de un punto a otro sabremos si estamos hablando de ondas de radio (cantidad menor de energía) hasta los rayos gamma (cantidad mayor de energía).

Los fotones con una longitud de onda más corta son aquellos que transportan mayor energía, ya que cuentan con una mayor frecuencia. Veamos algunos de estos conceptos:

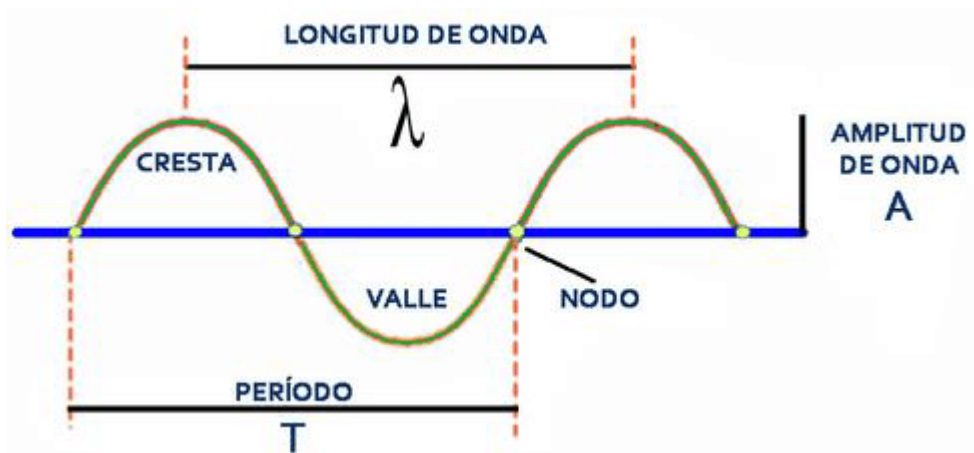


Figura 11. Longitud y otras propiedades de onda.

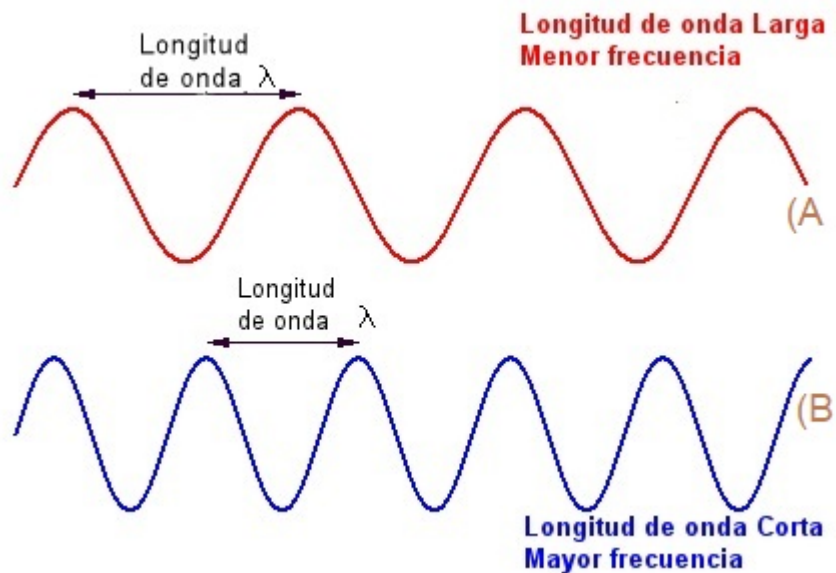


Figura 12. Longitud de Onda.

La Figura 12. Se observan dos ondas, Mientras en la onda (A) tenemos dos picos, en la onda (B) hay tres a igual distancia.

La longitud de la onda es la distancia que existe entre un pico (o valle) al siguiente (Figura 12). Entonces, se observa que la onda (B) hace tres ciclos mientras que (A) recorre al mismo tiempo dos, por lo tanto, decimos que la longitud de la onda (A) tiene menor frecuencia que la (B). La distancia que recorre la onda en un ciclo se le conoce como longitud de onda y es representada por la letra griega lambda λ .

Ahora bien, si midiéramos el tiempo que le toma a una onda formar un ciclo hablaríamos de la frecuencia de la onda y esta se representa por la letra griega NU ν . La frecuencia de la onda permite saber cuántos ciclos se realizan por segundo y se mide en Hertz [Hz] (1 Hertz = 1 ciclo por segundo).

Sabiendo que las ondas son fotones moviéndose a la velocidad de la luz c , podemos obtener la frecuencia de la onda mediante:

$$\text{Ecuación 3. } \nu = c/\lambda$$

Para poder estimar la cantidad de energía que transporta un fotón se presenta la ecuación 4:

$$\text{Ecuación 4. } E = h\nu$$

Donde:

E: Energía de un fotón [J]

h: Constante de Planck 6.624×10^{-34} [J/s]

ν : Frecuencia

La energía con la que cuenta un fotón se mide en electrón voltios [eV], $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

La luz natural que nos proporciona el astro Sol, como aquellas artificiales que nosotros creamos transmiten fotones de diversas longitudes de onda que se ubican en el espectro de la luz visible, es por ello que podemos verlas.

La energía que irradiada un cuerpo depende de la temperatura T de este y de la longitud de onda de los fotones que transmite a lo largo de todo el espectro electromagnético. Este principio es el denominado Ley de Planck, que determina la energía radiante de un cuerpo en función de T y λ .

La radiación solar, cuando entra a la atmósfera, sufre algunas pérdidas, ya que choca en las nubes y retorna al espacio; se disipa y cambia de dirección; parte de ella es absorbida por el vapor de agua y aerosoles; la radiación con mayor energía llega directamente sin afectarse; haciendo que parte de esta se refleje en el suelo. [21]

Se conoce como radiación solar global o total a toda la suma de radiación directa más la difusa más la reflejada en el suelo, como se observa en la Figura 13.

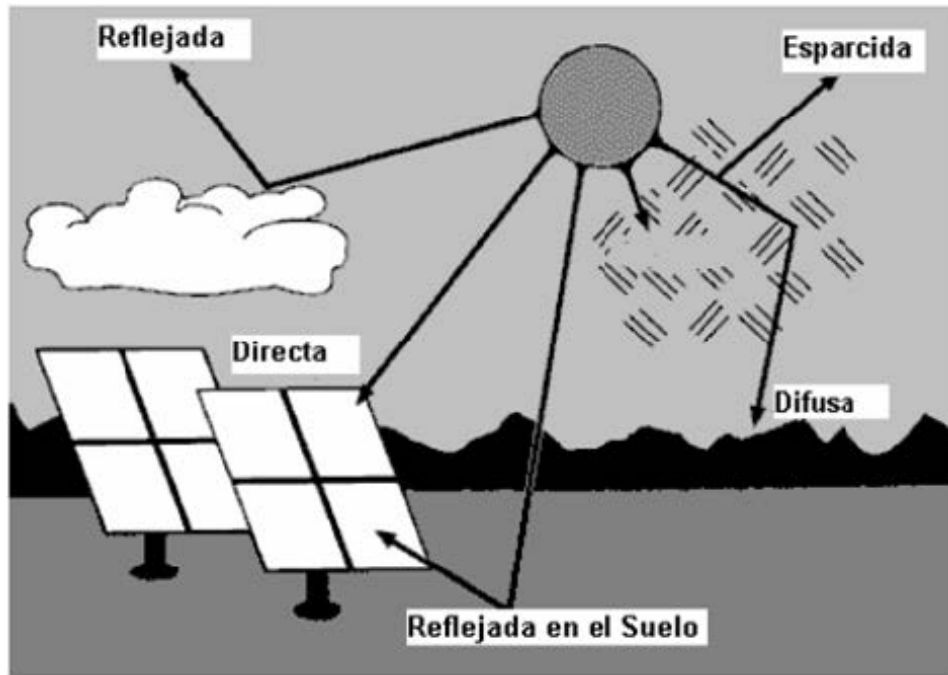


Figura 13. Componentes de la radiación solar.

“El espesor de la atmósfera determina igualmente cuánta energía se pierde hasta llegar a la superficie de la Tierra. La masa de aire (abreviada AM por sus siglas en inglés “air mass”) es la distancia entre el suelo, usualmente al nivel del mar y la parte exterior de la atmósfera. En el espacio exterior la masa de aire es cero AM_0 ” [21].

Un rayo de sol que incide directamente hacia el suelo creando una línea recta tiene una AM_1 , o mejor conocida como una atmósfera de distancia. Esto pensando que la tierra mantiene siempre la misma posición con respecto al sol, pero esto no pasa, ya que solo durante el día y todo el año su posición y distancia varían, es por ello que la AM sube y la radiación tiene que cubrir una mayor distancia hasta el suelo.

Los ángulos ACB y AM son directamente proporcionales, ya que, si el ángulo ACB sube, la AM también sube. Este ángulo de inclinación tiende a variar dando valores de 0 a 90 grados. Si el Sol está en el Zenit, refiriéndose a una posición lo más recta a la tierra (al mediodía), el ángulo es cero y la AM=1; y, mientras el Sol se oculta el ángulo, se acerca a 90° y la AM=36.5.

Las condiciones singulares de prueba (STC) para todo sistema o equipo que utiliza la energía del Sol (paneles fotovoltaicos, colectores termo solares) utilizan datos como: “ la AM = 1,5; es decir, el Sol tiene una inclinación de 28.2° respecto de la vertical, una temperatura de 25°C, una radiación de 1000 W/m² y una velocidad del viento de 1 m/s.” [23]

Algunos fabricantes difieren a esos datos, por lo cual, ocupan condiciones un poco más reales que las STC y son: AM=1,5, radiación 800 W/m², temperatura 20°C, y velocidad del viento 1 m/s.

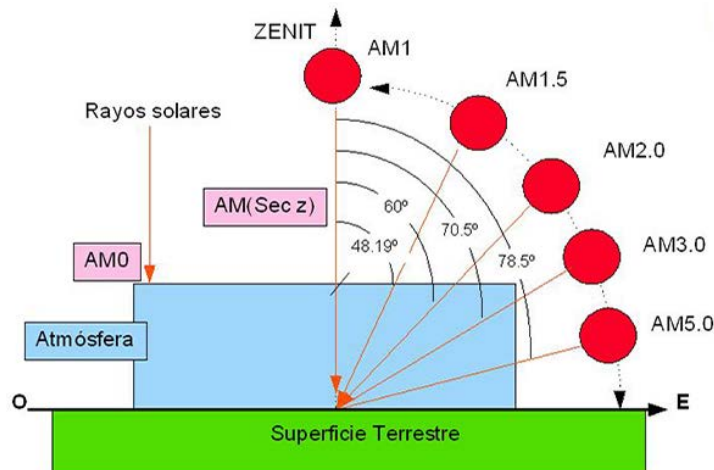


Figura 14. Longitud de la trayectoria de la luz solar al atravesar la masa de aire de la atmósfera.

La tecnología con la que actualmente contamos nos permite aprovechar la radiación solar (si no toda, gran parte de esta) para los usos más diversos. La captación de la energía solar puede ser agrupada como indica la Figura 15.



Figura 15. Formas de captación.

2.4.2 EFECTO FOTOELÉCTRICO

El físico Albert Einstein se hizo acreedor al Premio Nobel en 1921 gracias a la explicación del efecto fotoeléctrico, esto dio pie a la teoría de la física cuántica, diciendo así lo que produce al chocar la luz en un objeto metálico. Al incidir en el metal, ciertos fotones liberan electrones generando una corriente eléctrica en un circuito.

Los electrones que se liberan están directamente proporcional a los fotones a cierta frecuencia que inciden en el metal, ya que no todos tienen la misma cantidad de energía capaz de liberar a estos. [24]

Se destaca que un mayor número de fotones de esa frecuencia liberará más electrones. Para poder entender el principio fundamental del funcionamiento de una celda solar es necesario tener este concepto claro.

2.5 CELDA SOLAR

Los paneles solares fotovoltaicos absorben la luz solar como fuente de energía para generar electricidad. Un módulo fotovoltaico (PV) es la unión y empaquetado de celdas solares fotovoltaicas típicamente 6×10 . Los módulos fotovoltaicos crean el conjunto fotovoltaico de un sistema fotovoltaico que produce y proporciona energía eléctrica a aplicaciones comerciales y residenciales.

El funcionamiento de una celda solar se puede trazar por una curva de corriente- voltaje I-V como se representa en la Figura 16. La celda se encuentra en circuito abierto (V_{oc}) cuando el circuito no está cerrado, en caso contrario, cuando el circuito se cierra la celda está en cortocircuito, por lo cual, la corriente es I_{sc} . Cuando la tensión incrementa de 0 hasta V_{oc} , la corriente gradualmente aumenta hasta un punto donde se cruza con el voltaje máximo V_{max} . Como sabemos la potencia es igual a $P=V \times I$, es por ello que se puede calcular la potencia en cualquier punto de la curva. En este caso, lo interesante es obtener la máxima potencia, es decir obtener el punto de incidencia donde $V \times I$ es máxima. El punto P_{max} se conoce también como **punto de máxima potencia (MPP)**. [25]

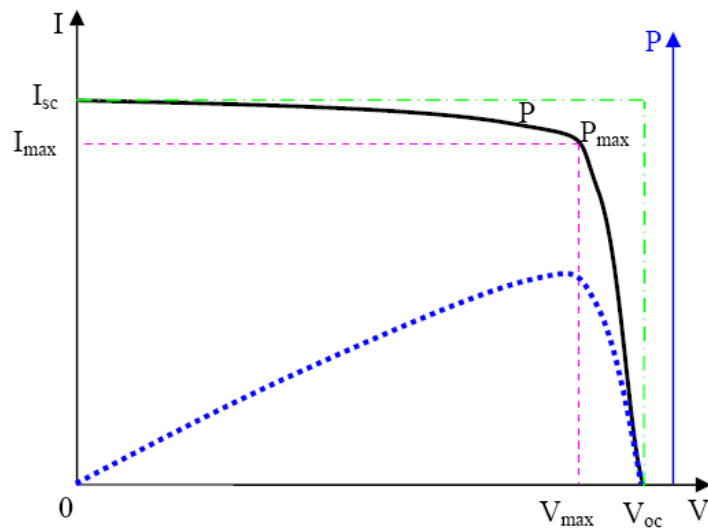


Figura 16. Curva corriente voltaje y potencia de la celda solar.

Mediante la conexión del área del rectángulo $V_{oc} \times I_{sc}$ con el área del rectángulo $V_{max} \times I_{max}$ se pueden obtener las características de la celda solar a ocupar, el cual es llamado **factor de cuadratura** (fill factor). [26]

$$\text{Ecuación 5. } FF = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{sc}V_{oc}}$$

2.5.1 EFECTOS DE LA RADIACIÓN Y LA TEMPERATURA EN UNA CELDA SOLAR.

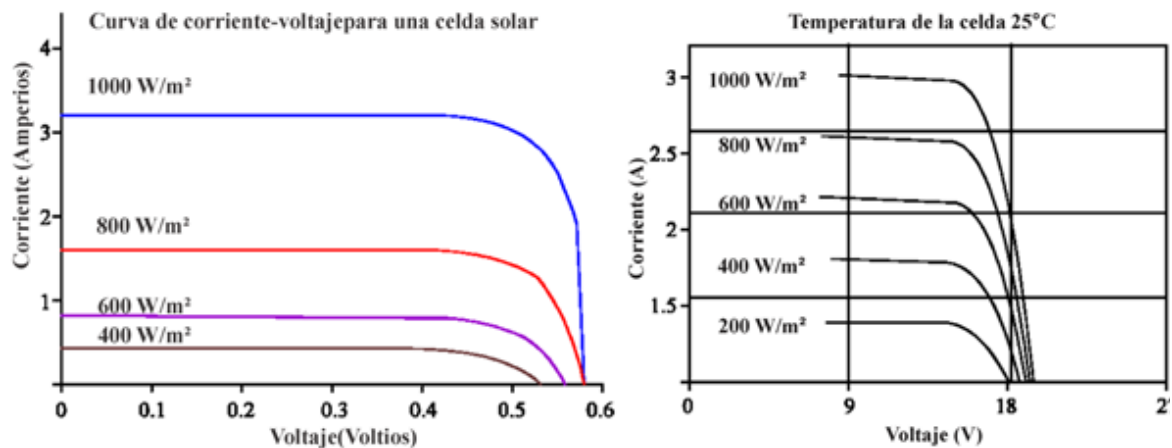


Figura 17. Efectos de la variación de la temperatura y la radiación en la curva I-V de la celda solar

Como se observa en las gráficas, las curvas I-V varían dependiendo del valor de radiación solar y la temperatura cuando se exponen a condiciones estándar de prueba (STC).

Por lo cual, el voltaje incrementa o disminuye dependiendo de la temperatura, y la corriente I aumenta o disminuye acorde a la radiación solar G , se puede deducir que la potencia de cualquier panel de celdas solares se ve disminuido con el incremento de su temperatura y aumenta acorde a la radiación. Cabe señalar que la temperatura que le afecta es la de ella misma y no la del ambiente.

Un panel puede tener e incluso superar una temperatura de 75°C , reduciendo su potencia comparado con las de STC (a 25°C) esta puede reducirse hasta un 25%. Esta característica es algo negativo cuando se montan paneles solares especialmente en zonas cálidas.

2.5.2 EFICIENCIA DE LA CELDA SOLAR

Para poder conocer la eficiencia de una celda o un arreglo de ellas haciendo un módulo fotovoltaico se puede establecer mediante la relación de la potencia de entrada y la potencia de salida. Para ello nos pueden ayudar las ecuaciones 6 y 7: [25]

$$\text{Ecuación 6. } n_C = \frac{P_M}{G \cdot A_C \cdot N_C}$$

$$\text{Ecuación 7. } n_M = \frac{P_M}{G \cdot A_M}$$

Donde:

n_C : Eficiencia de una celda de un panel fotovoltaico.

P_M : Potencia nominal del panel fotovoltaico. [Wp]

G: Radiación solar. [$\frac{W}{m^2}$]

A_C : Área de la celda. [m^2]

N_C : Número de celdas en el panel.

n_M : Eficiencia del panel fotovoltaico.

A_M : Área total del módulo. [m^2]

Se puede apreciar que debido al espacio que existe entre las celdas la eficiencia de ellas es mayor que la del módulo.

2.5.3 TIPOS DE CELDAS SOLARES

Existen tres tipos de celdas solares, y su nombre depende de su proceso de fabricación: monocristalino, policristalino y de película delgada o de silicio amorfo.

La **celda monocristalina** es fabricada de un solo cristal que va formándose hasta formar un solo bloque. Las celdas son luego cortadas en piezas delgadas de 250 a 350 μm , Figura 18. [26]

Su capacidad de eficiencia de esta celda es de alrededor del 25%. En el presente estas celdas se les puede estimar su eficiencia entre un 15% y un 17%. Algo muy característico de estas celdas es su color uniforme, su forma circular o su el corte de sus bordes.



Figura 18. Celda monocristalina.

La **celda policristalina** su fabricación es a base de cristal de silicio fundido que se pone en un molde. Es más económica a diferencia de la celda monocristalina, ya que la eficiencia máxima es del 20%. Está a diferencia de la monocristalina, presenta un color irregular y más claro, es diseñado para presentar una figura rectangular con sus bordes, Figura 19. [26]

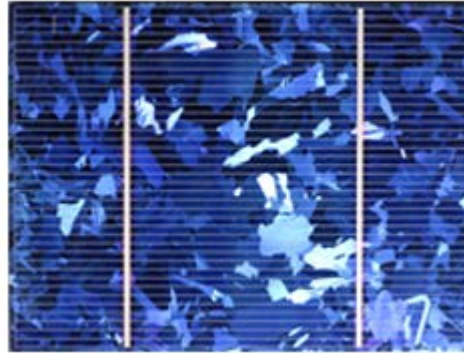


Figura 19. *Celda policristalina.*

La **celda de película delgada o silicón amorfo** aprovecha nueva tecnología ya que cuenta con un sustrato de vidrio o cerámica recubierto con una delgada capa de cristal de silicio puro, Figura 20.

Este recubrimiento no rebasa los 20 μm , por lo cual se puede apreciar que es casi un tercio de grueso que un cabello. El espesor de total de esta es de 300 a 800 μm . El sustrato también puede ocupar diferentes materiales, y para poder tener un panel con características flexibles suele manufacturarse con materiales plásticos. Hoy en día se pueden obtener eficiencias de alrededor del 10% a pesar que en experimentación en laboratorios se han logrado recabar con éxito eficiencias de hasta 19%. Algo positivo de este tipo de celdas es su coste, ya que en comparación con otros tipos de celdas es mucho más económicas y su producción no requiere de elementos contaminantes.

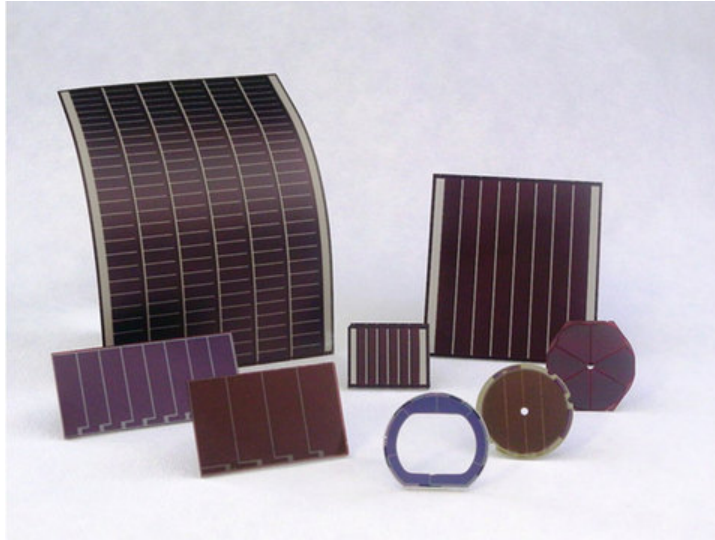


Figura 20. Celda de silicio amorfo.

Las celdas **contrachapadas o multicapa** son tecnologías que se están desarrollando en la actualidad, su fabricación es basada en la colocación de una capa sobre otra capa con diferentes materiales y que cuentan con capacidades diferentes de energía para que así se pueda aprovechar la mayor parte de las frecuencias del espectro electromagnético.

Para la manufactura de este tipo de celdas son ocupados materiales como silicio, arseniuro de galio, cobre indio diselenuro y telurio de cadmio. Para su fabricación dependen diferentes factores, como son la ubicación donde serán ubicados para así poder conocer la fuente de luz.

La celda tiene un color azul ya que se le coloca una película antirreflejo para optimizar la absorción de la luz solar.

2.5.4 CONEXIÓN DE CELDAS SOLARES

Un panel fotovoltaico es simplemente un compuesto de celdas conectadas entre sí. Gracias a esto podemos llegar a un voltaje determinado, y dependiendo de la unión y número de celdas podemos llegar a tener valores de 6V, 12V, 24V, 36V, o 48V. Una celda puede proporcionar cerca de 0,5 V, es por ello que si se requieren de 12 V tendríamos que conectar 24 celdas en serie.[27]

2.6 HIDRÓGENO

2.6.1 CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓGENO

Las características principales del hidrógeno son: gas incoloro, inodoro, insípido, no tóxico, indetectable para un ser humano, pero puede resultar asfixiante en grandes cantidades donde la concentración de este gas sea mayor que el oxígeno y es extremadamente inflamable y reactivo; es el elemento de menor masa atómica y es mucho más ligero que el aire.

Un átomo de hidrógeno tiene únicamente un protón y un electrón, es el elemento que más existe en el universo, y el tercero más abundante en la Tierra.

El hidrógeno a pesar de ser la tercera sustancia más abundante en el planeta no la podemos encontrar por sí sola debido a su gran reactividad, en la naturaleza la podemos encontrar combinada en diferentes compuestos, principalmente en agua. Al encontrarse en estado puro se presenta en forma de moléculas diatómicas (H_2).

El hidrógeno es tan ligero que ni la fuerza de gravedad logra mantenerlo dentro del planeta. Tiene la característica que dentro de sus átomos se encuentra solo un protón y un electrón. A pesar de ello se puede presentar la peculiaridad que uno de cada 5000 átomos de hidrógeno contenga un neutrón, y algo mucho más improbable pero no imposible se pueden presentar en un átomo de hidrógeno dos neutrones. Respectivamente el nombre de las tres formas mencionadas de isótopos del hidrógeno son protio, deuterio y tritio. [28]

El hidrógeno se ha vuelto muy esencial para las industrias, es por ello que en estadística se estiman 0.55 billones de metros cúbicos normales (Nm^3) en producto mundial. Tiene diferentes usos, pero actualmente su uso principal es para la construcción de fertilizantes, producción de metanol, en la metalurgia como agente reductor, como materia prima en la fabricación de sustancias orgánicas en el sector alimentario, etc. Una característica del hidrógeno a resaltar es su baja solubilidad en líquidos, pero alta en metales. A temperaturas típicas el hidrógeno puede actuar como una sustancia poco reactiva a menos que haya sido activado. Cuando se entra en combustión se produce una flama de color azul casi invisible. En la tabla 2 se enlistan las características más relevantes del hidrógeno:

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno.

Propiedad	Valor y unidades
Peso molecular	1,00797
Símbolo químico	H
Calor específico (Cv)	2.46 cal/g
Calor específico (Cp)	3.44 cal/g
Densidad en forma de gas (20°C, 1 atm)	0.08342 kg/m ³
Densidad en forma de líquido (p.e. 1 atm)	70.96 kg/m ³
Peso específico (aire = 1)	0.0696
Temperatura de auto ignición	580 °C
Temperatura de ebullición (1 atm)	-252.8 °C
Temperatura crítica	-239.9 °C
Presión crítica	12.98 atm
Límites de inflamabilidad en el aire	4 – 75 % Vol

Para poder mantener en forma líquida el hidrógeno, se tiene que mantener en una temperatura conocida como temperatura crítica, la cual es la temperatura más baja para poder mantener una sustancia en forma líquida, para el hidrógeno, necesitamos mantenerlo a una temperatura de -239,9°C, solo 33,1 °C para estar en el cero absoluto (0 K).

El punto de ebullición comparado con otros elementos es la segunda más baja, ya que el helio es el único que tiene un punto de ebullición menor.

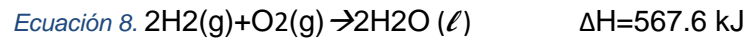
El gas hidrógeno tiene la característica de ser altamente inflamable cuando entra en contacto con oxígeno y una chispa o una flama, cuando pasa esto libera tanta energía que se puede comparar con otros combustibles y es mucho mayor como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Energía liberada de combustibles.

Sustancia	(kJ/g)
Hidrógeno	141.9
Gas metano	55.5
Gasolina	47.5
Diesel	44.8
Petróleo crudo	43
Carbón	29
Metanol	20
Papel	20
Biomasa seca	16
Madera seca al aire	15

Esta energía es en un sentido puramente químico ya que también es posible obtener su energía nuclear la cual es mucho mayor.

El proceso de la combustión del hidrógeno con el oxígeno se ilustra en la siguiente ecuación.



En la ecuación se representa la energía que se libera por dos moles de hidrógeno gaseoso esta energía es igual a cuatro gramos de esta sustancia acorde a la tabla 3 es de 567.6 kJ. Esta energía es la equivalente para poder calentar un litro y medio de agua de 0 a 90 °C de temperatura.

2.6.1.1 CAPACIDAD CALORÍFICA

Cuenta con un poder calorífico alto donde su valor máximo es 141 MJ/kg y el más bajo de 119 MJ/kg por cada unidad de masa. En comparación con otros combustibles de uso diario, estos valores son muy superiores, siendo tres veces el poder calorífico inferior del hidrógeno al valor superior de la gasolina. En condiciones normales cuenta con baja densidad, por lo cual, su densidad energética por unidad de volumen es baja, ya que cuenta con un poder calorífico inferior por unidad de volumen de 10.79MJ/m³, esto puede arreglarse al aumentar la presión o disminuir la temperatura. [27]

2.6.1.2 INFLAMABILIDAD

El hidrógeno no es explosivo, de hecho, a diferencia de algunos elementos explosivos, el hidrógeno es una molécula muy estable y esta requiere una fuente externa para que se produzca la ignición. Para que el hidrógeno pueda explotar se necesitan tres condiciones: que exista la mezcla de un oxidante con el hidrógeno, que la mezcla se encuentre en los límites de inflamabilidad y que la fuente de ignición sea apropiada.

Los límites de inflamabilidad dependen de diferentes factores, como son; la energía de ignición, la temperatura, la presión de diluyentes, del tamaño y configuración del equipo e instalaciones o aparatos. Ahora bien, si consideramos al oxígeno o aire como oxidantes, el rango de inflamabilidad de estas mezclas con hidrógeno se extiende si la llama tiende hacia arriba y pasa lo contrario si la llama lleva el sentido contrario.

Cualquier mezcla inflamable se puede diluir por sus propios componentes, esto si la mezcla de su concentración cae fuera de los límites de inflamabilidad (límites inferior y superior).

2.6.1.3 CHISPA DE IGNICIÓN

La chispa de ignición se define como la energía de la chispa requerida para poder encender la concentración más fácilmente incendiabile del combustible en aire u oxígeno. En la tabla 4. se muestra la mínima energía de la chispa del hidrógeno en aire para diferentes presiones:

Tabla 4. Energía mínima de la chispa para la ignición de una mezcla de hidrógeno-aire

Energía mínima de la chispa (mJ)	Presión (kPa)
0.017	101.3
0.09	5.1
0.56	2.03

En comparación con el metano y la gasolina, la energía mínima de chispa requerida para incendiar el hidrógeno es considerablemente inferior, ya que para estos se necesitan (0.29mJ) y (0.24mJ) respectivamente; por otra parte, para que cualquiera de estos tres combustibles encienda se necesitan tan solo fuentes de ignición débiles, ya que cuentan con una energía de ignición muy baja. [29]

2.6.1.4 DEFLAGRACIÓN A LA DETONACIÓN

La combustión hidrógeno-aire puede ser una deflagración y luego pasar a ser en una detonación o simplemente pasar a ser una detonación, esto ya que la llama se haya trasladado o extendido una suficiente área.

El área donde se puede formar una explosión es más angosta que la cobertura de creación de una deflagración. Esta cobertura generalmente de la mezcla hidrógeno-aire es de 18.5 al 59% de hidrógeno. Sin embargo, con una mayor energía de ignición estos límites se pueden ampliar.

2.6.1.5 LLAMA DEL HIDRÓGENO

La llama hidrógeno-aire-oxígeno es incolora. Si se presenta algún color este es por la presencia de otros compuestos. Cuando se presenta la combustión a una presión muy baja se pueden observar colores como un azul o morado pálidos.

Su temperatura en un porcentaje de volumen de hidrógeno de 19.6% es de 2321 °K o 2047.85 °C.

La velocidad de combustión está regida por la presión, temperatura y composición de la mezcla. La combustión del hidrógeno es de una alta velocidad ya que la propagación de la llama que es una

combinación de aire combustible, es de 2.7 a 3.5 m/s. Es aquí donde se puede apreciar el su capacidad de explosividad y la dificultad de poder extinguir las llamas y explosiones de hidrógeno.

2.6.1.6 Coeficiente de Joule-Thomson

Cuando se le impide el paso a cualquier liquido mediante un tapón poroso, un tubo capilar o cualquier válvula, la presión se verá reducida. Por ende, la entalpía de este aparentemente no sufre cambio alguno durante este proceso de traba. Se puede notar una disminución de su temperatura debido al estrangulamiento. Sin embargo, este comportamiento puede variar, ya que su temperatura puede permanecer sin cambios o incluso que suba mientras se presente una obstrucción.

La temperatura del fluido mientras se le esté aplicando una obstrucción ($h=\text{constante}$) se desarrollará por el coeficiente de Joule-Thomson, definido como:

$$\text{Ecuación 9. Coeficiente de Joule-Thomson } \mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$$

El coeficiente de Joule-Thomson es medir el cambio de la temperatura y la presión mientras esté presente un proceso de expansión isoentálpica. Observe que si:

$$\mu_{JT} \begin{cases} < 0 \\ = 0 \\ > 0 \end{cases} \begin{array}{l} \text{La temperatura aumenta} \\ \text{La temperatura permanece constante} \\ \text{La temperatura disminuye} \end{array}$$

El hidrógeno presenta un coeficiente de Joule-Thomson negativo. Por lo cual, el hidrógeno tendrá una reacción exotérmica. Aunque su aumento de temperatura no presentará un peligro de ignición de forma significativa. [30]

2.6.1.7 HIDRÓGENO EN ESTADO GASEOSO

La principal desventaja del hidrógeno en estado gaseoso es su limitada concentración, esto es evidente al observar la poca cantidad de hidrógeno que se puede almacenar por unidad de volumen.

Además, para que se realice un buen almacenamiento, se requieren altas presiones para comprimir el gas. Hoy por hoy, el hidrógeno en estado gaseoso se almacena y se distribuye en contenedores y

tuberías que soportan grandes presiones, pero para poder guardar cantidades muy grandes de hidrógeno, se recomienda la utilización de inmuebles que dejen fuera de peligro a los seres humanos como minas abandonadas o cavernas subterráneas.

Otro echo negativo en la acumulación de este gas son los materiales empleados, ya que implican el manejo de grandes esfuerzos haciendo que cedan y se agrieten o se quiebren, esto por el hidrógeno que es introducido a una gran presión.

El problema principal de utilizar el hidrógeno como fuente de energía es la obtención de este, debido al no encontrarse por sí solo en el medio ambiente, se tiene que obtener de algún compuesto, es decir, se tiene que separar y la principal fuente de hidrógeno en el planeta es el agua. [31]

2.7 MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Existen diferentes procesos para la obtención de hidrógeno pues estos procesos (mayormente industrializados) son del tipo endotérmicos (requieren energía). Y ya que en estos procesos se requiere considerable cantidad de energía para de extracción, el hidrógeno debería ser considerado como un transmisor de energía más que como una fuente de energía. Los siguientes son los principales métodos de obtención del hidrógeno.

De acuerdo a [28] “Uno de los grandes beneficios del hidrógeno es que puede ser producido por un gran rango de fuentes potenciales incluyendo el agua, los combustibles fósiles y la materia orgánica.” En la figura 21 se presentan varios métodos de producción de hidrógeno en la actualidad. Cabe destacar que cada método presenta ventajas y desventajas respecto a diferentes factores como el costo, emisiones, viabilidad, escala y logística.

En la Figura 21, existen diferentes métodos de producción de Hidrogeno, sin embargo, si el Hidrogeno es obtenido mediante un producto fósil, entraría en contradicción como energético limpio, ya que para su extracción se produciría CO₂ y se le llamaría Hidrogeno sucio, por el desprendimiento de gases nocivos para el medio ambiente. En caso contrario, si el hidrogeno es producido mediante energía renovable, no se produciría CO₂, y se consideraría Hidrogeno limpio.

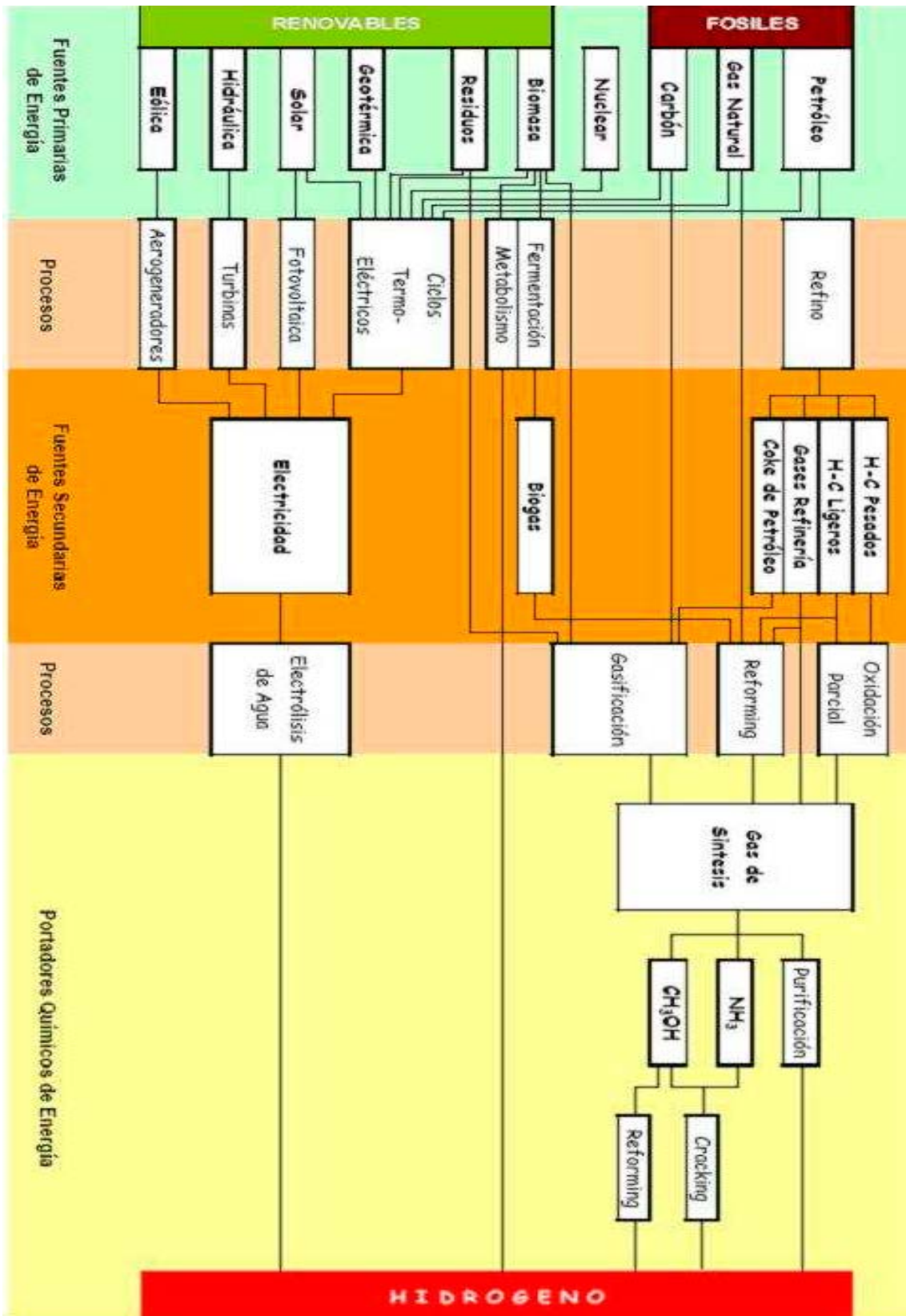


Figura 21. Vías de producción de hidrógeno (Fuente: INTA).

Ahora bien, si el Hidrogeno es obtenido mediante energía nuclear no se produce CO2 mediante el proceso, pero si residuos radioactivos. [32]

De modo que una posible clasificación de la producción de hidrógeno podría ser:

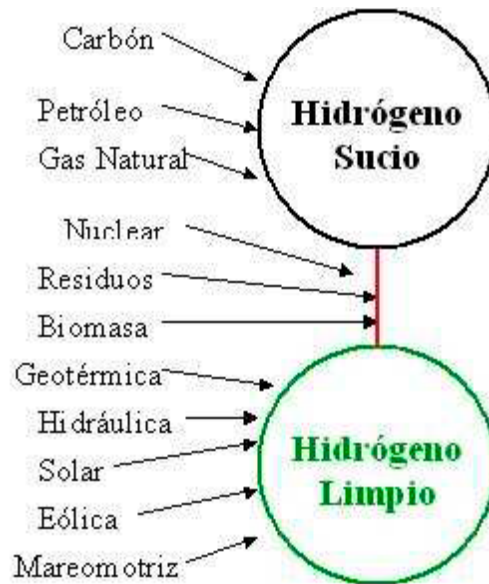


Figura 22. Clasificación del hidrógeno en hidrógeno limpio y sucio.

En los últimos 10 años se ha llevado a cabo una gran investigación para encontrar formas limpiar para la generación de hidrógeno. Estos métodos, que por lo regular no son tan novedosos, tienen en común el intentar minimizar o el no generar emisiones a la atmosfera. También se espera poder eficientizar la producción mediante un método viable y seguro, esto con el fin de evitar la dependencia de grandes fábricas para su producción. [32]

En el año 2010 hubo una producción mundial de 13 trillones de SCF (pie cúbico estándar) de hidrógeno, de los cuales 291.504 millones se produjeron en países europeos de la cual, el hidrógeno, no todo, pero si gran parte de este producido en la actualidad es de origen fósil (petróleo, gas natural, carbón, etc.). [33]

En la figura 23 se muestra que actualmente las fuentes no renovables de generación de hidrógeno abarcan un 96% de la producción de esta. Debe tenerse en cuenta que la energía eléctrica para generar ese 4% restante, mayoritariamente está generada con energía primaria no renovable.

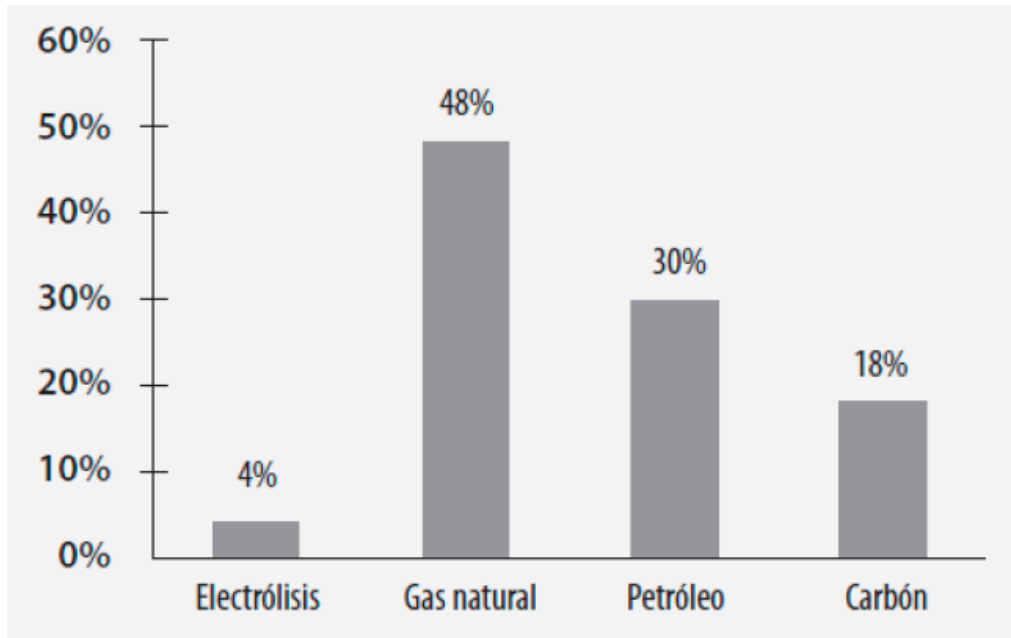


Figura 23. Fuentes de energía a partir de las que se produce hidrógeno actualmente. (Fuente: La Economía del Hidrógeno)

2.7.1 REFORMADO A VAPOR DE AGUA

Actualmente, la producción mundial del hidrógeno se basa solo en un 5% del gas natural y agua, este proceso se le conoce como reformado a vapor de agua. Este método es la combinación de agua y una mezcla de hidrocarburo, esta combinación suele ser gas natural, ya que está compuesto principalmente de metano.

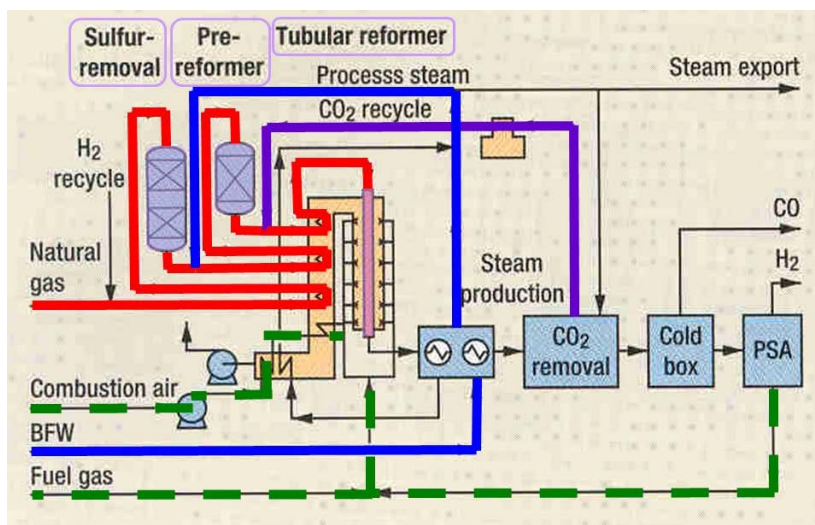
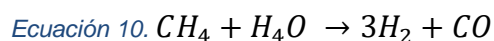


Figura 24. Proceso de reformado a vapor de agua.

Como se muestra en la Figura 24, el proceso se rige en 3 pasos, se comienza con la mezcla del vapor y el metano y para que se logre esto se necesitan altas presiones (3MPa) a temperaturas (entre 550 y 900°C), de la combinación se logra obtener principalmente hidrógeno y dióxido de carbono y otros elementos, dando como resultado un gas sintético.



Después el dióxido de carbono es extraído, y por como último paso se purifica el hidrógeno obtenido. El rendimiento neto de conversión es típicamente de un 83%. Un material que se puede ocupar para llevar acabo el reformado a vapor es el bioaceite, este producto es obtenido mediante el proceso de pirólisis y se extrae de la biomasa.

Actualmente se están buscando diferentes procesos que ayuden al reformado con vapor, uno de ellos que podría ser el principal candidato es llamado oxidación parcial, proceso mediante el cual el gas natural entra en un ciclo de parcial oxidación para poder adquirir gas sintético y un reformado auto térmico, una vez adquiridos estos dos componentes se combinan con la oxidación parcial en el proceso de reformado a vapor. Aun así, se ha observado que sigue siendo menor su eficiencia comparado con el proceso de reformado a vapor.

2.7.2 GASIFICACIÓN

Existe la posibilidad de que algunos compuestos de hidrocarburos puedan ser cambiados gracias al vapor, más sin en cambio, a pesar de recabados estudios y experimentos, se ha notado que existen diferentes materiales y residuos que no sufren cambio alguno con vapor, ya que los catalizadores podrían sufrir un desgaste excesivo. Por el método de gasificación, no se utilizarían catalizadores, y el uso de una extensa lista de opciones como materia prima se pueden ocupar como pueden ser líquidos de alta viscosidad como el fuel oíl, así como el carbón mineral y la biomasa. Tal proceso se describe en la Figura 25.

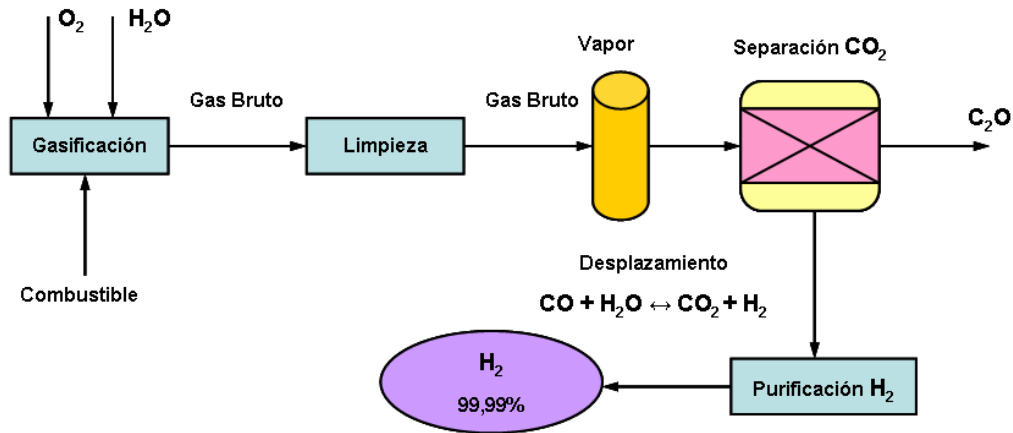


Figura 25. Proceso de gasificación.

Para que se pueda llevar a cabo este proceso son necesarios $1300^\circ C$ de temperatura, esto con el propósito que la materia prima que se esté utilizando ya sea carbón mineral o la biomasa puedan producir una reacción y generar gas sintético.

Parecido al método de reformado a vapor de agua, la Gasificación retira el CO_2 de toda la combinación ayudando a quitar las impurezas. Todo esto ayuda a que la transformación total sea de un 63%.

2.7.3 ELECTRÓLISIS

A principios del siglo XIX, el científico inglés Faraday, hizo un descubrimiento muy revolucionario, ya que mientras experimentaba con diferentes soluciones acuosas logro observar que estas tenían la característica de conducir corriente eléctrica, y las comparo con agua en su estado puro y las soluciones de otras no la conducían. Fue así que Faraday para poder diferenciarlas de otras soluciones las llamo electrolitos y a las que carecían de esta característica las nombro no-electrolitos.

En 1830 mediante extensa experimentación, Faraday comenzó a entender y presentar principios que hacían que concordara la cantidad de materia que reaccionaba dentro del proceso de electrolisis, ya sea la que se remueve o se deposita, logro observar que mientras más tiempo este circulando corriente a la solución, más iones separados se encontrarán, concluyó que la masa acumulada en el electrodo y masa atómica del mismo electrodo deberían ser iguales, pero inversamente proporcional en las valencias entre ion y electrodo. [34]

La electrólisis es un proceso por el cual se hace pasar corriente directa entre electrodos sumergidos en agua, esto para que los elementos que componen la molécula del agua se separen en hidrógeno y oxígeno. Tal y como se observa en la Figura 26.

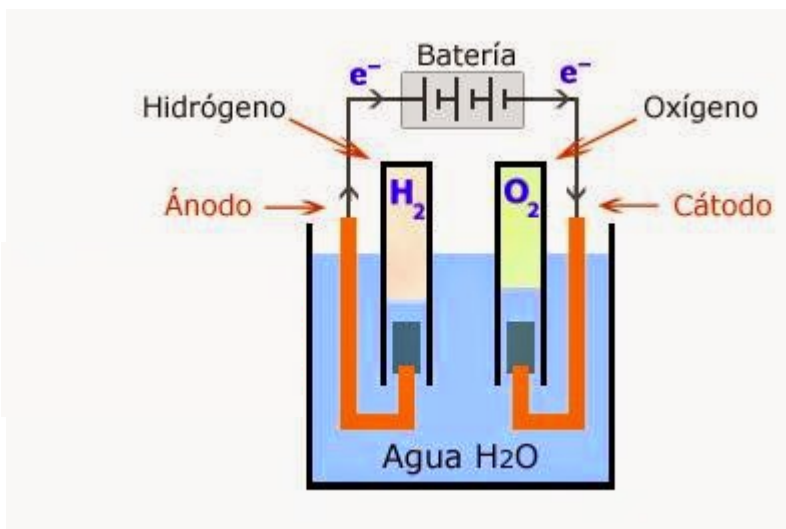


Figura 26. Proceso de Electrólisis.

Ya que se sabe que el agua al encontrarse en su estado puro es un aislante eléctrico, es necesario la combinación de otro elemento para hacerlo conductor, como es el caso de un electrolito. Durante esta reacción química, el hidrógeno se desprende de la molécula en el cátodo y por cada dos moléculas de hidrogeno se desprende una de oxígeno en el ánodo.

En promedio, este método tiene un rendimiento de un 65%, sin embargo, los electrolizadores más modernos han logrado presentar un rendimiento entre el 80 y el 85%. Fabricas pequeñas son las únicas que se han enfocado en este proceso de separación, ya que el costo del hidrógeno obtenido por electrólisis ronda entre 2,40 y 3,60 dólares por kilogramo. [34]

La electrólisis del agua al ser una reacción que se genera a partir de una fuente de energía almacenando parte de esta energía suele ser tomada como una fuente de energía secundaria.

Este proceso es muy común, ya que la electrólisis del agua se utiliza mucho para pequeñas aplicaciones del hidrógeno. De otro modo, cuando el uso del hidrogeno rebasa las pequeñas aplicaciones llevándolo a formas donde se requiere transformación de corriente se hace presente notar que solo se pueda aprovechar menos del 30% del contenido energético de la fuente de energía primaria.

Se presenta en [35] un método para obtener hidrogeno, considerado el más limpio, donde se analiza la electrolisis del agua para alimentar un automóvil. Pero se tienen que tener en cuenta que se requiere invertir una cierta cantidad de energía, ya sea calorífica o eléctrica, considerando que la energía obtenida será menor a la energía invertida.

Tabla 5. Comparación entre diferentes métodos de producción de Hidrogeno [36]

Método de producción	Consideraciones técnicas	Consideraciones medioambientales
Reformado con vapor de agua de gas natural	(+) Una tecnología con mucha investigación, por lo cual es la más utilizada a nivel industrial (-) el alto costo del gas natural	(-) la combustión del gas natural emana Contaminantes.
Gasificación de carbón	(+) proceso con bases muy bien fundamentadas cuyo costo es muy bajo (+) Este método puede ser alimentado con diferentes hidrocarburos o incluso residuos de refinería	(-) Genera una gran cantidad de emisiones
Electrolisis mediante energía eléctrica no renovable o renovable	(+) Disponibilidad de múltiples fuentes de energía (+) puede conectarse a una fuente de energía renovable como fuente principal, mientras se conecta a la red eléctrica para tenerla como respaldo de seguridad (-) Costo elevado para manufactura	(+) La utilización de energías renovables puede generar emisiones cero (-) al utilizar energía eléctrica proveniente de algún proveedor se puede estar generando emisiones de efecto invernadero

Gasificación de biomasa	(+) Utilización de casi cualquier residuo como materia prima (-) la tecnología para este tipo de proceso no existe en volumen, por lo cual su introducción en el mercado es escasa.	(+) al ocupar cultivos energéticos como materia prima podemos reducir las emisiones en casi cero (-) para generar hidrogeno mediante este proceso se necesita un gran volumen de biomasa o cultivo, por lo cual al transportar o cultivar podemos generar emisiones dañinas para el medio ambiente.
-------------------------	--	--

El uso de energías renovables (solar, eólica y geotérmica) para la producción de Hidrogeno se ha implementado alrededor del mundo. Todos estos métodos de producción se encuentran en etapas preliminares, con todas las pruebas que se realizan, se prevé muy pronto una disminución en el costo de producción del hidrógeno y conservarlo en una forma limpia y sostenible, es por ello la importancia de integrar más sistemas de producción híbridos basados en energía renovables. El principio de la electrolisis del agua es la construcción de un artefacto cuyo interior contenga dos electrodos (ánodo y cátodo) y agua con la combinación de un electrolito para hacer mejor conducción y así ayudar a la migración de los iones. [37]

Hoy en día se trabajan en dos áreas principales de investigación para la producción de hidrógeno por medio de la electrólisis. La primera área es a partir de una solución alcalina dentro de un reactor electroquímico equipado con barras de metal como electrodos. La segunda es la utilización de electrolizadores de membranas poliméricas de intercambio de protones. También llamadas celdas tipo PEM ("Proton Exchange Membrane). A continuación, se enlistan ventajas y desventajas de estos dos electrolizadores (Tabla 6) [3].

Tabla 6. Ventajas y desventajas de celdas electrolizadoras

Electrolizadores tipo PEM		Electrolizadores de soluciones alcalinas	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Tienen la capacidad de reaccionar bien durante la utilización de diferentes rangos de corriente y voltaje.	Son necesarios materiales costosos para la construcción de sus electrodos como titanio, iridio y rutenio.	Utilizan materiales de bajo costo.	Se tienen bajas eficiencias, alrededor del 40 al 70%.
Se genera hidrógeno y oxígeno de alta pureza, alrededor del 99.9%.	Requieren agua de alta pureza.	Operan con agua de alta pureza, residuales o superficiales.	Los valores de potenciales y corrientes se

			requieren más constantes.
Registra eficiencias altas, entre el 65% al 82%.	La utilización de electrolito es costosa, ya que se utiliza ácido sulfúrico.	La configuración no ofrece complejidad.	No pueden operar a altas presiones.
Pueden operar a altas presiones.	Tienen período de vida corta.	Tienen mayor durabilidad.	
La fabricación es de alto costo.		Ofrecen alta seguridad y bajo mantenimiento.	
		Ofrecen una buena pureza del hidrógeno obtenido 90%.	

Existen tres tipos de electrolizadores con los que se pueden contar, uno de ellos es el electrolizador de membrana de intercambio protónico, esta puede trabajar con altas corriente y altas diferencias de presión, no son robustas y su diseño puede variar de costo dependiendo su producción de hidrógeno, ya que la utilización de agua sumamente pura es requerida. Añadido a todo esto, se requiere la utilización del ion hidronio (protón H^+) por lo cual, se introduce una membrana polimérica (usualmente 13 Nafion®), la ventaja de todo esto la rapidez de trabajo, ya que al conectarla a una fuente de alimentación el gas empieza a fluir seguidamente. [37]

Existen de igual manera los electrolizadores de óxido sólido, los cuales tienen como característica el uso de Zirconia/Ceria dopada como electrolito, similar al electrolizador tipo PEM, tiene como medio de transporte al ion hidronio (protón H^+) llegando a temperaturas de 450 a 750°C, con el ion oxígeno (O^{2-}) se requieren temperaturas de 750 a 1000°C. Algo que hay que resaltar es que gracias a la utilización de un electrolito sólido, no es necesaria ningún material que se tenga que mover o algún líquido agresivo. Otra ventaja es la de usar energía térmica para reducir el consumo de electricidad. Usa agua menos pura y la salida de los gases es a alta presión, este tipo de electrolizador está en etapa de desarrollo, es por ello que aún no es comercial.

Por ultimo pero no menos importante se tienen los electrolizadores alcalinos, se les llama así ya que para operar necesitan una solución acuosa de hidróxido de potasio o sodio con una concentración desde el 5% hasta un 30%, para que tenga una operación optima en su producción, necesita alcanzar los 80 °C, mientras que la temperatura aumenta otros factores dentro de la reacción lo hacen también, como la conductividad, la eficiencia energética, se reducen sobrepotenciales de ánodo y cátodo, la única desventaja de estos electrolizadores es que rápidamente se degradarán los materiales del

electrolizador, por ello se tiene que emplear materiales más caros. Se recomienda temperaturas de trabajo alrededor de 70 °C - 80 °C cuando se utilice KOH y de 50 °C - 70 °C cuando el electrolito sea NaOH. Para reducir costos se pueden utilizar catalizadores (Pt o Pd) de materiales como el acero inoxidable o níquel para los electrodos. También cabe mencionar que el usar un pH muy alcalino producirá corrosión en los electrodos, esto puede traer desventajas, ya que la pureza máxima del hidrógeno que podamos obtener puede llegar a un 99.9% pero para esto tendríamos que requerir un proceso de purificación. [37]

La actividad de producción de hidrógeno en un reactor electroquímico puede ser calculada conociendo la cantidad de energía proporcionada respecto a la cantidad de energía que proveerá la cantidad de hidrógeno obtenido a partir de la ecuación 11. [38].

$$\text{Ecuación 11. } \mathcal{E} = \frac{mQ}{\int_0^t VI dt} 100\%$$

Donde: \mathcal{E} : Es la eficiencia.

m: Masa del Hidrogeno en g

Q: es la energía liberada del hidrógeno con valor de 142 kJ/g

V: es el voltaje suministrado al reactor en volts V

I: es la corriente que se suministra al reactor en amperes A

t: es el tiempo en segundos

2.7.3.1 ALMACENAMIENTO DEL HIDROGENO

La molécula de hidrógeno está formada por dos átomos y esta considera como la molécula más ligera y de menor tamaño, en condiciones normales (1 atmosfera de presión y 0°C) en un volumen de 1m cubico tan solo tenemos 90 gramos de hidrógeno.

Teniendo en cuenta lo anterior y como se aprecia en la Figura 27, el principal problema del hidrógeno es su bajo poder calorífico por unidad de volumen, pero el poder calorífico por unidad de masa es muy elevado Figura 28. [39]

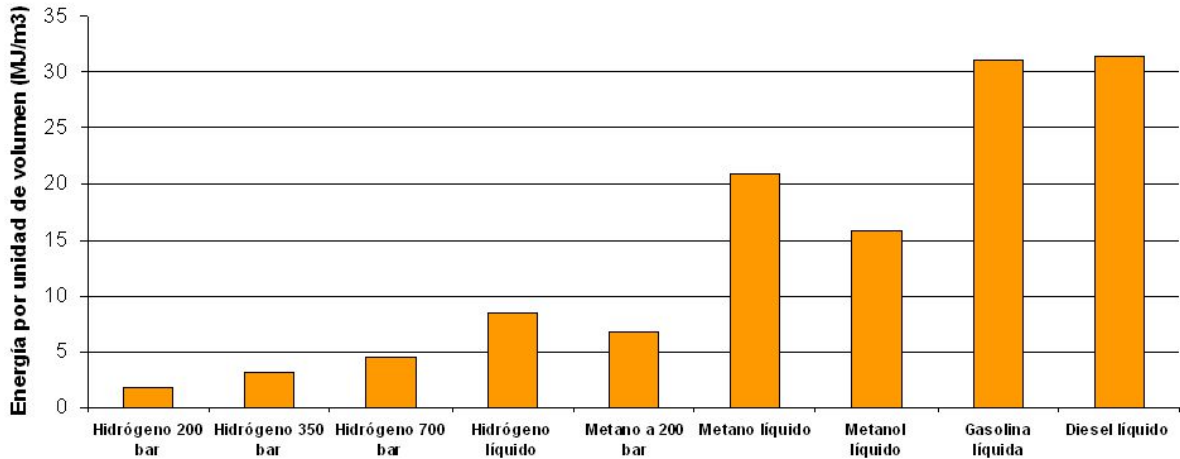


Figura 27. Energía por unidad de Volumen de distintos combustibles

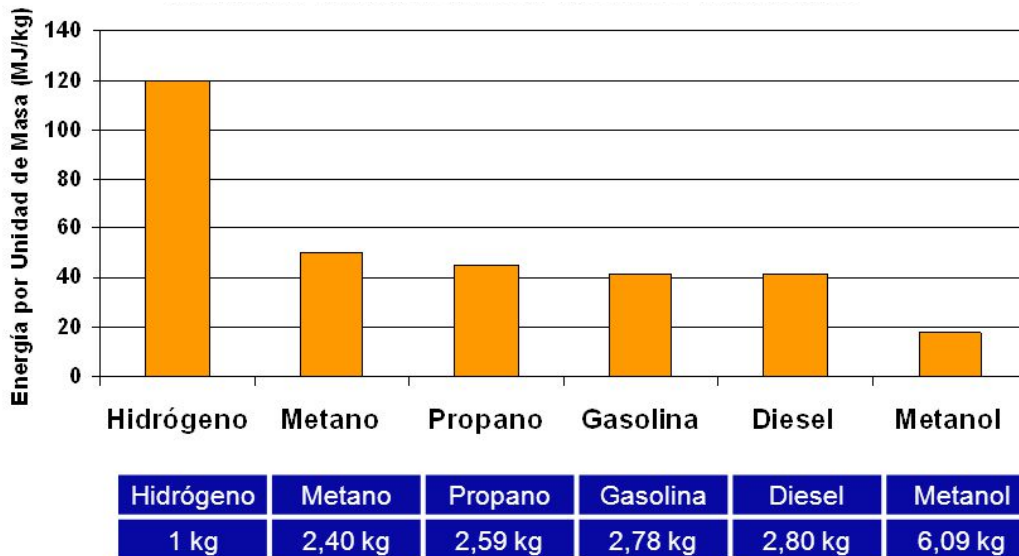


Figura 28. Energía por unidad de Masa de distintos combustibles

- Estado gaseoso (CGH₂): Se puede emplear en dos principales aplicaciones, estacionarias y móviles. Cuando se emplea en una aplicación estacionaria es necesario su almacenamiento en recipientes que soporten de 10L - 50L a 20.000 KPa. Para su aplicación móvil es preferible su transporte en dispositivos que soporten presiones de 20.000 a 70.000 KPa.
- Estado Líquido (LH₂): para que se pueda manejar es necesario que el hidrógeno se licue hasta alcanzar -253 °C, después se almacena en tanques o cilindros especiales conocidos como criogénicos estos son capaces de soportar una presión de 1.500 KPa. Entre menor presión

exista menor riesgo existirá. A pesar de ello se debe tener cuidado, ya que si la temperatura aumenta se producen pérdidas de sobrepresión.

- Estado sólido: En esta forma su almacenamiento se puede hacer en hidruros o se puede absorber en materiales como carbono ultra poroso [35].

2.7.4 ENERGÍA TÉRMICA

Este método produce hidrógeno convirtiendo energía térmica en energía eléctrica para poder llevar a cabo la separación de la molécula del agua en hidrógeno y oxígeno. Ya que se necesitan temperaturas altas, estas se pueden obtener de diferentes lugares como de plantas nucleares, hidrocarburos o sistemas de calentamiento solar. [3]

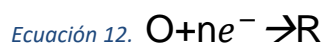
2.7.5 ELECTRÓLISIS A ALTA TEMPERATURA

Este método lleva a cabo la electrólisis con la variación de introducir calor al agua de una fuente externa y al igual que la electrólisis convencional se separan las moléculas del agua mediante corriente eléctrica, pero con la variante de agregar energía térmica al agua y así utilizar menor corriente eléctrica mejorando la eficiencia del proceso. Por otro lado, al utilizar una fuente extra para integrar más calor se considera que este proceso es ineficiente, por lo cual solo se lleva a cabo cuando existe un exceso de energía térmica en otros procesos.

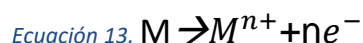
2.8 LA ELECTROCOAGULACIÓN.

La electroquímica tiene una muy amplia área en aplicación ambiental. En la última década se ha desarrollado la electroquímica ambiental que ejerce técnicas electroquímicas para sustraer contaminantes de gases, líquidos y suelos. La principal explicación de esta técnica se refiere a que los compuestos y átomos son o no tóxicos acorde al número de oxidación [36]. La electrocoagulación es comúnmente aplicada en centros de tratamientos para extraer residuos peligrosos e impurezas del agua. Este método comenzó a tener auge como un método efectivo para tratar aguas residuales en pequeñas y grandes cantidades desde un pueblo hasta nivel industrial. La electrocoagulación involucra la dispersión anódica de un metal, que suelen ser de metales no costosos. También se genera una reacción llamada hidrólisis el cual produce flóculos, los cuales sirven para perturbar, añadir las partículas disueltas e impregnan contaminantes que existan a su alrededor. La electrocoagulación es

un método que se ocupa con regularidad, ya que solo se necesitan dispositivos fáciles de manejar y controlar [40]. Se llevan a cabo reacciones heterogéneas en los metales mientras sucede la electrocoagulación y esta reacción se realiza en la parte del electrodo que entra en contacto con la solución. Ya que se lleva a cabo la electrocoagulación con corriente directa existe un ánodo y un cátodo donde se lleva a cabo la reducción y la oxidación, esta reacción se presenta en la ecuación 12.



Como se observa O es la parte positiva, el cual sirve como suministro de electrones y R la parte negativa donde llegan los electrones o también son las especies oxidadas y reducidas respectivamente. Los electrodos al ser de metal suelen reaccionar dentro del sistema como se observa en la ecuación 13.



En estos procesos electroquímicos se llevan a cabo una reacción en el ánodo y en el cátodo y no siempre suelen ser las mismas, ya que sus características suelen ser acorde a lo que existe dentro de la solución. El término electrocoagulación viene dado por la coagulación que se realiza en la oxidación electrolítica en el ánodo de sacrificio que por lo general es de un metal bastante económico como el hierro o el aluminio. [3]

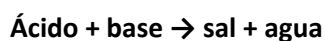
Si se quisiera conocer cuanto aluminio o hierro se produce en esta reacción, podríamos apoyarnos con la Ley de Faraday, ecuación 14.

$$\text{Ecuación 14. } n = \frac{it}{zF}$$

Donde i es la corriente en A, t es cuánto tiempo se induce corriente en s, F es la constante de Faraday ($F=96485 \text{ C/mol}$) y z es la carga del catión.

2.9 REACCIONES DE NEUTRALIZACION

Una reacción de neutralización es cuando interviene un ácido y una base, dando lugar a la formación de una sal con desprendimiento de agua:



Una solución acuosa es buena conductora de la energía eléctrica, esto es gracias a la solución donde los iones positivos y negativos sirven como electrolito.

Para poder saber cuan buena es la conductividad de la solución lo que podemos hacer es predecir el movimiento de los iones que se encuentran dentro.

Para que una solución se le considere **electrolito fuerte** Es necesario que al mezclarse se separe enteramente el compuesto iónico, de lo contrario, cuando la solución no es homogénea se le considera un **electrolito débil**, ya que no presenta una buena conductividad, notándose la falta de iones. Un ejemplo de electrolitos fuertes son el NaCl, HCl, H₂O (potable), etc.

Cuando la cantidad de ácido en una disolución es una incógnita y se necesita saber la cantidad que existe, se puede recurrir a balancear la base con el ácido, para hacer esto se debe agregar la base de la solución de a poco hasta neutralizar la disolución. Una vez que la disolución se encuentre neutralizada, y ya que sabemos la cantidad de base que neutralizo la disolución, la cantidad de ácido que se encontraba en un principio se calcula fácilmente.

Para realizar la neutralización se debe tener en cuenta la “**ley de equivalentes**”, que nos dice que “el número de equivalentes del ácido debe ser igual al número de equivalentes de la base”:

$$\text{n}^{\circ} \text{ equivalentes Ácido} = \text{n}^{\circ} \text{ equivalentes Base}$$

Una Normalidad es un principio que los equivalentes siguen para poder determinar cuánto soluto existe en un disolvente, por lo cual tenemos que:

$$N = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de equivalentes de soluto}}{\text{Litros de disolución}}$$

Donde: **nº equivalentes de soluto = V disolución * Normalidad**

Si asignamos a la normalidad en la solución acida y básica NA y NB respectivamente, podemos deducir que VA y VB, son el volumen de las soluciones ácidas y básicas respectivamente:

$$\text{NA.VA} = \text{NB.VB}$$

Notamos que en todas las reacciones de neutralización vemos cumplir esta expresión. La misma forma determina NA o NB, esto siempre que la disolución con la que la neutralizamos es conocida, porcentajes equitativos son añadidos en la disolución a calcular, al tener todo en un recipiente, se va añadiendo un colorante para poder observar la coloración y así medir cuando ya exista la neutralización.

Cuando la solución ácida y la base son equitativas es conocido como **punto de equivalencia**. Hay que decir que este punto puede resultar práctico, o teórico.

2.10 APLICACIONES DEL HIDRÓGENO

La utilización del hidrógeno se ha extendido, ya que gracias a él se pueden fabricar diferentes compuestos como son: amoníaco, peróxido de hidrógeno, ácido clorhídrico, alcohol metílico, y otros. Si este gas es combinado con metales, forma hidruros metálicos. Otra característica del hidrógeno es su facilidad para reaccionar con diferentes elementos como el oxígeno, azufre, cloro y formar compuestos saturados mediante la combinación de compuestos orgánicos insaturados.

Es usado en la hidrogenación catalítica de distintos tipos de grasas, se emplea como agente reductor para que pueda retirar el oxígeno en distintos gases o en óxidos metálicos, el proceso es muy sencillo, al combinarse con el oxígeno forma agua, por lo cual es más fácil retirar agua y así poder tener el metal o el gas en estado puro.

El hidrógeno en su estado gaseoso se combina con oxígeno gaseoso y puede alimentar un soplete para cortar, fusionar y soldar metales, ya que la combinación de estos dos elementos es capaz de crear una llama de muy alta temperatura. Además, se emplea en la combustión catalítica del hidrógeno para quemadores y calentadores. Otro uso del hidrógeno es emplearlo para reducir el azufre que contienen los combustibles, y así minimizar gases contaminantes.

Uno de los principales usos que se están investigando sobre el hidrógeno es como almacenador de energía, ya que mediante la electroquímica se ha llegado a generar energía eléctrica con la ayuda de pilas de combustible, para poder alimentar diferentes medios de transporte o eficientizar fuentes renovables por su tan notoria desventaja en la producción de energía. El hidrógeno al utilizarse en motores de combustión interna, mejora la eficiencia de la conversión de energía en comparación con la gasolina.

2.11 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Se le conoce como celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte energía química en energía eléctrica, es decir, puede producir electricidad a partir de un combustible y de oxígeno.

En comparación con las baterías y acumuladores, las celdas de combustible son diseñadas para proveer de energía siempre y cuando el abastecimiento de las sustancias que se consumen se esté realizando

de manera constante, la estabilidad de los electrodos con los cuales cuenta el dispositivo es muy buena, por lo que las celdas no se descargan.

Una celda de combustible alimentada con hidrógeno, el gas hidrógeno es introducido en el ánodo y oxígeno, en el lado del cátodo; existen varios tipos, tanto tecnologías comerciales como en investigación.

2.12 ELECTROQUÍMICA

La Electroquímica es un campo de mucha importancia dentro de la Química general o Química física. El objetivo primordial de la Electroquímica es la investigación de los procesos en los cuales se puede observar una transformación de energía química en eléctrica y, viceversa, de la energía eléctrica en energía química. Cuando se habla de la electroquímica existen diferentes variantes y aclaraciones que se tienen que presentar:

Actualmente, la energía que se obtiene en su mayoría es a partir de energía química la cual se obtiene del carbón. El proceso se basa en convertir el carbón en alimento para la combustión lo que da paso al movimiento de turbinas lo que transforma energía química en energía mecánica y, finalmente, ésta en energía eléctrica.

Se trata de un proceso cuya energía química se ha transformado en eléctrica dando diferentes fases. Es por ello que su estudio no entra en el campo de acción de la Electroquímica. Por el contrario, la producción inmediata de energía eléctrica a partir de carbón \ oxígeno, es un proceso en el que, ha puesto interés la electroquímica.

De igual manera, para poder diferenciar los procesos en los cuales se transforma la energía eléctrica en química y tenerlos en cuenta como pertenecientes en el área de la Electroquímica, tenemos que observar si se efectúa esta transformación de modo inmediato.

Se pueden considerar como procesos electroquímicos todos los procesos químicos que se observan en el paso de la corriente eléctrica por líquidos, como pueden ser soluciones, mezclas de fusión o incluso algunas sustancias sólidas, esto como resultado inmediato de dicho paso de corriente. Estos fenómenos son conocidos como electrólisis, el cual se le debe el paso de corriente eléctrica a una solución llamada medio "electrolito", preferentemente en el caso de soluciones acuosas.

Existen procesos electroquímicos clasificados como:

1. Electrólisis = Transformación de energía eléctrica en energía química.

2. Galvanismo = Transformación de proceso químico a energía eléctrica.

Si algún sistema no proporciona ni recibe energía, es decir, su contenido energético es estable e invariable, se puede observar por la ley de la Conservación de la energía, o Primer principio de la Termodinámica, esta fue descrita por primera vez por Robert Mayer (1842). Esta ley nos describe que no existe sistema que pueda desaparecer energía en la nada ni crearse de la nada, es decir, toda energía que entra a un sistema es la misma cantidad de energía que sale. Es por esto que es imposible que exista una máquina que sin recibir energía pueda rendir continuamente.

De igual manera, en todos los procesos químicos se puede comprobar el principio de la conservación de la masa (o sea de los elementos químicos) que fue reconocida primeramente por A. L. Lavoisier (1774) esta se puede citar como:

“En cualquier proceso químico la masa se conserva, esto es, la masa total de los reactivos es igual a la masa total de los productos que puede verificarse en un sistema encerrado, siempre que a este sistema no se le agregara ni se le sustrajera masa.” [41]

2.13 CONDUCTIVIDAD DEL AGUA

Podemos definir a la conductividad como el rasgo que tiene un material de oponer la menor resistencia al paso de corriente eléctrica. Cuando hablamos de la conductividad en el agua se considera que es importante el conocimiento sobre el agua a tratar. Para el caso del agua pura, es decir solo H₂O, es un aislante natural, ya que por su pureza no conduce la electricidad. Sin embargo, el agua con la que tenemos contacto en el día a día como lo es el grifo, lluvia, mar no es agua pura, esta agua contiene sales combinadas con ella en diferente concentración. Estas disoluciones tienen la capacidad de transportar la energía eléctrica. Es por ello que si entendemos la relación que existe entre continuidad y la salinidad en el agua podemos darnos cuenta que al hablar de conductividad se habla sobre la cantidad de sales que existen en el agua.

Para poder medir la conductividad se utilizan resistencia/unidad de longitud como unidades de medida. Existen diferentes rangos de medición, por lo general se rigen en dS/m (deciSiemens por metro), mmhos/cm (milimhos por centímetro) y mS/m (miliSiemens por metro).

Podemos definir como conductividad específica al producto de la conductancia por la constante de la célula. Su unidad es el Siemens/centímetro (S/cm.) o los submúltiplos miliSiemens/cm y micro Siemens/cm [42]

2.13.1 CÓMO MEDIR LA CONDUCTIVIDAD

Para conocer la medición sobre la salinidad o conductividad que existe en el agua se puede medir con diferentes medidores de conductividad EC que hoy en día están presentes en el mercado. El principio de todos estos medidores, es medir con un sistema amperimétrico o potenciométrico y así medir la corriente o la potencia respectivamente. Así mientras mayor sea la corriente o potencia presente significara una mejor conductividad midiendo en rangos de siemens por centímetro (s/cm) o miliSiemens por centímetro (ms/cm).

Para entender mejor esto, podemos decir que, al medir la conductividad de cualquier tipo de agua, obtendremos una medición sobre el total de solidos disueltos (S.T.D) con respecto a los minerales que se encuentran en el agua. Es por ello que al diluir más sales dentro de la muestra de agua medida, significara un mayor número de iones que ayudaran a la conductividad, por lo cual podemos definir que la presencia de los sólidos disueltos dentro del agua se puede calcular a partir de la conductividad que exista en ella.

Para conocer la cantidad de salinidad o total de sólidos disueltos (S.T.D. indicado en p.p.m.) necesitamos medir la conductividad específica (expresada en micro siemens dividido por centímetro), multiplicado por el factor F que esta dado por la muestra y que de forma general para agua natural se toma 0,6 (oscila entre 0,5 y 0,75).

La medición de la conductividad es de gran utilidad, ya que si encontramos una conductividad elevada indica gran cantidad de sales y, por tanto, una velocidad de corrosión más elevada, trayendo un fenómeno donde se arrastran más sólidos produciendo **erosión-corrosión**. Es por esto que la salinidad debe de ser un valor no tan alto y esto dependerá de cuál sea el fin deseado.

Igualmente, existen aparatos de medida, llamados **medidores de sólidos disueltos**, TDS que proporcionan el valor directamente de sólidos disueltos. Estos dispositivos miden la conductividad y se rigen por un factor que esta otorgado de fabrica para poder otorgar la medición de los sólidos disueltos en ppm.

Teóricamente, la medición de los TDS es evaporar toda una muestra de agua y pesar los sólidos que queden. Un ejemplo serio tomar una muestra de 500 mL de agua y evaporarla hasta que queden todos los sólidos, se pesan esos sólidos y si el peso es de 100mg sabremos que teníamos en el agua 100ppm de TDS.

Como se observó, es un método bastante engorroso e ineficiente, por lo cual, si conocemos la conductividad que existe en una disolución podremos conocer su contenido en sales, es por ello que los dispositivos que miden los TDS son muy prácticos y fáciles de operar, y estos aparatos al medir la conductividad nos proporciona la medición de los TDS.

2.13.2 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.

Como se explicó anteriormente, la conductividad es la inversa de la resistencia, por lo cual, su unidad de medida es el siemens por centímetro (s/cm) o milisiemens por centímetro (ms/cm). Ya que el medidor nos dice la medida de la conductividad, el mismo medidor realiza una fórmula internamente convirtiendo la conductividad a ppm, al utilizar un factor de conversión que se establece desde fábrica.

El factor de conversión varía en función del fabricante, si el dispositivo es americano 1ms/cm será igual a 500 ppm, si es europeo 1ms/cm equivaldrá a 640 ppm y si es australiano 1ms/cm será igual a 700 ppm. Por lo cual dependiendo de la zona se recomienda que se adquiera un dispositivo para que los datos que se obtengan vayan acorde a las sales que existan en esa región. Ahora bien, si no se sabe de donde proviene el dispositivo con el que podemos calcular el factor de conversión:

$$\text{Ecuación 15. Factor de conversión} = \text{ppm/ec}$$

Nota, es importante poner EC en μs .

2.13.3 MEDIDAS DE CONDUCTIVIDAD

La cantidad de sales presentes en el agua es proporcional a la conductividad eléctrica, es por ello que no todas las muestras de agua tienen el mismo nivel de conductividad. Si la muestra cuenta con mucha o poca salinidad mayor o menor será su conductividad. Las diferentes muestras de agua y su conductividad se presentan en el siguiente listado:

Agua pura: 0.055 $\mu\text{S/cm}$

Agua destilada: 0.5 $\mu\text{S/cm}$

Agua de montaña: 1.0 $\mu\text{S/cm}$

Agua para uso doméstico: 500 a 800 $\mu\text{S/cm}$

Máx. para agua potable: 10055 $\mu\text{S/cm}$

Agua de mar: 52 mS/cm

Ya que se conoce la conductividad podemos obtener la salinidad, esto es el producto de la conductividad y utilizando un rango para el factor de entre 0.6 o 0.7 y así poder obtener la medición de la salinidad en mg/L. por lo cual la salinidad quedaría como:

Agua pura: 0,033-0,0385 mg/L

Agua destilada: 0,3 – 0,385 mg/L

Agua de montaña: 0,6 – 0,7 mg/L

Agua para uso doméstico: 300 – 560 mg/L

Máx. para agua potable: 6033 – 7033 mg/L

Agua de mar: 31,2 – 36,4 g/L

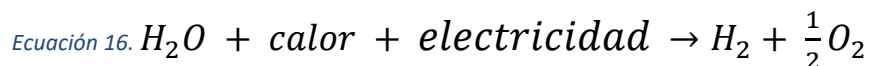
Otro factor importante es la densidad, en la cual se toma de referencia 1 atm y 4°C. Sabiendo esto, el agua pura cuenta con una densidad de 1000Kg/m³. Este factor al igual que la cantidad de sal presente en el agua son factores que están arraigados a la presión y la temperatura. Generalmente, la temperatura es más notoria en aguas superficiales, notando que al llegar a 20°C el agua tiene una densidad de 996Kg/m³. Cuando se estudia el agua de mar y se encuentra con una salinidad de entre 31.2-36g/L, podemos observar una densidad variante entre 1025-1027Kg/m³

2.14 ELECTROLISIS (REACCIONES QUÍMICAS)

El agua se ha caracterizado por ser una sustancia estable de la naturaleza, la separación de su molécula en hidrógeno y oxígeno es difícil, ya que esta reacción no espontánea y conlleva un gran consumo de energía.

En el proceso de electrólisis la molécula del hidrógeno cambia de 1+ a cero, lo que nos hace saber que ganamos electrones y se dice que sufre entonces una reducción. Caso contrario del oxígeno, ya que este cambia de 2- a cero, por lo cual, se concluye que se perdieron electrones por lo cual el oxígeno se oxida. Este tipo de reacción química se conoce como reacción redox (oxidación–reducción).

Como nos indica [43] La reacción de electrólisis del agua puede expresarse de la siguiente manera:

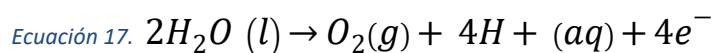


Esto indica que, por cada mol de agua ingresada, se obtiene un mol de hidrógeno y medio mol de oxígeno.

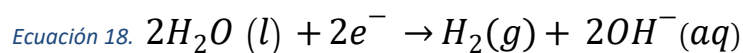
Al inducir corriente en el agua no sucederá nada, esto a menos que se añada un electrolito fuerte (por ejemplo, hidróxido de sodio NaOH), esto con el fin de aumentar la conductividad del agua mejorando de esta forma la transmisión de corriente. Se conecta la fuente de energía a dos electrodos, el polo positivo es conocido como ánodo y el negativo como cátodo.

La reacción donde la pérdida de 4 electrones en dos moléculas de agua se presenta es en el ánodo, es por ello que se observa una disociación con 4 cationes H⁺ y una molécula de oxígeno gaseoso.

Ánodo (oxidación):



Cátodo (reducción):



Esta no es una reacción natural. Para que se pueda llevar a cabo, se requiere de una fuente de energía eléctrica de CD externa. De igual manera, para que se pueda llevar a cabo tal reacción, necesitamos de una celda electrolítica, que mediante el ingreso de un flujo de corriente se provoca una reacción electroquímica. Donde el hidrógeno que se obtiene durante este proceso conocido como electrólisis del agua es de alta pureza, pero ya que necesitamos una fuente de energía externa, el costo de producción es elevado.

2.15 LEY DE FARADAY

Se sabe que el flujo de electricidad a través de un conductor es gracias a el transporte de electrones de un punto donde el potencial es mayor a otro donde el potencial es menor. Ahora bien, dependiendo de cómo se lleve el transporte de los electrones es como se pueden clasificar los conductores de electricidad: a) conductores metálicos o electrónicos o b) conductores iónicos o electrolíticos, también llamados conductores de primera y segunda clase, respectivamente.

Cuando los conductores iónicos conducen electricidad, esta acción va acompañada también de materia. Cuando los iones son los que se mueven, estos son los que transportan la corriente eléctrica,

sin embargo, para que los electrones se puedan mover de forma más ágil es necesario observar diferentes variables como son, la carga que ingresa al agua y la viscosidad del líquido. Un factor conveniente en comparación con los conductores de primera clase es el aumento de temperatura, ya que cuando esta aumenta la conductividad electrolítica también.

Cuando los iones transportan electricidad en la cara de los electrodos dentro de una disolución acuosa, esto produce una reacción química llamada electrolisis. M. Faraday (1834) estudio esto llevándolo a formular dos leyes fundamentales que dicen:

1. Dependiendo de la electricidad que se incida en cada electrodo, es la cantidad de reacción química que sucede
2. Mientras la incidencia de electricidad sea la misma durante todo el tiempo, la sustancia que dé como resultado en cada electrodo, vendrá a ser proporcional a su equivalente electroquímico.

El equivalente electroquímico es igual al peso atómico dividido por la carga del ion. Se necesita una cantidad de electricidad necesaria para poder hacer reaccionar a un equivalente electroquímico, este es el Faraday, cuyo valor es de $(F) = 96487$ culombios.

Ya sabiendo lo anterior, se representa a la ecuación de Faraday así:

$$\text{Ecuación 19. } m = \frac{M \cdot I \cdot t}{Z \cdot F}$$

Donde:

m: Masa del gas [g]

M: Peso molecular

I: Corriente eléctrica [A]

t: Tiempo [s]

Z: Electrones intercambiados

F: Constante de Faraday 96487 [C/ kmol]

Aunque esta fórmula también expresa la cantidad del flujo de gas a calcular.

2.16 ECUACIÓN DE ESTADO

El estado de una cantidad de gas es calculado gracias a su presión, volumen y temperatura. La relación de estas dos, forma una ecuación donde la temperatura está en unidades kelvin, definida por el sistema SI de unidades.

$$\text{Ecuación 20. } PV = nRT$$

Donde:

P: Presión absoluta

V: Volumen

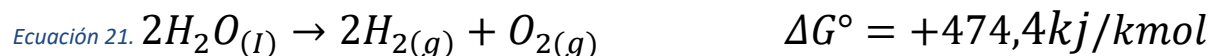
n: Moles de gas

R: Constante universal de los gases ideales 0,082

T: Temperatura

2.17 DETERMINACIÓN DEL VOLTAJE MÍNIMO PARA INICIAR LA ELECTRÓLISIS

El proceso de separación de hidrogeno y oxigeno del agua es un proceso no espontaneo, es decir, se requiere de un agente externo para producir el cambio o en este caso la reacción, por lo cual es necesario una fuente de energía eléctrica proporcional al cambio de energía libre de Gibbs, cuyo valor en un medio estándar es de:



Por tanto, cuando la molécula de agua se separa por una reacción electroquímica es necesario un mínimo de potencial eléctrico y aplicarlo en la celda electrolítica (equilibrio) esto para poder someter al valor de ΔG dentro de los valores dados. La siguiente ecuación nos expresa cual es el potencial de celda requerido con forme a la relación de la energía libre de Gibbs.

$$\text{Ecuación 22. } \Delta G = -\eta_{mol} * F * E_{equilibrio}$$

Así, el potencial eléctrico proporcionado por la fuente de energía externa, generará el paso de electrones del punto positivo (ánodo) hasta llegar al punto negativo (cátodo) a través de un circuito eléctrico externo.

En la reacción de reducción donde se gana electrones se genera en la parte positiva (cátodo), por lo tanto, la oxidación donde se pierden electrones se produce en la parte negativa (ánodo).

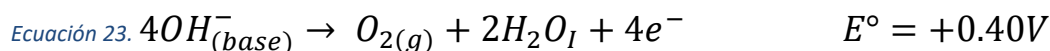
Para no caer en un desbalance de cargas en el sistema, se necesita la existencia de un transporte electrónico dentro de la celda electrolítica. Este transporte se consigue cuando se utiliza un electrolito que ayuda al aporte de iones con carga negativa y positiva.

Los aniones se encargan de llevar en dirección del ánodo todas las cargas eléctricas negativas y los cationes llevan hacia el cátodo todas las cargas eléctricas positivas, por lo cual se completa el circuito de corriente.

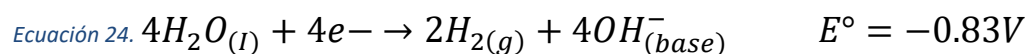
Para poder llevar a cabo la electrolisis del agua, es necesaria la mezcla de algún elemento para poder aumentar la conductividad del agua, en este caso se le mezcla un electrolito.

Ya que se realiza la mezcla con un electrolito se pueden observar las siguientes reacciones en los electrodos:

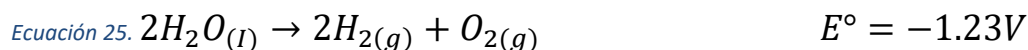
Ánodo (oxidación):



Cátodo (reducción):



Reacción global:



2.18 MINIMO DE VOLTAJE PARA EFECTUAR LA ELECTRÓLISIS

La tensión que se encuentra dentro de una celda electrolítica es el voltaje que se registra al medir entre los electrodos ánodo y cátodo. El voltaje mínimo que exista en la celda (E_{celda}) corresponde a la suma de diferentes caídas de tensión el total de estas debe ser suficiente para producir la reacción.

$$\text{Ecuación 26. } E_{celda} = E_{equilibrio} + \eta$$

Donde:

$$\text{Ecuación 27. } \eta = \eta_c + \eta_a + \eta_{\Omega} + \eta_{sist}$$

$E_{\text{equilibrio}}$: El potencial de equilibrio termodinámico de la reacción redox que se produce en la electrolisis se calcula a partir de los potenciales de equilibrio del ánodo y del cátodo. Este parámetro en condiciones estándar es:

$$\text{Ecuación 28. } E_{\text{celda}}^{\circ} = E_{\text{equilibrio}}^{\circ} + \eta_c + \eta_a + \eta_{\Omega} + \eta_{sist}$$

El valor de estos sobrevoltajes depende de diversas características dentro del funcionamiento del equipo, como son: componentes químicos de los materiales (electrodos, electrolito, etc.), características físicas y geométricas de estos, temperatura del agua y presión en el recipiente, pureza del agua y, la corriente que se haga pasar por los electrodos. [44]

2.19 EFICACIA DE POTENCIAL

La relación entre el potencial de equilibrio termodinámico y el potencial de celda unitario se le conoce como la eficacia de potencial Φ_E :

$$\text{Ecuación 29. } \Phi_E = \frac{E_{\text{equilibrio}}}{E_{\text{celda}}}$$

Este parámetro brinda el valor de la proporción del potencial que tiene que ser aplicado, esto para poder vencer el conjunto de resistencias eléctricas del sistema electrolítico, cuyos valores no representan forzosamente el potencial de equilibrio de la reacción redox.

La eficacia de potencial resulta entonces ser un valor muy útil en ingeniería electroquímica, ya que se puede mejorar un equipo de electrolisis: al reducir las resistencias internas del equipo como en los electrodos o en el electrolito y así aumentar la eficacia del potencial dentro de este.

2.20 EFICACIA DE CORRIENTE

La eficacia de la corriente (Φ_I) es la relación de todas las cantidades de corriente que están presentes al llevarse a cabo la reacción, donde está la corriente que se consume en la reacción (la cual se calcula mediante la ley de Faraday) y la corriente total que está presente en el circuito.

$$\text{Ecuación 30. } \Phi_I = \frac{I_{\text{consumida}}}{I_{\text{circuito}}}$$

Este parámetro brinda información sobre la corriente que circula por el sistema sin estar ligado en el proceso electroquímico. Por lo tanto, si se tiene una densidad de corriente baja, mejorará la distribución de la misma en el equipo, por lo que se evita la creación de rutas en los electrodos y se obtiene una mejor ganancia de la reacción.

2.21 ESTABILIDAD QUÍMICA

La estabilidad química se establece gracias a la resistencia que opone el material a la corrosión y a la erosión, dicho en otras palabras, es la capacidad del material de aguantar el efecto químico corrosivo y el efecto de deterioro físico producido por variables en el sistema.

En cualquier reacción Química, para obtener el valor de corrosión nos guiamos por la variación de la energía libre de Gibbs (ΔG). Ya que mientras se mantenga el valor de ΔG mucho menor a cero, se notará una mayor predisposición para que se efectúe la reacción de oxidación o corrosión.

Hay que tener en cuenta que la tendencia a la corrosión no es una medida de la velocidad de reacción. Un gran valor negativo ΔG puede que no esté acompañado por una elevada velocidad de corrosión, pero cuando ΔG es positivo podemos concluir que, bajo las condiciones particulares descritas, la reacción no se llevará a cabo. Si ΔG es negativo, la velocidad de reacción puede ser rápida o lenta, y esto dependerá de diversos factores.

2.22 SENSOR DE CORRIENTE ACS712 (30A)

El sensor de corriente ACS712 es un dispositivo que cuenta con un sensor de efecto Hall, este sensor es el corazón del dispositivo, ya que mediante el campo magnético que produce el paso de los electrones se puede conocer la corriente. El dispositivo puede dar un voltaje como respuesta a la corriente leída que va de 0 a 5V, y este voltaje dependerá del modelo que se ocupe, ya sea ACS712-05A, ACS712-20A o el ACS712-30A, ya que cada modelo soporta diferentes mediciones de corriente que van de 5, 20 o 30 amperios.



Figura 29. Sensor De Corriente ACS712

Este sensor trabaja con 5v, por lo cual se puede ocupar con el Arduino UNO. Cuenta con una clema de 2 patas que es donde se introduce el cable de corriente que se leerá y su salida para continuar su camino, además cuenta con 3 pines en la parte frontal que es la entrada de alimentación y la salida analógica.

2.23 TERMOPAR TIPO K Y MODULO MAX6675

Un sensor cuyo propósito es medir la variación de temperatura se le conoce como termopar. Su fabricación se basa en la unión de dos metales diferentes, cuya unión se hace en un extremo. El funcionamiento de este es básicamente la variación de un voltaje proporcional a la variación de la temperatura en la unión de los dos metales cuando esta varia. Existen diferentes tipos de termopares, los cuales tienen características diferentes como son combinaciones de metales o calibraciones para adaptarse a diferentes aplicaciones. Los tres más comunes son las calibraciones tipo J, K y T. El termopar tipo K es el más usado debido a su amplio rango de temperaturas y bajo costo. [45]

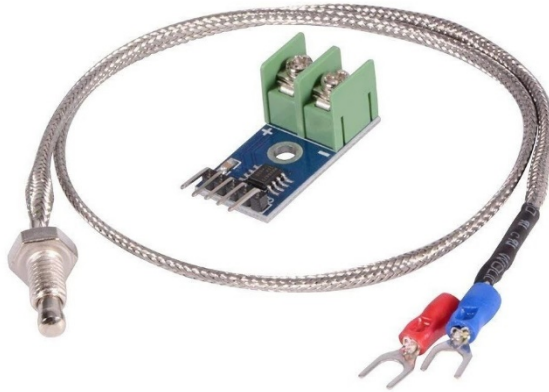


Figura 30. termopar y modulo MAX6675

El MAX6675 es un dispositivo capaz de convertir una señal Análoga a digital y está especializado para trabajar con termopares tipo K. Con este módulo se puede conectar de manera más practica un termopar a cualquier microcontrolador a conectado a un interfaz SPI unidireccional. Con este módulo se puede amplificar, compensar y convertir a digital el voltaje generado por el termopar, por lo cual, se puede trabajar con cualquier microcontrolador.

2.24 SENSOR DE FLUJO D6F-A3 OMRON

Es un sensor de flujo de gas que tiene como características ser delgado y liviano, cuenta con una ruta de flujo capaz de proporcionar una alta precisión y rápida respuesta. Puede ser alimentado por un rango de 10.8 a 26.4 VDC, Cuenta con un rango de velocidad de flujo de 0 a 3 L/min, su salida varía según la lectura del gas dando una señal de 0 a 5 VCD



Figura 31. sensor de flujo

2.25 MEDIDOR TDS DE MANO

Un medidor TDS por sus siglas en ingles Total dissolved solids, es un medidor que proporciona la cantidad de solidos disueltos en líquidos en partes por millón, esta medición nos sirve para poder comer el nivel de dureza del agua y la conductividad eléctrica que existe en este. Existen diferentes modelos y tipos en el mercado, pero el principio de funcionamiento es el mismo en todos ya que

mediante dos electrodos en que se introducen en el agua pueden saber cuánta conductividad existe, el modelo con el que se trabajara es el TDS-3, las características de este modelo por las cuales se consideró su adquisición son las presentadas en la tabla 7.



Figura 32. Medidor TDS de mano

Una característica que era necesaria saber era el factor de conversión EC a TDS, ya que mediante este dato podremos calcular la conductividad eléctrica del agua.

Tabla 7. características del Medidor TDS

Rango de TDS	0 - 9990 ppm (mg / L)
Medición de Temperatura	0 - 80 grados Celsius
Resolución:	0-999: 1 ppm; 1000-9990: 10 ppm (indicado por un icono 'x10')
Precisión	+/- 2%
Factor de conversión de EC a TDS	0.5

2.26 SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO

Como nos dice [46] Un sistema de control automático es la unión de distintos elementos formando una configuración denominada sistema conectados entre sí, de tal manera que el arreglo resultante es capaz de un control autónomo. Un sistema o algún componente de este que pueda ser controlado, se le aplica una señal $r(t)$ como entrada para obtener una respuesta y/u obtener una salida $y(t)$, gráficamente se puede representar como lo muestra la figura 33.

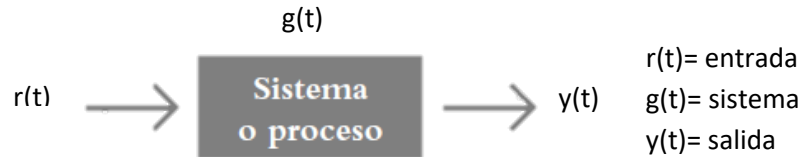


Figura 33. entrada y salida de un Sistema

2.27 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Existen dos tipos de sistemas de control, los sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado o también conocidos como sistemas no automáticos y sistemas retroalimentados o automáticos respectivamente.

Sistema de control de lazo abierto.

Cuando hablamos de este sistema, la entrada y la salida son prácticamente independientes, ya que la salida por lo general depende de un intermediario como puede ser un dispositivo que mantenga la tensión o algún otro que transforme la energía, esto con el fin de poder recibir una respuesta correcta (Figura 34).

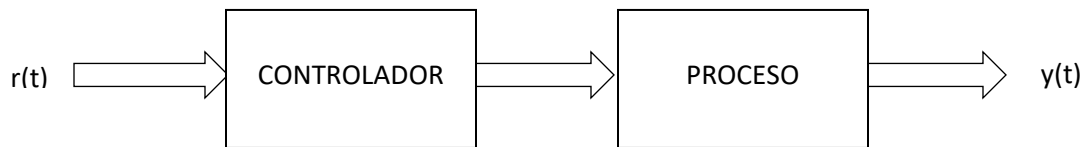


Figura 34. Sistema de control de lazo abierto

Sistema de control de lazo cerrado.

Este sistema contrariamente al de lazo abierto tiene a su acción de control dependiente de la salida. Ya que este sistema requiere de un sensor que detecte la respuesta real para compararla con una referencia. Por esto, un sistema que compara su respuesta se le denomina de lazo cerrado o sistema retroalimentado. La expresión *retroalimentar* viene dada de comparar; en estos sistemas, la salida que se obtiene se compara con respecto al comportamiento deseado, de este modo, si el sistema requiere una acción correctora la aplica al proceso para poder controlarlo. La figura 35 muestra la configuración de un sistema retroalimentado.

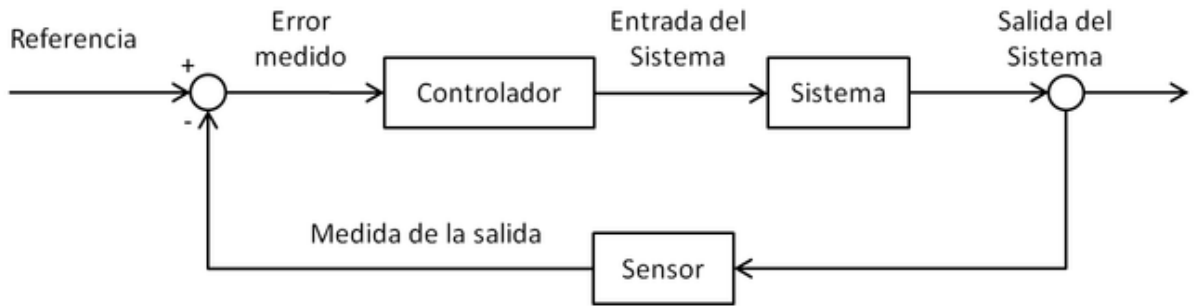


Figura 35. Sistema de control de lazo cerrado

2.28 TIPOS DE CONTROLADORES

Un controlador es un componente que se incorpora al sistema original, esto para mejorar sus características de funcionamiento y con el fin de alcanzar las características del diseño, tanto en régimen transitorio como en estado estable.

Para poder empezar a modificar las características de respuesta de los sistemas se tiene que empezar con corregir la ganancia. Hay que resaltar que, por lo general al incrementar la ganancia se obtiene mejora en el funcionamiento en estado estable, sin embargo, se produce una pobre respuesta en régimen transitorio y viceversa. Es por esto la necesidad de agregar elementos a la simple variación de ganancia, donde se pueden observar diversos tipos de controladores: Control proporcional (P), Control integral (I), Control derivativo (D).

Estos controladores tienen la característica de poder trabajar en conjunto, por lo cual, se pueden crear combinaciones como son:

- Control proporcional-integral (PI).
- Control proporcional-derivativo (PD).
- Control proporcional-integral-derivativo (PID).

2.28.1 CONTROL PROPORCIONAL (P)

En la ecuación 31 se observa que, un control es de tipo proporcional cuando la salida del controlador $v(t)$ y el error $e(t)$ son proporcionales:

$$\text{Ecuación 31. } v(t) = K_p e(t)$$

Pasándolos al dominio s:

$$\text{Ecuación 32. } V(s) = K_p E(s) \therefore G_c(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = K_p$$

Usualmente, en pequeñas variaciones de ganancia, es capaz de establecer un comportamiento aceptable en régimen transitorio, pero en estado estable la respuesta muestra un valor de error muy alto. Para poder compensar el error es necesario el aumento de la ganancia, ya que al hacer esto se obtiene una respuesta más estable con respecto a la respuesta transitoria. Con esto se observa que el control P es fácil de ajustar e implementar, raramente está presente por si solo en un dispositivo de control, por lo general es acompañado de algún otro elemento.

2.28.2 CONTROL INTEGRAL

La ecuación 33 nos muestra que si la integral del error $e(t)$ es proporcional a la salida $v(t)$, esta proporcionalidad será equivalente a decir que es un control de tipo integral:

$$\text{Ecuación 33. } v(t) = K_i \int e(t) dt$$

donde K_i es la ganancia del control integral. Hay que resaltar que, en todo tipo de controlador, la acción proporcional suele ser la más importante, es por esto que la constante K_i la podemos basar en términos de K_p :

$$\text{Ecuación 34. } K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

donde T_i se considera como un elemento regulable proporcional indicando el tiempo que se lleva la integración.

La ecuación (33) al pasarla al dominio de la s :

$$\text{Ecuación 35. } V(s) = \frac{K_i}{s} E(s) \therefore G_c(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} = \frac{K_p}{T_i s}$$

2.28.3 CONTROL PROPORCIONAL - INTEGRAL (PI)

Podemos considerar a un control de clase proporcional-integral siempre que la salida del controlador $v(t)$ y el error $e(t)$ sean proporcionales, mientras se le suma a la integral del error $e(t)$ una cantidad proporcional a esta:

$$\text{Ecuación 36. } v(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt$$

Pasándola al dominio s , tenemos:

Ecuación 37. $V(s) = K_P E(s) + \frac{K_P}{T_i s} E(s) \therefore G_C(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = K_P \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] = K_P + \frac{K_P}{T_i s}$

Ecuación 38. $G_C(s) = \frac{V(s)}{E(s)} = K_P \left[\frac{s+1/T_i}{s} \right] = K_P \left[\frac{s + \frac{K_i}{K_P}}{s} \right]$

La ecuación 38 describe a una variable proporcional K_p cuyo valor se encuentra dependiente al cero ubicado en $z = -1/T_i$

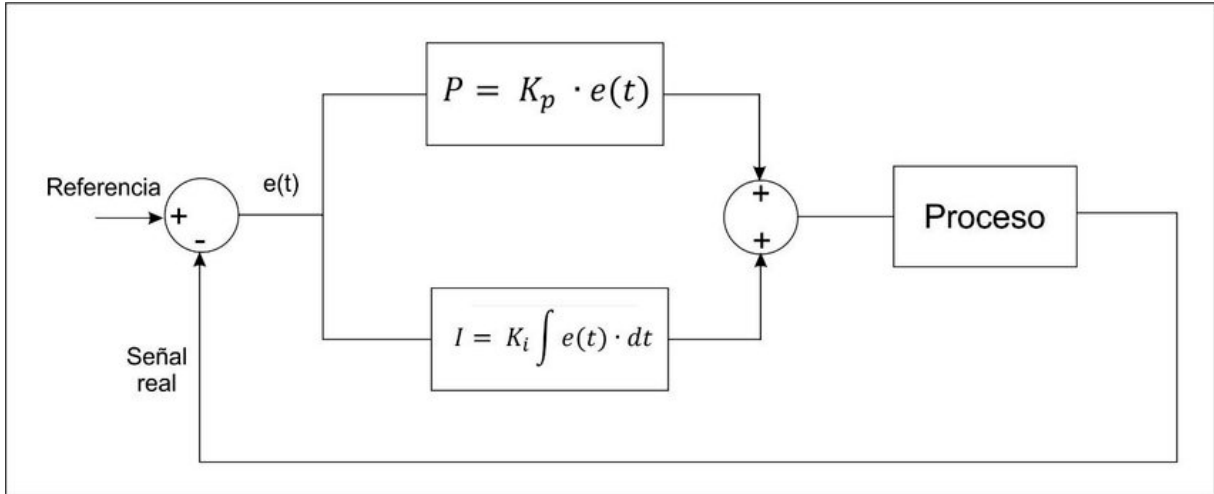


Figura 36. Control Proporcional Integral

Se presentan las características principales del controlador PI:

- Reducción en amortiguamiento.
- incremento en el pico máximo de sobre impulso.
- su elevación es más rápida.
- Tanto la ganancia como la fase mejoran sus rangos.
- a medida que el sistema crece, se observa una mejoría en el error de estado estable.

[46] nos proporciona La tabla 8, la cual es un informe del tipo de controlador que se puede ocupar en diferentes procesos industriales.

Tabla 8. Controladores a utilizar en los procesos industriales.

Tipo de controlador	Proceso por controlar
P	Control de Nivel
PID	Control de temperatura
PI	Control de flujo

PI	Control de presión de flujo
----	-----------------------------

CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 RESUMEN DEL CAPITULO

En este capítulo se describe la fase de diseño y manufactura de los elementos que componen los prototipos propuestos como electrolizadores, se detallará cada sistema generador de hidrógeno, sus características principales, así como su proceso de construcción, partiendo de la descripción de los sistemas hasta los cálculos de producción de estos. De igual manera se describe el circuito de control del sistema, la adquisición de las señales y su acondicionamiento ayudados por un PID.

3.2 CONSTRUCCIÓN

3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA GENERADOR DE HIDRÓGENO.

El Generador de Hidrógeno o también conocido como hidrolizador, celda de hidrógeno, Generador de Hidrógeno o Electrolizador, es un dispositivo que emplea como materia prima agua y corriente continua realizando un proceso llamado electrólisis, este dispositivo dependiendo de su construcción nos puede proporcionar las moléculas del agua en forma de gas juntas o por separado.

En resumen, un generador de hidrógeno es un dispositivo que separa el hidrógeno y el oxígeno del agua mediante corriente continua, teóricamente para poder llevar acabo la electrólisis del agua es necesario aplicar 1.23 V, pero al considerar caídas de potencial, se resolvió en la práctica para la mayoría de los generadores de Hidrógeno se requiere un potencial de entre 1.9 a 2.5 V, y una corriente que ronda entre los valores de 100 y 400 mA/cm² [38], de manera que el gas de hidrógeno puede ser utilizado en diversas aplicaciones, desde su uso como soplete o alimentar a un motor de combustión interna. Su diseño está conformado por varias placas de acero especial en donde tienen continuidad gracias a un electrólito que se deposita por medio de una manguera que viene de un depósito de agua, cuando al generador se le aplica un voltaje los electrones empiezan a fluir por el agua gracias al electrolito, por lo cual se crea la reacción de separación de la molécula del agua en gas hidrógeno y gas oxígeno, a este proceso como se ha mencionado antes es llamado electrólisis. Es necesario contar con una fuente de corriente continua que puede ser suministrada por alguna fuente de energía renovable, una batería de automóvil o bien de baterías adicionales.

3.2.2 PARÁMETROS DEL ELECTROLIZADOR

Ya que se espera tener un buen resultado con el diseño del electrolizador, se pensaron en los siguientes puntos a cumplir:

- Producción de Hidrógeno en forma de gas y secado de este.
- Sistema de alimentación del electrolito
- Fuente de alimentación para el Sistema
- Sistema de medición de la producción de hidrogeno

3.2.3 PROTOTIPOS DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Se diseñaron dos prototipos capaces de producir y distribuir hidrogeno, este gas se obtiene mediante la electrólisis del agua, el diseño se conforma del cascaron o recipiente del electrolizador, de este sistema está conformado por el cuerpo del electrolizador, membranas, placas de metal que servirán como ánodos y cátodos.

Al iniciar el diseño del Sistema de Producción y Distribución de Hidrogeno, se plantearon especificaciones de diseño del cuerpo del electrolizador.

3.2.3.1 DISEÑO NO. 1(CELDA SECA)

Este diseño está constituido por trece placas, 10 neutras, 2 negativas, 1 positiva comunicadas entre sí por el electrolito, pero separadas por una membrana muy fina de 160 hilos, suficientemente fina para dejar pasar la solución electrolítica pero suficientemente gruesa para ser capaz de mantener separados los gases. Las entradas del electrolito están ubicadas en los cuatro niples de la parte de abajo, por donde saldrán los gases se necesita ubicar salidas en la parte de arriba, para que los gases de forma natural sigan ese ese camino, donde 2 salidas darán hidrógeno y los otros 2 oxigeno, estas salidas dependerán de la configuración que se le dé al separador EPDM (figura 38.) ya que por su forma y de la posición que se coloquen al momento de armarla, serán las salidas de los gases que dé. La separación entre cada electrodo dependerá del grosor de nuestro separados EPDM. La celda está unida mediante tornillos de presión que garantizan la hermeticidad del recipiente.

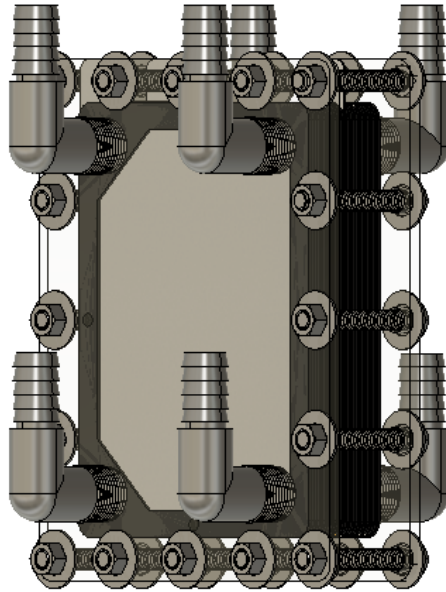


Figura 37. Electrolizador diseño 1

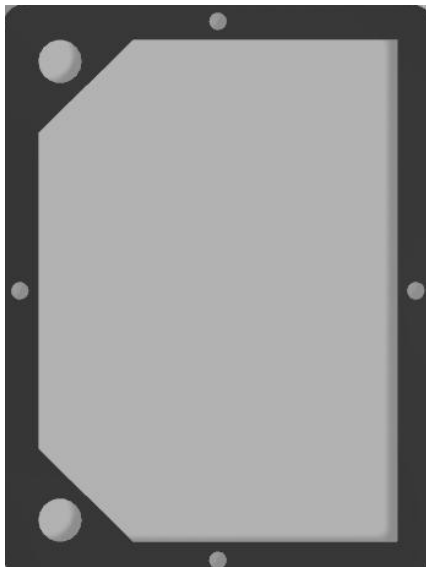


Figura 38. diseño del separador EPDM

Ventajas:

- Diseño que reduce pérdidas eléctricas
- Disponibilidad de trabajo continuo.
- Pequeño volumen de trabajo
- Fácil limpieza
- Facilidad de montaje

Desventajas:

- Pérdida de tiempo al abrir para dar mantenimiento
- Costo elevado

3.2.3.2 DISEÑO NO.2 (FORMA CILÍNDRICA)

Este diseño se basa en dos recipientes cilíndricos de diferentes radios, el de radio menor se introduce en el de mayor radio, esto con el fin de mantener separadas las salidas y evitar que los gases tengan oportunidad de mezclarse. Igualmente, ambos son herméticos gracias a pernos de sujeción, la tapa exterior cuenta con un niple, el cual cumple la función de salida del gas de oxígeno y la tapa interna de igual manera cuenta con un niple que cumple la función de salida del gas de Hidrógeno, los electrodos están fijados en las tapaderas, esto para tener soporte y no dejar fugas en ningún lugar.

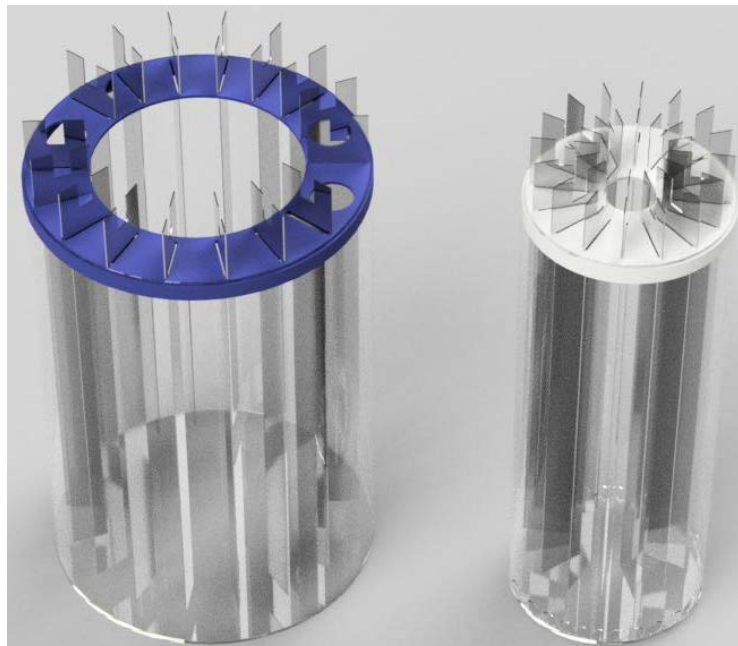


Figura 39. Electrolizador diseño 2

Ventajas:

- Fácil Construcción
- Facilidad de montaje
- Disponibilidad de trabajo continuo.
- Bajo Costo

Desventajas:

- Dificultad en el cambio de electrodos.
- Nula variación de las distancias entre electrodos.
- Gran volumen de trabajo

3.2.4 MATERIALES

Antes de empezar a armar un electrolizador, se tienen que tener en cuenta las características que se requieran de este, por ello los materiales a utilizar en su construcción del ánodo, cátodo y separador ayudaran a saber la eficiencia del electrolizador.

Al polarizarse las placas, en el ánodo, que es hacia donde el oxígeno se dirigirá cuando la corriente eléctrica empieza a fluir, en ese electrodo podrían presentarse problemas de corrosión, haciendo que su trabajo disminuya, viéndose reducida su eficiencia. Debido a esto, los materiales a ocupar deben de tener la característica de nula o muy baja corrosión para que la vida del electrolizador sea la mayor posible.

3.2.4.1 ACERO INOXIDABLE 316L

Se buscaron diferentes materiales que tuvieran la característica de baja corrosión y se notó que la gama de materiales que se podrían ocupar como placas es muy amplia, pero en su mayoría, el níquel y el cobalto son elementos presentes en su constitución y en muchos casos son componentes principales de estos materiales. Es por esto que se realizó la búsqueda de algún acero especial que tuviera alguno de estos elementos en su composición por lo cual se concluyó en ocupar acero 316L.



Figura 40. Acero Inoxidable 316L

Como muestra la tabla 9, los aceros inoxidable de la serie 300 tienen características muy similares entre ellas, pero a diferencia de los demás, el acero inoxidable 316L presenta una gran resistencia a la corrosión sobre todo cuando es expuesto a ataques agresivos químicos o ácidos y esta resistencia no varía aun cuando está a temperaturas elevadas, es por ello que su elección fue sin duda la mejor.

Tabla 9. Comparativa de aceros inoxidables serie 300 Austeníticos

NORMA/ASTM/ AISI/SAE	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%S	%Ti	%Nb
301	<=0.15	16-18	6-8				
303	<=0.08	17-19	8-10		>=0.15		
304	<=0.08	18-20	8-10.5				
304L	<=0.03	18-20	8-12				
304H	0.04-0.10	18-20	8-10.5				
305	<=0.12	17-19	10.5-13				
316	<=0.08	16-18	10-14	2-3			
316L	<=0.03	16-18	10-14	2-3			
316H	0.04-0.10	16-18	10-14	2-3			
317	<=0.08	18-20	11-15	3-4			
317L	<=0.03	18-20	11-15	3-4			
321	<=0.08	17-19	9-12			>=5x(C+N)	
347	<=0.08	17-19	9-13				>10xC
904L + 1.5Cu	<=0.020	20	25	4.5			

3.2.4.2 MANGUERAS

Cuando se habla de mangueras, se sobre entiende como un tubo flexible hueco que es capaz de transportar cualquier tipo de fluido o gas de un punto a otro, se buscaron mangueras con características capaces de transportar fluidos corrosivos y una adecuada flexibilidad. Se buscó que el espesor y el tipo dependieran de los nipples y servicio. Se encontraron diferentes tipos de materiales de mangueras, como son fibras (hilados), tejidos, alambres de acero, cables de acero o combinación de los mismos. Se buscó que la parte exterior tuviera características de protección, el espesor indicado y una buena calidad para el trabajo a realizar.



Figura 41. Manguera para Ácidos y Químicos

Ya que se estará trabajando con un fluido corrosivo, se tendrá de estar inspeccionando periódicamente para prever posibles daños en la manguera.

3.2.4.3 ABRAZADERAS

El tipo de abrazaderas en el mercado es variado al igual que sus características, y estas dependen del fluido a transportar en la manguera, se pueden encontrar abrazaderas metálicas, abrazaderas de aluminio, abrazaderas de (PVC) y abrazaderas isofónicas. Se puede ocupar cualquier tipo de abrazadera, pero al saber que se estará trabajando con líquidos que cambian de temperatura, se recomienda el uso de las abrazaderas isofónicas que tienen una goma aislante, ya que sus características se prestan adecuadamente para el uso del proyecto.



Figura 42. Abrazaderas

3.2.4.4 ELECTROLITO

Es cualquier sustancia que contiene iones libres para poder tomar el comportamiento de un medio conductor eléctrico. Ya que mayormente consisten de iones en solución, los electrolitos también son conocidos como soluciones iónicas, pero también son posibles electrolitos fundidos y electrolitos sólidos.

Para el proceso de electrolisis, se tomó como electrolito el hidróxido de sodio (figura 43) ya que es una sustancia incolora e higroscópica que se puede encontrar en el mercado desde escamas hasta en barras.



Figura 43. Hidróxido de sodio

Su disolución en agua es rápida, dando un fuerte desprendimiento de calor que beneficia la reacción de la electrolisis. En el agua, el hidróxido de sodio se separa en cationes de sodio (átomos de sodio con una carga positiva) y el anión hidróxido (átomos de hidrógeno y oxígeno cargados negativamente), lo que disminuye la acidez del agua.

3.2.4.5 DEPOSITO PARA ELECTROLITO

La función principal de un depósito es la de almacenar líquidos o gases. Entre los depósitos más comunes están los depósitos para líquido anticongelante (figura 44), cuyo diseño funciona en el sistema de refrigeración de un automotor. El depósito debe de estar echo de materiales que resistan elevadas temperaturas, el material del que están contruidos debe soportar la corrosión, las vibraciones que normalmente están presentes en el movimiento de los vehículos. En el interior de estos depósitos se hallan separaciones, que puedan mantener el de líquido lo más estable posible, por efecto de movimientos bruscos se puedan producir burbujas o espacios de aire en el depósito, se

verifica que el depósito a utilizar conste de un tapón que pueda mantener constante un cierre hermético y evitar fugas del gas producido o derramamientos de líquido hacia el exterior ya que puede ser peligroso y causar irritación o quemaduras en la piel.



Figura 44. Deposito

3.2.4.6 AGUA DESTILADA

Este tipo de agua se compone de puras moléculas de H_2O . En esta las impurezas y iones han sido eliminadas mediante un proceso de destilación. Ya que cuenta con una elevada pureza, las propiedades físicas del agua destilada son mucho muy distintas al intentar compararla con otro tipo de agua. Un ejemplo de esto es la presencia de conductividad casi inexistente, ya que depende del grado de destilación, puesto que, si se compara con agua de uso humano, la presencia de iones es muy baja en comparación con el agua que a diario usamos, ya que, en esta, por la filtración en la tierra, se puede encontrar diferentes elementos que sirven como electrolitos. Es por ello que, al ocuparse para la electrolisis, se produce hidrógeno de alta pureza.



Figura 45. Agua Destilada

3.2.4.7 AGUA SUPERFICIAL

Se consideran aguas superficiales todas aquellas que se encuentran en la superficie de la tierra, y se forman al momento de una precipitación fluvial, pueden ser desde lagos, ríos, lagunas, presas, etc. Todas las aguas superficiales tienen distintas composiciones de diferentes organismos, elementos y ecosistemas, y estos parámetros pueden variar en el agua dependiendo de la localización, contaminación y uso que tengan.



Figura 46. Agua Superficial

3.2.4.8 CABLE ELÉCTRICO

Ya que el principal propósito de un cable es de conducir electricidad se fabrican generalmente de cobre, debido a la excelente conductividad de este material, o de aluminio que, aunque posee menor conductividad es más económico. Existen diferentes calibres en los cables eléctricos, y estos dependen del uso que se le vaya a dar, los parámetros a observar en un cable eléctrico son: la resistencia eléctrica, el número de hilos, el grosor de los hilos, el nivel de tensión en el que trabajará, la corriente nominal, la temperatura ambiente, la temperatura de servicio del conductor y el grosor del recubrimiento.

Para poder saber la longitud de los conductores a ocupar, primero debemos conocer la de los aparatos eléctricos que hacen conexión, la porción necesaria que se ocupara de cable debe ser lo más exacta para evitar una resistencia muy grande por parte de este y así evitar calentamiento del cable. Hay que tener en cuenta que ésta es directamente proporcional a la longitud, e inversamente proporcional a la sección.

3.2.4.9 CONECTORES

Para poder inducir corriente eléctrica al electrolizador, se realizó la conexión de los distintos cables entre sí, los cables se conectarán de la fuente al electrolizador, pero no podemos poner cables pelados, ya que podrían no conectarse adecuadamente, y es por ello que se emplearan conectores en la punta del cable, ya que la fuente cuenta con bornes capas es de sujetar un conector de anillo o redondo.

El cable se adhirió al conector por medio de soldadura, esto para evitar que en cualquier jalón se desconecte y así tener una mayor fijación al conector. Se procuro poner conectores con recubrimiento para que la soldadura no se pueda notar y sea más estético el trabajo.



Figura 47. Tipos de conectores

Para su fácil identificación, es recomendable que los conectores se marquen con un determinado color y se enumeren cada una de estas. A estos colores y numeración de las vías se hace referencia a los esquemas eléctricos de conexiones para que resulte sencillo seguir el circuito eléctrico y relacionarlo en el circuito. Por lo general, es conveniente un conector que sea fácil de identificar visualmente y de ensamblar, que sólo requiera de herramientas sencillas, y sea económico.

3.2.5 CONTRUCCIÓN DEL ELECTROLIZADOR (DISEÑO 1).

Para el diseño del electrolizador se consideraron los diferentes materiales ya mencionados y se establecieron características para este prototipo.

Como se mencionó anteriormente, el potencial teóricamente necesario para efectuar la electrólisis del agua es de 1.23 V, y sabiendo que se pueden producir perdidas en caídas de potencial, se pensó en diseñar el electrolizador con 5 placas neutras entre las terminales positivas y negativas (figura 48), con una alimentación de 12V y así pueda llegar un voltaje de 2V en cada placa neutra, logrando reducir las pérdidas de voltaje y efectuando la electrólisis sin ningún problema.

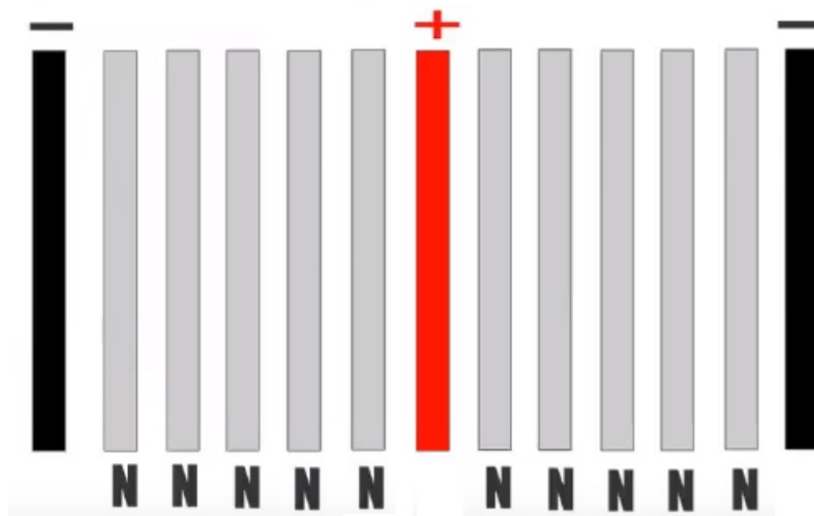


Figura 48. Configuración de placas neutras

Ya que se necesita que los electrodos tengan muy buena conducción, se consideraron usar diferentes materiales, al final (como se explicó anteriormente) para los electrodos se optó por ocupar el acero inoxidable 316L según los estudios hechos y la facilidad de adquisición en la región. El acero 316L como se muestra en la Tabla 9 tiene una composición de C 0.03%, Si 1%, Mn 2%, Cr 16-18%, Ni 8%, Mo 2-3%, S 0.03%, P 0.045%, y 0.03% de S.

Comparado con el acero inoxidable 316, nos podemos dar cuenta que sus características son muy parecidas, con la única diferencia que el acero inoxidable 316L tiene un bajo contenido de carbono 0.03% max, haciendo que una corrosión superficial o intergranular sea más difícil en este material.

Se propuso usar electrodos de forma rectangular para poder tener una mayor área de superficie efectiva donde los electrodos tuvieran una mayor área de trato con la. Debido a la disolución, las placas se pueden comunicar entre sí, las entradas y salidas fueron hechas en una placa de acrílico transparente de 6mm de grueso, y ya que la presión existente no es la suficiente para romper el acrílico, no hubo necesidad de ocupar un grosor más grande. Cada placa va separada adecuadamente por un sello de caucho de monómero de etileno propileno dieno por sus siglas en ingles EPDM, cuya función es vital, ya que no solo se montó para evitar el contacto entre placas y así evitar un cortocircuito, también se le dio una forma específica como se muestra en la figura 49 esta servirá de guía a cada gas para llevarlas a salidas diferentes, y así conseguir su separación internamente.

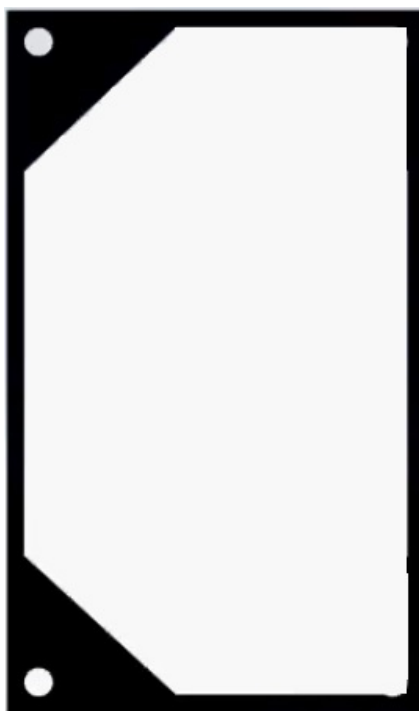


Figura 49. Forma específica del aislante EPDM

3.2.5.1 MANUFACTURA DEL ELECTROLIZADOR (DISEÑO 1).

Se cortaron 13 placas de 15 x 20 cm, las cuales también se pulieron para quitar cualquier impureza en su superficie. 10 de estas placas son exactamente rectangulares y a 3 se les añadió una pestaña que es donde se les conectará la corriente eléctrica.



Figura 50. Cote de placas

De igual manera, al terminar de pulir, se perforó cada placa con medidas iguales, estos agujeros serán donde el electrolito entrará y el los gases saldrán.



Figura 51. Perforación de placas

Ya que se perforaron todas las placas, se cortan de igual manera el caucho con la forma que anteriormente ya se mencionó y con ayuda de una placa se toman las medidas para perforar los agujeros en los aislantes. Después se procede a cortar y a perforar el acrílico, verificando que los espárragos que se coloquen no toquen ninguna placa metálica. Del mismo modo se perforan los acrílicos y se enroscaron con un machuelo de ½ pulgada las salidas y entradas del gas y el agua respectivamente.



Figura 52. Material listo para armar

Una vez ya teniendo listo todo se procede a unir los materiales para verificar que las medidas de los orificios sean las correctas y así poder proceder a llenar el electrolizador (Figura 53).

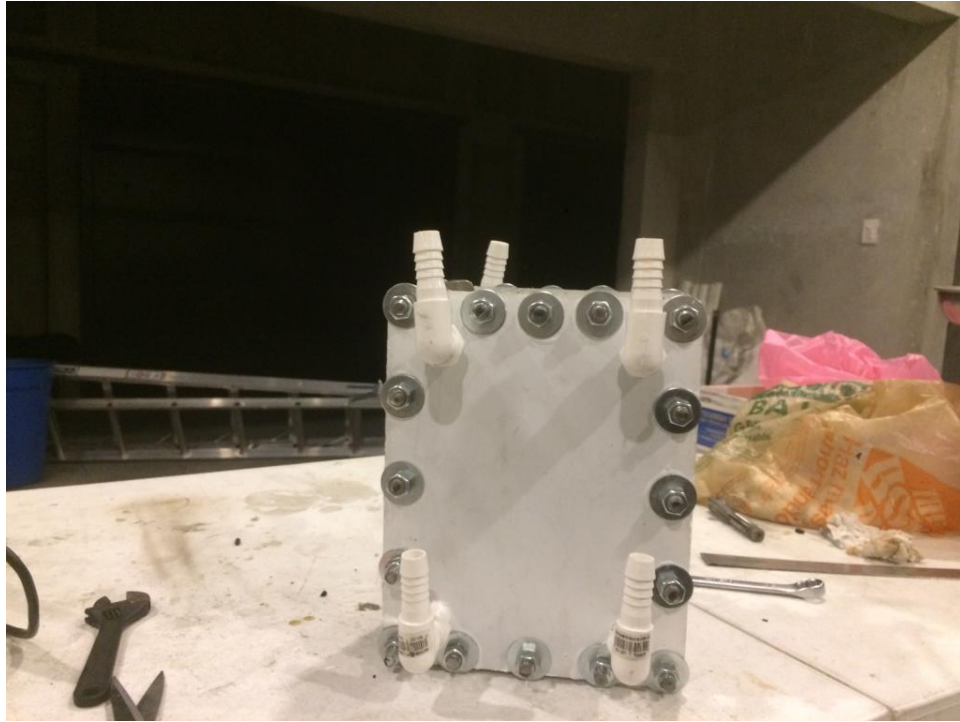


Figura 53. Electrolizador armado (a).

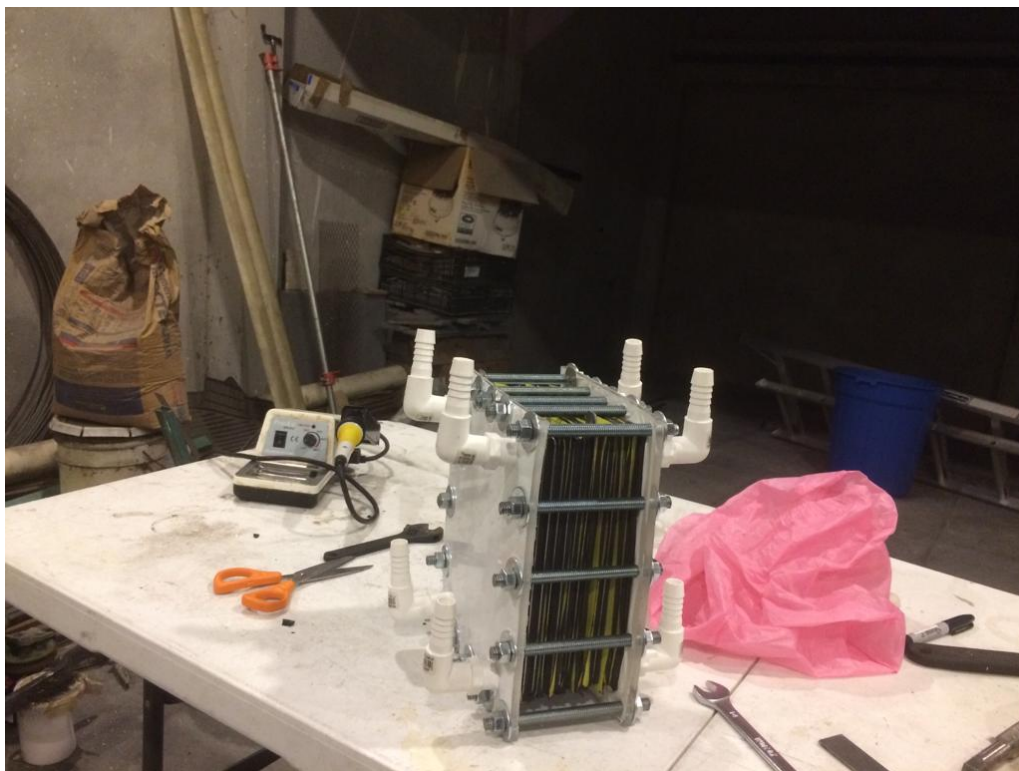


Figura 54. Electrolizador armado (b).

3.2.6 MANUFACTURA DEL ELECTROLIZADOR (DISEÑO 2).

Se cortaron 16 placas de acero inoxidable grado 316L de 2.8 x 28 cm, estas igual que el prototipo 1 se pulieron para quitar cualquier impureza en su superficie. A todos los electrodos se les añadió una pestaña con medidas de 3.5cm x 3.7 cm, estas estarán en la parte externa del recipiente y son las que se contendrán a un cable eléctrico para su conexión a la corriente eléctrica, por lo cual se le añadió una abertura de 1 cm, suficiente para colocar un tornillo que sujetara el cable eléctrico.

Una vez que ya se obtuvieron las placas, se realizaron aberturas de 3cm en las tapaderas de los recipientes plásticos, y se procedió a tapar toda fuga que existiera en las tapaderas con resina epóxica, se utilizó este material ya que era capaz de soportar altas temperaturas y era resistente a la corrosión provocada por el hidróxido de sodio. Después se procede a perforar el recipiente plástico interno por la parte de abajo, para que existiera conductividad entre los electrodos, pero sin la posibilidad de que los gases se combinen.



Figura 55. Materiales Diseño2

Se muestra en la figura 55, la realización de un empaque del material EPDM, esto para evitar fugas y la presión del desprendimiento de los gases se dirijan hacia las salidas de estos. Una vez ya teniendo listo todo se procede a unir los materiales, y se une la tapadera con el recipiente plástico mediante tornillos, esto para poder ser abierto fácilmente para su limpieza.



Figura 56. Electrolizador armado

3.2.7 PRODUCCIÓN TEÓRICA DE GASES EN EL ELECTROLIZADOR

Como nos dice [47], podemos calcular la producción de Hidrógeno del electrolizador mediante la ecuación 20, es indispensable aclarar que los cálculos se hacen pensando en condiciones ideales utilizando 12A observando los resultados en 1 minuto, por lo cual para el cálculo del gas desprendido del cátodo según la ecuación 19 tenemos que:

$$\text{Ecuación 39. } m = \frac{1.00784 * 12 * 60}{2 * 96487} = 0.003760324g$$

Ya que se conoce la masa que hay en el cátodo, mediante la ecuación 21 tenemos que:

$$\text{Ecuación 40. } V = \frac{\frac{0.003760324}{1.00784} * 0.082 * 298K}{1} = 0.091172 LH_2$$

De igual manera se procede a calcular el gas desprendido del ánodo, por lo cual, basándonos en la ecuación 18 tenemos que:

$$\text{Ecuación 41. } m = \frac{15.999 * 12 * 60}{4 * 96487} = 0.0298467151 \text{ g}$$

$$\text{Ecuación 42. } V = \frac{\frac{0.0298467151}{15.999} * 0.082 * 298K}{1} = 0.04558624 \text{ LO}_2$$

Como se observa en la ecuación 40, el volumen del gas Hidrogeno tiende a ser el doble del producido por el ánodo (ecuación 42), dándonos a entender que las ecuaciones concuerdan con lo planteado en la ecuación 17, donde se presenta que, en el proceso de electrolisis, por cada mol de hidrogeno se obtiene medio mol de Oxígeno.

3.3 DISEÑO DE CONTROL DE CORRIENTE

3.3.1 MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSOS (PWM)

La modulación por ancho de pulsos por sus siglas en ingles PWM (pulse-width modulation) es un método ocupado para modificar el ciclo de trabajo proveniente de alguna fuente de energía o fuente de señal periódica, esto con el fin de transferir información por medio de un canal específico de comunicación o para moderar la energía que se transfiere a una carga.

Como comenta [24] el pwm es el proceso por el cual se puede controlar la corriente que se suministra a una carga, en este caso al electrolizador. Por lo cual, en el diseño del trabajo es uno de los componentes más importantes para la obtención de hidrogeno en el proceso de electrolisis teniendo como fuente energía renovable. La característica por la cual se pensó en este circuito electrónico, es su capacidad de controlar por impulsos la corriente eléctrica que fluye a través del sistema, pensando en la eficiencia de la producción de gas hidrogeno.

Se opto por el diseño de un circuito electrónico PWM, pero al percatarse que existía uno en el mercado con las características y costo con las que se iban a implementar el diseño se eligió la adquisición de este. El dispositivo es el llamado “Motor Speed Control PWM” (figura 57) el cual cuenta con las características de la tabla 10.

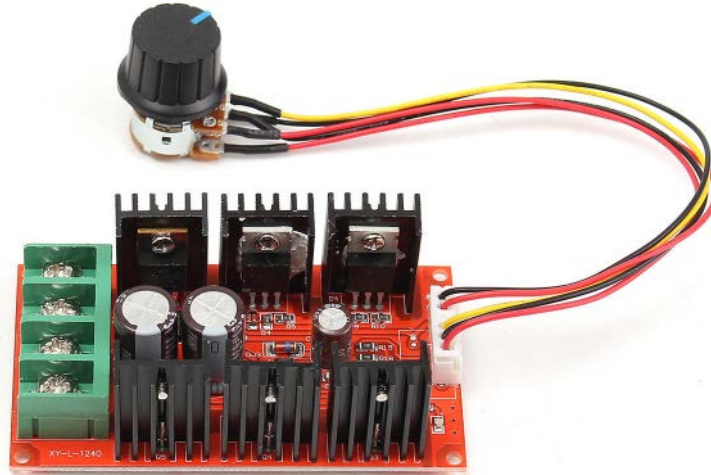


Figura 57. Motor Speed Control PWM

Tabla 10. Características del circuito PWM

Temperatura de funcionamiento:	-20 – 40 °C
Control de potencia:	0.01 – 2000 W
Corriente nominal máxima:	40A
Voltaje de funcionamiento:	10 – 50 DC
Corriente quiescente:	0.025A
Frecuencia PWM:	12Khz
Ciclo de servicio PWM:	5% - 100%

Este dispositivo está basado en el mosfet NCE7190A el cual tiene la característica de soportar hasta 90A, pero como se puede observar en la figura 57, el circuito es controlado de forma manual por un potenciómetro, el cual, al activar el paso de corriente hacia el electrolizador, por principio de la entalpia, los electrodos transfieren calor gracias al movimiento del flujo de electrones, haciendo que, mientras más sube la temperatura en el sistema, más corriente eléctrica fluye por el electrolito. Es por esto la elección del dispositivo “Motor Speed Control PWM” ya que es muy estable a la hora de controlar el paso de corriente, no evita que el aumento de corriente eléctrica suceda, es por esto que el desarrollo de un PID sea clave en el control de corriente.

3.3.2 CÁLCULO DEL CIRCUITO DE CONTROL

Como se mencionó en el punto anterior, el uso del circuito PWM es la opción más viable para el control del paso corriente, pero al ser controlado de forma manual hace que el sistema corra el riesgo de calentarse y/o quemar la fuente de alimentación. Es por esto que se pensó en el diseño de un circuito capaz de controlar el dispositivo “Motor Speed Control PWM” por medio de un microcontrolador, quitando el potenciómetro y añadiendo un sistema de control capas de regular la corriente de forma automática.

La PCB del circuito se diseñó en programa Multisim (figura 58), en el cual se le colocaron las entradas, salidas y dispositivos electrónicos.

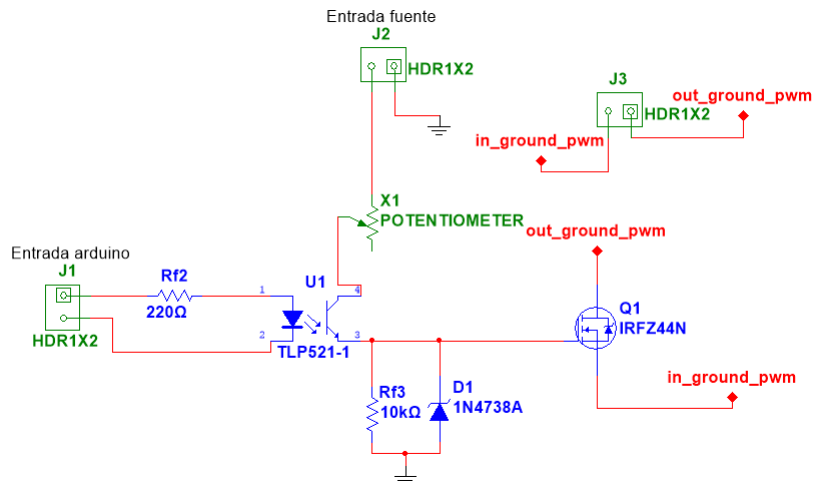


Figura 58. circuito de control.

Como se observa en la figura 58, en la entrada del Arduino se coloca una resistencia (Rf2) de 220 ohm, a pesar que el Arduino proporciona solo 5v es suficiente para quemar el led interno del optoacoplador, es por ello que se realizó el cálculo para la resistencia que se pondría en la entrada del led. Según el datasheet del optoacoplador nos dice que el led trabaja correctamente de 1.2v a 1.4v a una corriente de 20mA entonces:

$$\text{Ecuación 43. } Rf2 = \frac{V}{I} = \frac{V_{Fuente} - V_{Led}}{I_{Led}}$$

$$Rf2 = \frac{5V - 1.3V}{20mA} = 185\Omega$$

Ya que la resistencia calculada es de 185 ohm y al no ser un valor comercial se considera el siguiente más cercano, siendo la resistencia de 220 ohm. A pesar que la entrada del Arduino en el circuito será salidas pwm de este para regular la intensidad del led dentro del optoacoplador, esto para que mientras más luminosidad llegue a la base del transistor, más voltaje se dejara pasar de la fuente de alimentación del colector al emisor y viceversa. Hay que recalcar que no se utilizó el optoacoplador TLP521-1, se utilizó el PC817, pero al no existir en la base de datos del programa multisim, se buscó uno con características similares para su montaje en el circuito.

En la entrada de la fuente de voltaje se colocó un potenciómetro en serie con una resistencia (Rf3), esto para realizar un divisor de voltaje solo como protección mientras el diodo Zener alcanza el voltaje de polarización y ya que se alcanza este, el voltaje en Rf3 será igual al voltaje del diodo Zener. Como se busca alimentar el mosfet IRFZ44N, basándonos en los datos proporcionados por el fabricante se observó que su tensión umbral mínima de compuerta es de 2.1VDC y de igual manera informa que al llegar a la tensión de umbral se consumirá +1mA por lo cual se optó conectar un regulador de tensión para no quemar el artilugio, puesto que la fuente que alimentara al electrolizador es la que alimentará al sistema de control. Al igual que en el optoacoplador, se realizaron los cálculos para los dispositivos.

Se utilizo el diodo Zener 1N4738A, teniendo como característica proporcionar una tensión de 8.2V cuando se polariza inversamente a 1W de potencia máxima.

$$\text{Ecuación 44. } P_Z = V_Z * I_Z$$

El voltaje de nuestro Zener es de 8.2V y la corriente de este es la misma que el mosfet consumirá, en este caso se ocupará el que el fabricante otorga cuando se llega al voltaje de umbral de compuerta.

$$\text{Ecuación 45. } P_Z = 8.2V * 1mA = 8.2mW$$

Como se observa en la ecuación 45, la potencia del diodo Zener es más que suficiente para trabajar con el mosfet, se propuso trabajar con una resistencia de 10Kohm para Rf3 y así se calculará el valor de la resistencia (potenciómetro) donde caerá la diferencia de tensión del diodo Zener con respecto a la fuente de entrada.

Por ley de ohm tenemos que:

$$\text{Ecuación 46. } R = \frac{V_R}{I_R}$$

Como la resistencia Rf3 está en paralelo con el diodo Zener, se concluye que el voltaje Zener será el mismo para esta resistencia, por lo tanto, por la ecuación 46 tenemos que:

$$\text{Ecuación 47. } I_{Rf3} = \frac{V_{Rf3}}{R_{f3}} = \frac{8.2V}{10K\Omega} = 0.82mA$$

Pero por ley de corriente de Kirchhoff sabemos que la corriente que entra en el nodo de donde el diodo Zener y la resistencia Rf3 están conectadas es igual a la sumatoria de corriente que exista en estos dispositivos, y como este nodo está en serie con el potenciómetro se da por hecho que la corriente total del nodo es la misma que existe en el potenciómetro. Para el diseño del circuito se ocupó una fuente de 24VDC, por lo tanto, tenemos que:

$$\text{Ecuación 48. } R_{pot} = \frac{V_{in} - V_Z}{I_{Rpot}} = \frac{24V - 8.2V}{1mA + 0.82mA} = 8.681K\Omega$$

De igual manera se calculó la potencia de nuestras resistencias para evitar que se calienten o se abran, mediante los valores antes calculados podemos ocupar la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 49. } P = R * I^2$$

Entonces tenemos que:

$$\text{Ecuación 50. } P_{Rf3} = 10K\Omega * 0.82^2mA = 0.00672W$$

$$\text{Ecuación 51. } P_{Pot} = 8.681K\Omega * 1.82^2mA = 0.02875W$$

Una manera para poder corroborar los datos obtenidos es mediante la simulación, la cual se realizó en el programa Multisim (Figura 59).

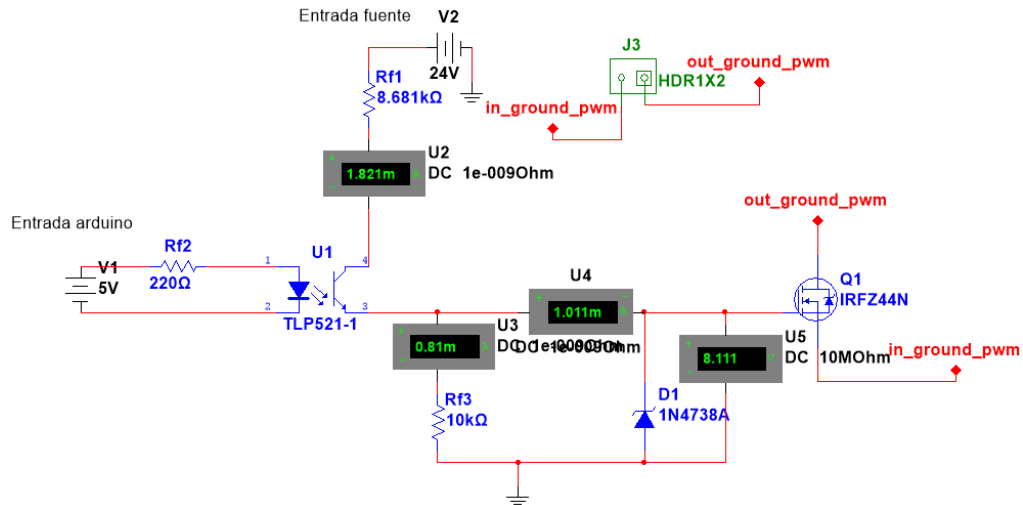


Figura 59. Simulación de circuito

En la simulación se conectó una resistencia en lugar del potenciómetro, esto solo para poder darle el valor que nos salió en las ecuaciones, y como se observa, las resistencias trabajan acorde a lo calculado, otorgando las corrientes que se esperaban.

Como se observa en las ecuaciones 50 y 51, se puede concluir que ocupar resistencias de 0.5 W son más que suficientes para evitar que el circuito se queme, en el caso del potenciómetro se ocupará uno de 50Kohm para poder regularlo y así poder ocupar diferentes fuentes de alimentación.

3.3.3 DISEÑO DEL PCB DEL CIRCUITO DE CONTROL

Una vez que los valores de los dispositivos electrónicos del circuito se obtuvieron y corroboraron los cálculos, se pasa al diseño de la PCB. Para el diseño de la PCB se pretendió tener una distribución uniforme de los dispositivos electrónicos, esto para hacer lo más pequeño y robusto el circuito y así evitar ocupar tanto espacio.

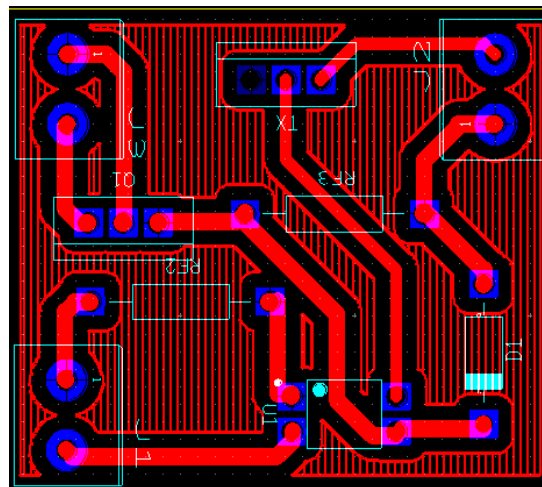


Figura 60. Diseño PCB del circuito

La PCB fue diseñada en el programa ultiboard en un espacio de 40mm x 35mm, se le proporciono suficiente espacio a las pistas con respecto al plano del circuito, esto para evitar algún corto dentro de este. En la figura 60 se puede apreciar una vez que el circuito fue colocado en una placa de cobre y se soldaron los dispositivos.



Figura 61. circuito armado

3.3.4 DISEÑO DEL CONTROLADOR PI

Una vez que el circuito fue diseñado se procede al cálculo del controlador, como lo que se requiere controlar es el amperaje que se suministrara, se diseñara el controlador PI basándonos en la tabla 8. El diseño del controlador se basará en el primer método de Ziegler–Nichols (lazo abierto), [48] nos explica este método como “la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario obtenida de manera experimental” (Figura 61). Este método se emplea si la respuesta despliega una curva con forma de S. Esta curva se puede generar desde la planta experimentalmente o a partir de una simulación dinámica.

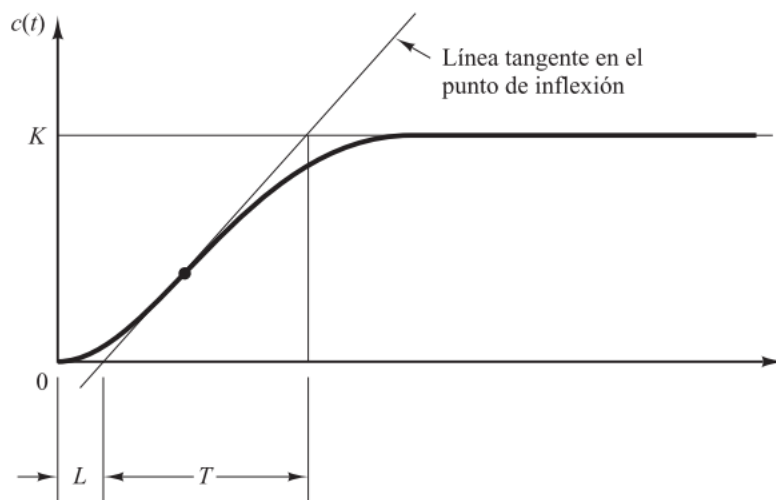


Figura 62. Curva de respuesta en forma de S.

En la figura 62 se pueden observar diferentes variables, donde [48] nos dice que podemos entenderlas como el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T , estas se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y estableciendo las intersecciones de esta tangente con respecto al eje del tiempo y la línea $c(t) = K$.

Para poder obtener esta curva con respecto a nuestro sistema, se observa la figura 34, que nos presenta el control PI antes de un proceso, por lo cual, entendiendo lo que representa la figura antes mencionada, y el método de Ziegler–Nichols (lazo abierto) se tiene que abrir el control PI y proporcionar una señal manualmente, es decir que la planta, en su entrada recibirá una entrada del tipo escalón (generalmente escalón unitario) y a partir de la respuesta de salida se obtienen los parámetros del PID o en este caso solo el PI (figura 62).

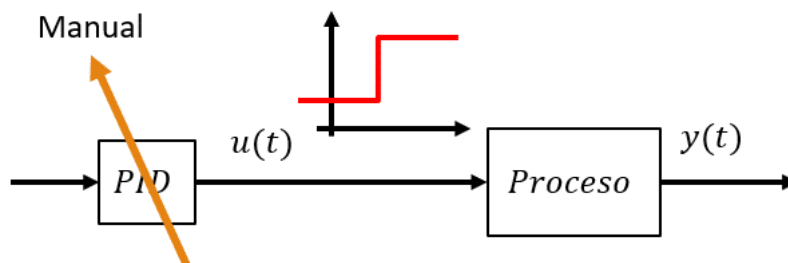


Figura 63. Entrada de señal escalón

Por lo cual, mediante un programa en Arduino y el circuito de control, se procedió a inducir una señal del 20% de lo que puede otorgar la fuente al sistema dando una señal como se muestra en la figura 64.

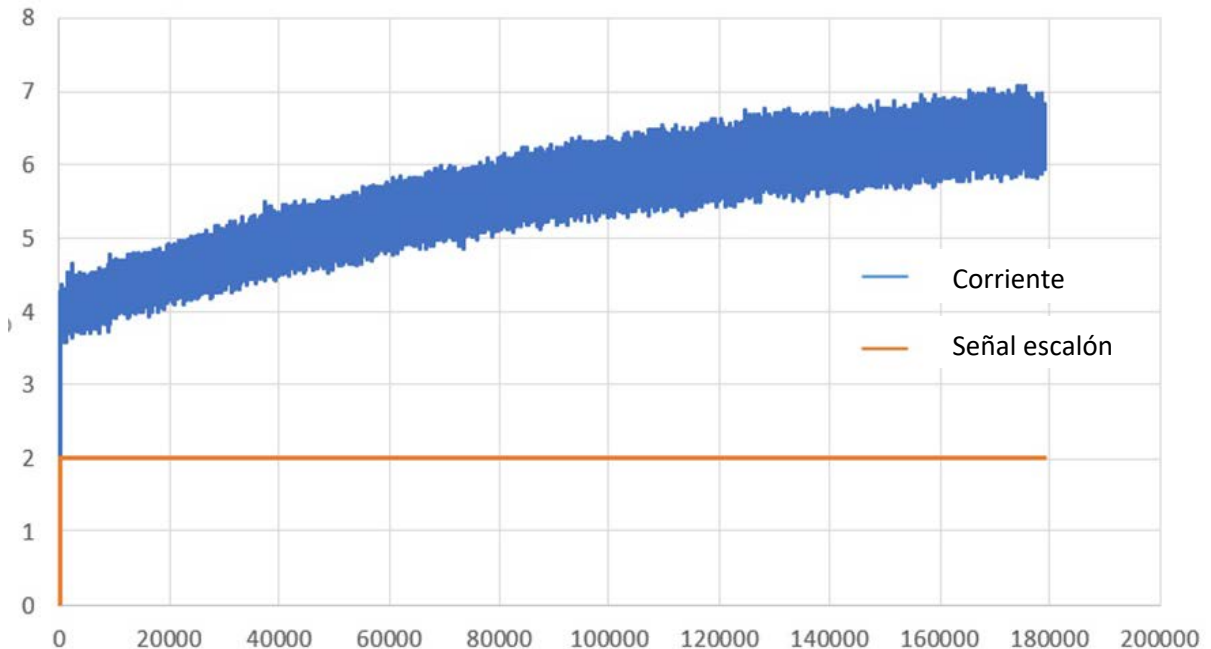


Figura 64. Grafica con la entrada de señal escalón

Como se puede observar en la figura 64, fue tomado un gran número de muestreo, esto para poder observar cual era el valor máximo que podría alcanzar con una señal escalón al 20%, y como ya se había explicado anteriormente, la electrolisis es una reacción química donde la temperatura favorece el proceso, donde la gráfica nos muestra que mientras más tiempo pasaba, la temperatura era más elevada, haciendo que el consumo de corriente fuera mayor, por lo cual, se puede concluir que el valor máximo alcanzado durante el tiempo de muestreo (5 horas) fue de 6.5A. Pero de igual manera se observa que la respuesta es demasiado rápida como para poder observar la curva de respuesta, por lo cual se procedió a reducir el número de muestras para poder observarla mejor.

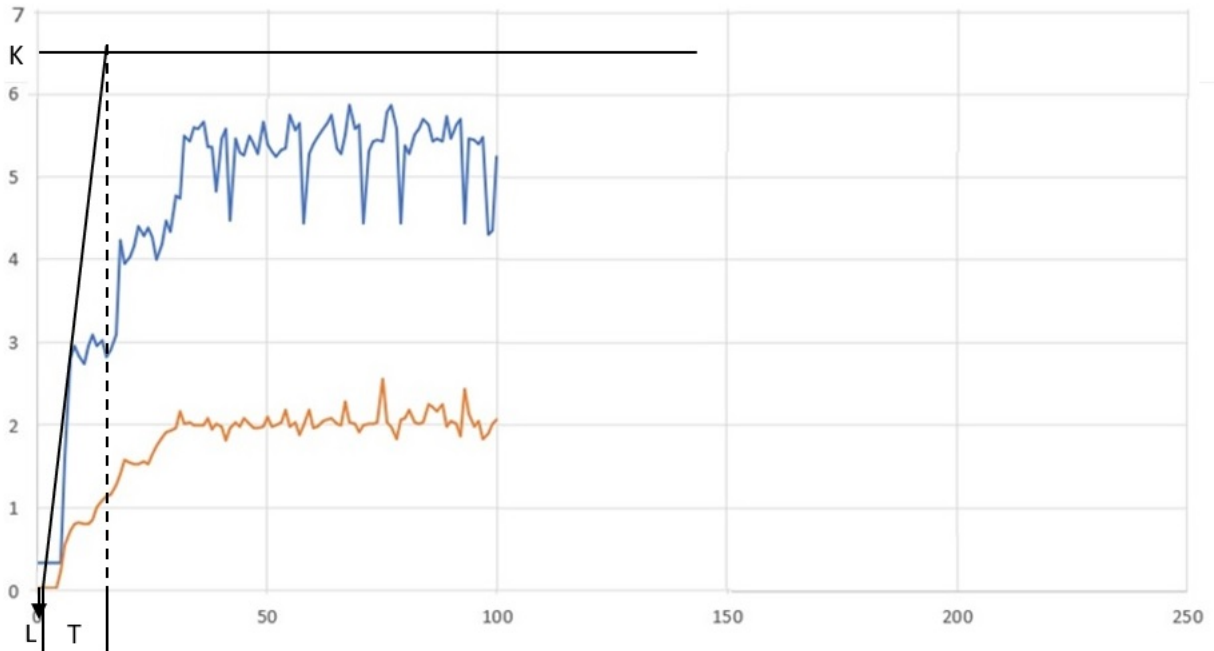


Figura 65. curva de respuesta

Con un número menor de muestras es más perceptible observar la curva de respuesta, pero aun así podemos observar que el tiempo de retardo (L) y la constante de tiempo (T) son muy pequeñas con valores de 0.00001 y 0.0169999 respectivamente. Una vez que ya tenemos los datos al poner la línea tangente en el punto de inflexión, pasamos a los cálculos del PI con respecto a la tabla que nos proporciona [49].

Tabla 11. Sintonía por Ziegler y Nichols

Tipo de controlador	K_P	T_i	T_d
P	$\frac{T}{KL}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{KL}$	$2L$	$0.5L$

Antes de sustituir los valores dentro de las ecuaciones de la tabla 11, [50] nos informa que se tiene que calcular el factor de incontrolabilidad, este valor debe estar entre los parámetros de 0.1 y 0.3, aunque también nos menciona el hecho que hay otros autores que manejan un valor máximo para el factor de incontrolabilidad de hasta 1.4. El cálculo de esta variable (ecuación 52) nos sirve para saber que la sintonización por el método de Ziegler y Nichols es factible, ya que si no es así se tendrá que proceder a realizar el controlador por otro método.

$$\text{Ecuación 52. } \frac{L}{T}$$

$$\text{Ecuación 53. } \frac{L}{T} = \frac{0.00001}{0.0169999} = 0.0005882$$

Como se ve en la ecuación 53, el factor de controlabilidad que nuestro sistema tiene es demasiado pequeño, por lo cual, nuestro sistema no puede ser sintonizado por el método de Ziegler y Nichols, sin embargo, [50] nos informa que este método fue propuesto para controles analógicos, por lo tanto, si la constante de tiempo (T) es demasiado grande con respecto al tiempo de retardo (L), tendera a ser inestable, por lo cual, una opción que se propone es el aumento del tiempo de retardo a un valor cercano a la mitad de la constante de tiempo (T) mediante la ecuación 54, y si mediante el aumento del tiempo de retardo el factor de controlabilidad no es factible, se tendrá que declinar la sintonización con respecto al método de Ziegler y Nichols.

$$\text{Ecuación 54. } L' = L + \frac{T}{2}$$

$$\text{Ecuación 55. } L' = 0.00001 + \frac{0.0169999}{2} = 0.00850995$$

Una vez obtenido el nuevo valor del tiempo de retardo, mediante la ecuación 52 corroboramos el factor de incontrolabilidad.

$$\text{Ecuación 56. } \frac{L}{T} = \frac{0.00850995}{0.0169999} = 0.5$$

Como se ve en la ecuación 56, el factor de incontrolabilidad ya se encuentra en el rango en el cual la sintonización por el método de Ziegler y Nichols pueda ocuparse en nuestro sistema, por lo cual, se procede a la sustitución de los datos para el tipo de controlador PI en las ecuaciones de la tabla 11.

$$\text{Ecuación 57. } K_P = 0.9 \frac{T}{K_L} = 0.9 \frac{0.0169999}{6.5 * 0.00850995} = 0.276597$$

$$\text{Ecuación 58. } T_i = \frac{L}{0.3} = \frac{0.00850995}{0.3} = 0.0283665$$

Ya que se tiene el valor de T_i , se procede a encontrar el valor de K_i con ayuda de la ecuación 34.

$$\text{Ecuación 59. } K_i = \frac{K_P}{T_i} = \frac{0.276597}{0.0283665} = 9.750832849$$

Para corroborar los valores calculados del controlador, se realizó un diagrama de bloques del controlador PI y PID en Simulink, esto para poder ingresar los valores obtenidos en las anteriores ecuaciones. Cabe señalar que la simulación del controlador PI es la que nos interesa en el sistema, por lo cual, la simulación del controlador PID solo se llevó a cabo para resaltar el por qué no se llevó a cabo en el sistema.

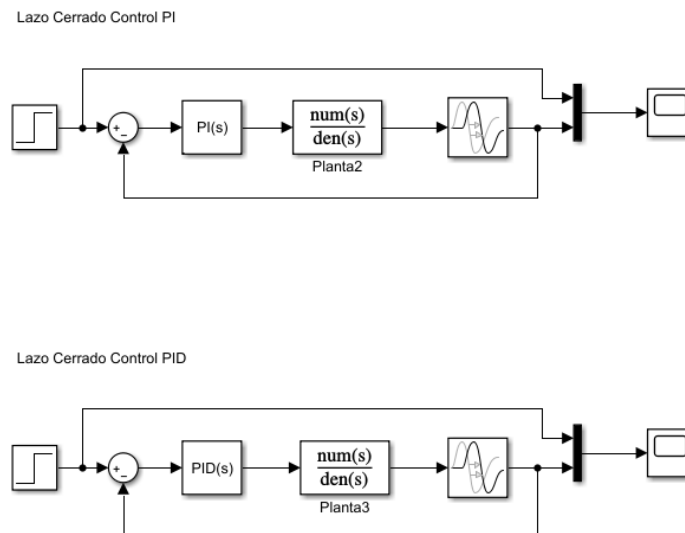


Figura 66. Diagrama de bloques en Simulink.

Se estableció el valor final en 12, ya que es donde queremos que el PI establezca el valor de la corriente, por lo cual la simulación se observó el siguiente comportamiento:

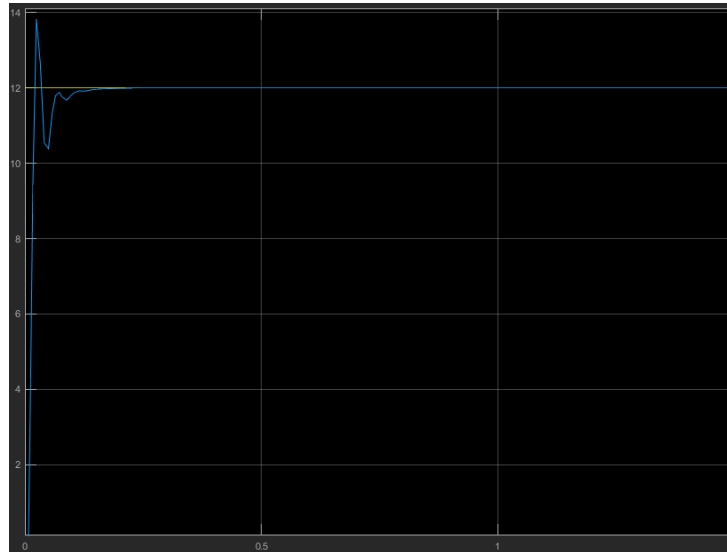


Figura 67. Simulación PI

En la figura 67 se observa que la respuesta es correcta y se establece como se esperaba, así también se observa que la velocidad de su reacción es menor a 0.5 segundos, haciendo pensar que el sistema responderá bien al momento de montarlo al electrolizador.

En la simulación del controlador PID se le estableció de igual manera un valor final de 12, el cálculo de este controlador se realizó de manera externa ya que solo se muestra aquí de manera comparativa.

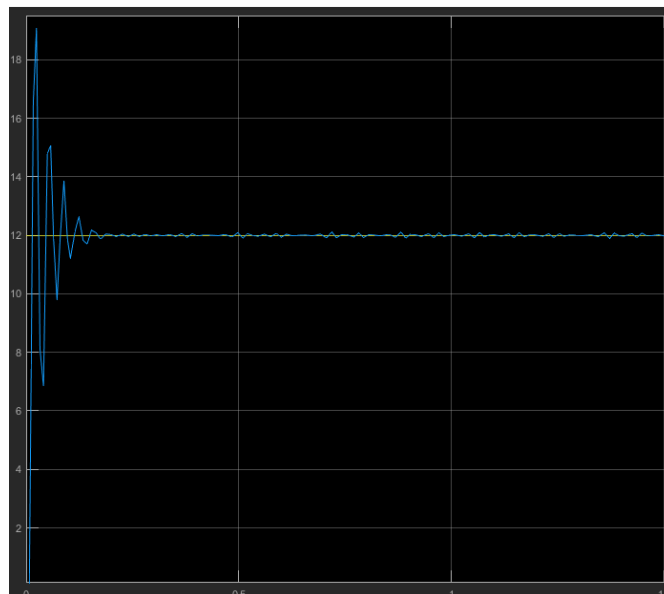


Figura 68. Simulación PID

En la simulación del controlador PID (figura 68) se puede observar un sobresalto mucho mayor al del controlador PI para poder estabilizarse, ya que este obtuvo un pico que sobrepasó el valor 18, mientras el PI no llega al valor 14 y se establece satisfactoriamente, que no es el caso del controlador PID, ya que este no logra estabilizarse pues, aunque fija su valor en donde lo establecimos, su respuesta sigue oscilando corroborando así lo dicho por la tabla 8.

3.4 MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD EN EL AGUA A UTILIZAR

3.4.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA A UTILIZAR

Un punto a cumplir del proyecto es el poder utilizar para el proceso de electrolisis otro tipo de agua y no solo el agua destilada, por lo cual se hicieron pruebas con diferentes muestras de agua que se tenía alcance. De las tantas muestras que se optaron, una de ellas fue recabada de la laguna de nogales ubicada en Nogales, Veracruz (Figura 69), esta laguna es un lugar turístico que se ocupa como zona recreativa, toda el agua proviene del deshielo del cráter del volcán Citlaltépetl por vía subterránea, es por ello que su temperatura ronda los 9C° - 12C° en invierno y no más de 20C° en verano, esto no impide que el agua tenga contacto humano pero a pesar de ser una laguna el agua se mantiene en constante movimiento ya que tienen diferentes salidas que alimentan a las poblaciones cercanas.



Figura 69. Laguna de Nogales, Ver.

La toma de muestras no se realizó en toda la laguna, se procuró tomar la muestra siempre en la orilla cerca de donde se observaba un nacimiento de agua, esto para evitar la recolección de otras muestras que afectaran las pruebas. Las muestras se recolectaron en garrafones de agua purificada de 20 litros.



Figura 70. Recolección de agua superficial (a)



Figura 71. Recolección de agua superficial (b)

Se tomo de igual manera muestras de agua provenientes de la llave, aquella agua que en este caso proporciona el municipio para uso humano por vía de tubería, cabe señalar que a pesar que la laguna de nogales alimenta de agua a los pueblos cercanos, el agua que proporciona el municipio es de un pozo, por lo cual se tomó como opción para recabar muestras.

Se necesitaba la comparación de estas muestras tomadas con el agua que comúnmente se ocupa para la electrolisis, por lo cual también se procedió a analizar una muestra de agua destilada.

3.4.2 METODOLOGÍA EN LA MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD EN LAS MUESTRAS DE AGUA

La medición de la conductividad nos sirve para saber cuál muestra de agua es la que mejor conduce antes de combinarse con Hidróxido de sodio y después que se hace la combinación. Una vez que ya se cuenta con las muestras, se vertió 25 ml de esta en un vaso de plástico y se introdujo el medidor de TDS, se realizaron un aproximado de 30 muestras por cada tipo de agua en diferentes días, cabe señalar que la medición se hizo el mismo día de su recolección para evitar cualquier variación.

En la Figura 72 a) se tiene la muestra del agua extraída de la laguna de nogales antes de combinarse con Hidróxido de sodio.



a) b) c)
 Figura 72. Conductividad en agua a) agua superficial b) agua de la llave c) agua destilada

De todas las muestras tomadas, en la figura 72 se muestra la más cercana al promedio que se obtuvo de todas las muestras obtenidas.

Ya que se tiene el total de sólidos disueltos, mediante la ecuación 16 procedemos a saber cuál es la conductividad eléctrica de la muestra.

$$\text{Ecuación 60. } EC = \frac{PPM}{FDC} = \frac{310}{0.5} = 620 \mu S/cm$$

$$\text{Ecuación 61. } EC = \frac{PPM}{FDC} = \frac{310}{0.5} = 620 \mu S/cm$$

Como se observa en las ecuaciones 60 y 61, la conductividad del agua superficial y del grifo (respectivamente) es muy pequeña, ya que los sólidos disueltos existentes no son los suficientes para permitir una conductividad que permita el proceso de electrolisis, por lo cual se procede a verter hidróxido de sodio en las muestras de agua que se ocuparan en el electrolizador.

El hidróxido de sodio es una sustancia muy corrosiva, por lo tanto, siguiendo el estudio de [51] se procedió a hacer a hacer una mezcla del 3%, 5% y 10% de hidróxido de sodio por cada Litro de agua del electrolizador, por lo cual, se procedió a pesar el electrolito con una báscula electrónica para obtener un pesaje más exacto.



a)

b)

c)

Figura 73. Peso equivalente según Porcentaje de la sosa caustica. a)3% b)5% c)10%.

Se pone al límite de agua el electrolizador y se vierte el Hidróxido de sodio.

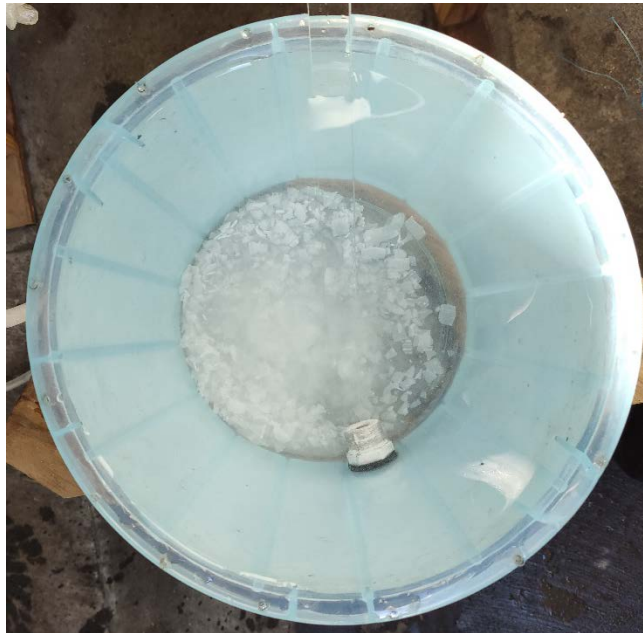


Figura 74. Inserción del electrolito en el agua

Hay que recalcar que la mezcla del electrolito con el agua debe ser completamente, esto para evitar que mientras el proceso de electrolisis se asiente el hidróxido de sodio y el porcentaje de electrolito mezclado con el agua sea menor al pensado. En la figura 75 a) se puede observar que el color del agua

cambia mientras el electrolito es mezclado con este, mientras en la figura 75 b) se observa cómo es que el agua retoma su claridad cuando la mezcla está en su totalidad.

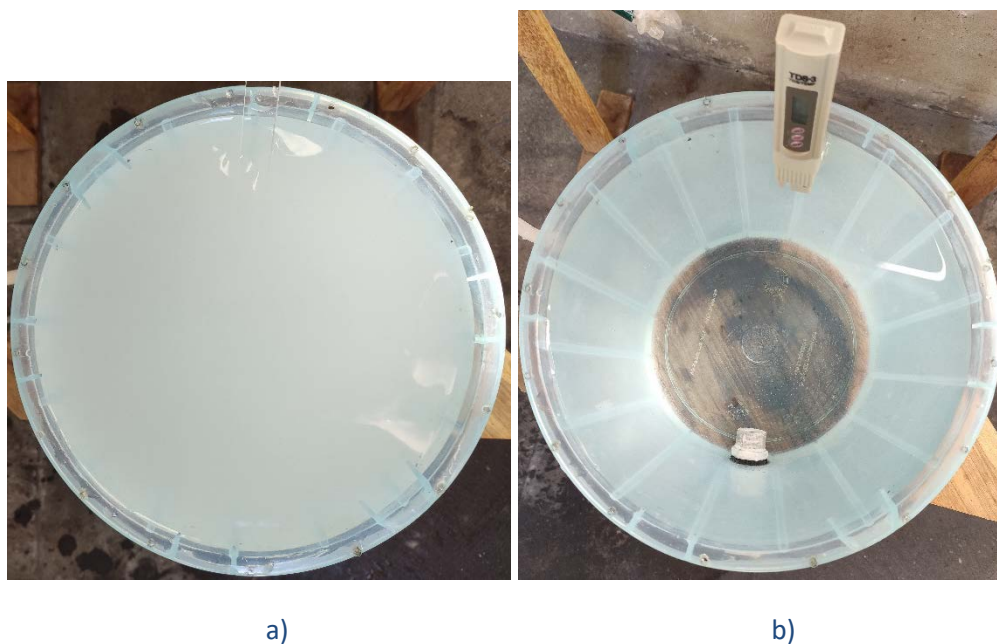


Figura 75. combinación de agua con el electrolito a) mezcla no homogénea, b) mezcla homogénea

Ya que la mezcla es homogénea en todas las muestras, se introdujo el medidor de TDS (figura 75 b)) para obtener las medidas de conductividad de la tabla 12.

Tabla 12, Medida de TDS con sosa caustica en el agua

Tipo de agua \ NaOH	3%	5%	10%
Agua superficial	6980 μ S	7720 μ S	7920 μ S
Agua de grifo	5320 μ S	6060 μ S	6700 μ S
Agua destilada	5940 μ S	6680 μ S	7420 μ S

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 RESUMEN

Durante este capítulo se podrán observar todo lo que dio como resultado de las pruebas realizadas, así como datos y graficas que demuestran cuales eran los datos a esperar, se verán conectados los 2 dispositivos y de igual manera se verán trabajando para su comparación.

En la figura. 76, se observa la configuración deseada para su conexión del diseño 1, así como los componentes que son necesarios para su buen trabajo. Cabe señalar que el elemento No.4 no es necesario para el diseño 2, pero si el resto de los componentes.

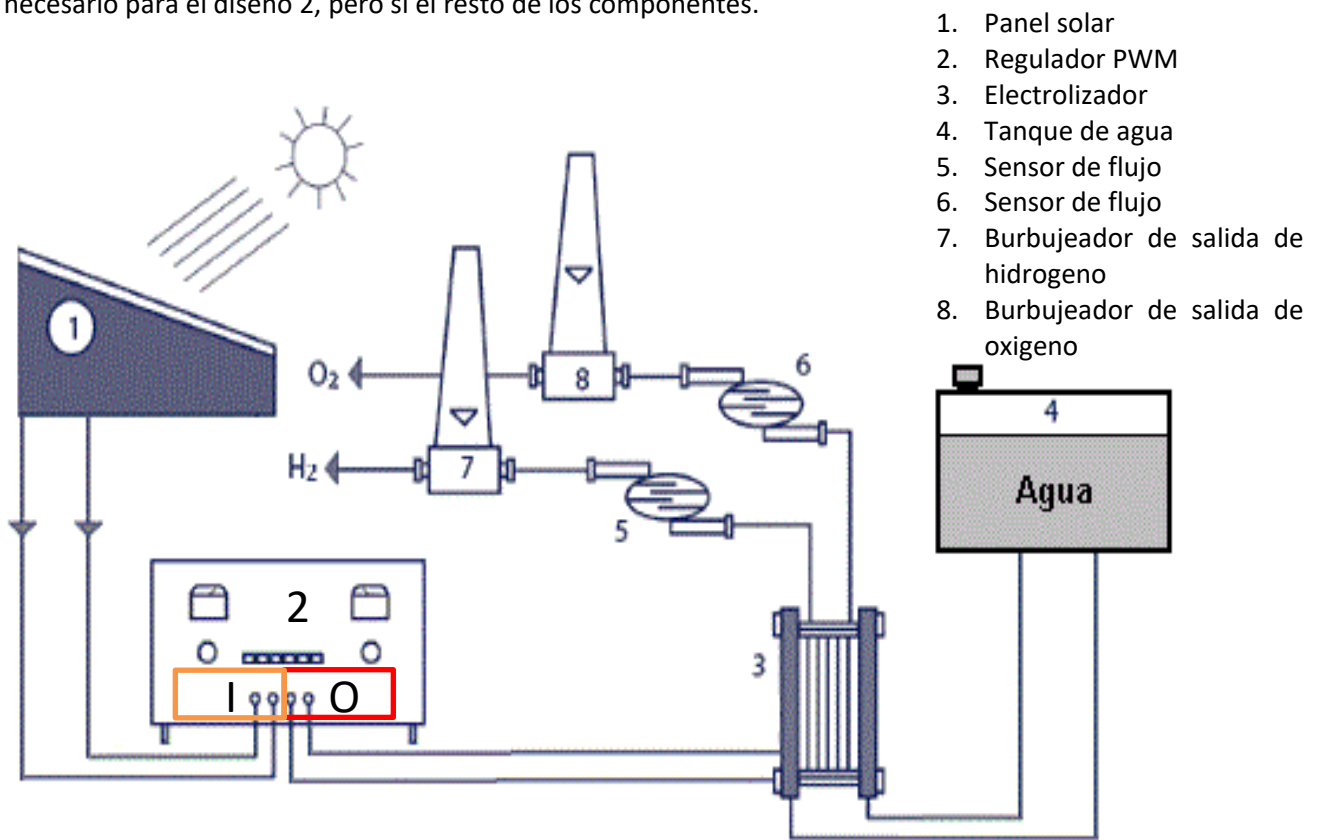


Figura 76. conexión de los componentes

4.2 EMBALAJE DEL SISTEMA DE CONTROL DE CORRIENTE

Para poder realizar las pruebas con el electrolyzador se tiene que conectar al sistema que controlará el flujo de corriente, ya que como se vio en el punto 3.3.4 el controlador PI funciona correctamente en la simulación, por lo tanto, ya que se controlara con una tarjeta Arduino se implementó un código para que con la misma tarjeta se pueda recibir los datos que envíe el sensor de flujo, de temperatura y corriente y así poder ahorrar espacio, por lo cual se implementó colocar todos estos dispositivos dentro de una caja a excepción del sensor de flujo de gas, ya que se necesita que permanezca en el exterior y evitar que alguna chispa produzca una explosión por el flujo del gas hidrogeno. Se pensó en la colocación así de estos dispositivos para que el manejo de todos estos sea más sencillo y así poder

evitar la desconexión accidental de algún dispositivo, hay que recalcar que todos los dispositivos dentro de la caja fueron asegurados por tornillos para evitar que estos se movieran del lugar colocado.

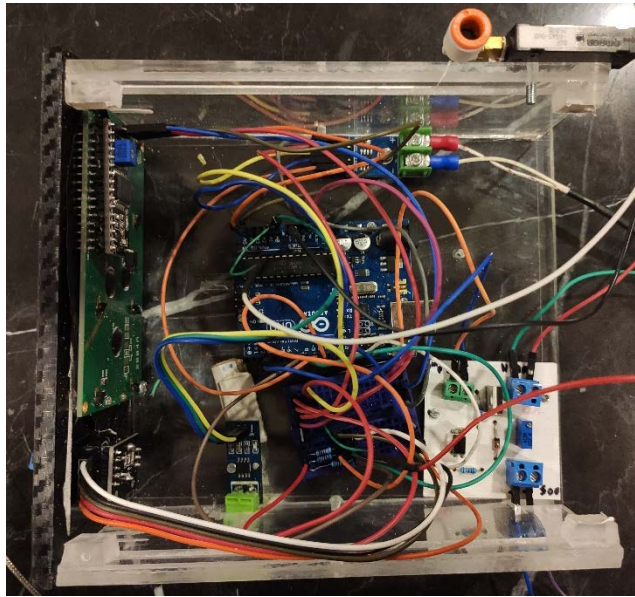


Figura 77. Dispositivos dentro de la caja

Del mismo modo se implementó el manejo mediante un módulo encoder rotativo para poder controlar el valor de referencia, esto ya que el valor de la fuente de alimentación puede variar, y para evitar estar alterando el código cada vez que el valor de referencia se quiera modificar, mediante el encoder rotativo aumentar o disminuir el valor de este. De igual manera se colocó una pantalla lcd de 20x4 para poder observar los valores de los diferentes sensores y del valor de referencia fijado, estos dos dispositivos fueron colocados en la parte frontal de la caja.

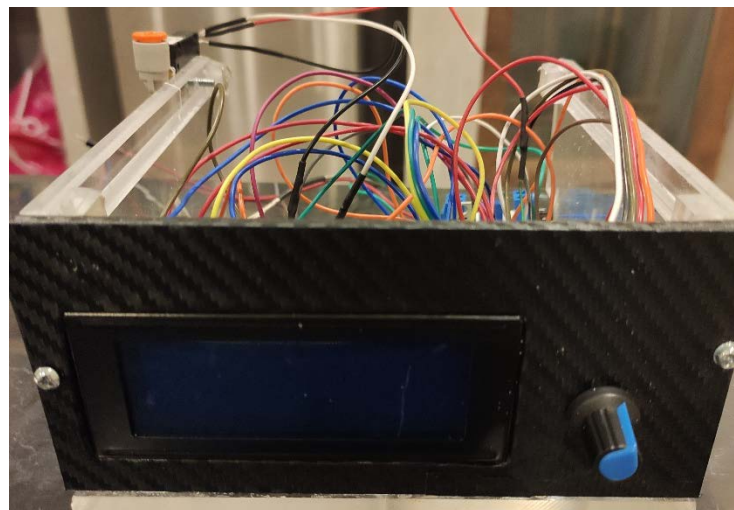


Figura 78. Parte frontal de la caja

4.3 PROTOTIPOS ARMADOS PARA EXPERIMENTACIÓN

El primer paso para poner en funcionamiento el electrolizador se debe establecer la concentración química de la solución electrolítica, considerando los valores de la tabla 12, se experimentará con las concentraciones de electrolito que ahí se presentan y así poder conocer cual concentración otorga mejor resultado. Una vez la mezcla este disuelta se procedió a armar cada uno de los prototipos con sus respectivos tornillos dependiendo si es el prototipo No.1 o No.2.

En el caso del prototipo No.1 se aseguran las tapas de acrílico con 16 pernos de 6 pulgadas hechos de acero inoxidable, cada perno tiene un juego de tuercas y arandelas, las cuales se aprietan de tal forma que el electrolizador resulte totalmente sellado.



Figura 79. Prototipo No.1 armado

Una vez sellado, las mangueras son colocadas en la entrada para introducir la solución del agua con electrolito y asegurándolos adecuadamente con abrazaderas, de forma similar se asegurará las mangueras de los tanques que sirven como respiraderos de los gases mediante abrazaderas.

Se debe comprobar que el electrolizador se encuentre lleno en su totalidad para que las pruebas que se realizaran aprovechen toda el área efectiva en los electrodos cabe señalar que la conexión eléctrica debe ser verificada para evitar algún corto eléctrico, ya que se estarán ocupando alta corriente.

En el caso del prototipo No. 2, se coloca el empaque en la tapadera donde están los electrodos y se atornillan con 16 tornillos de ... con sus respectivas tuercas.



Figura 80. Prototipo No.2 armado

Igualmente, que en el prototipo No.1, se corrobora que el prototipo No.2 este lleno en su totalidad para así poder aprovechar toda el área efectiva de los electrodos, las salidas de los gases van conectadas a los respiraderos y la conexión eléctrica se verifica que la conexión positiva esté conectada en los electrodos de la parte exterior y por consiguiente la parte negativa en la parte interior.

4.4 DATOS EXPERIMENTALES

Durante la experimentación se pudo observar la relación entre corriente y temperatura basándose en diferente variables, ya que la corriente que fluye en los electrodos depende del porcentaje de electrolito que exista en la solución así como el área efectiva del electrodo y la distancia que existe entre el ánodo y el cátodo, pero en el caso de la experimentación el are efectiva como la distancia de los electrodos no varía, por lo cual, de la Figura 81 a la 86 se muestran las gráficas las cuales muestran cómo se comporta la corriente con respecto al porcentaje de hidróxido de sodio en el agua, en donde mediante el potenciómetro de control PWM se indicó que proporcionara solo 4A al sistema durante aproximadamente 5 horas para poder observar el comportamiento sin correr el riesgo de algún accidente con los dispositivos.

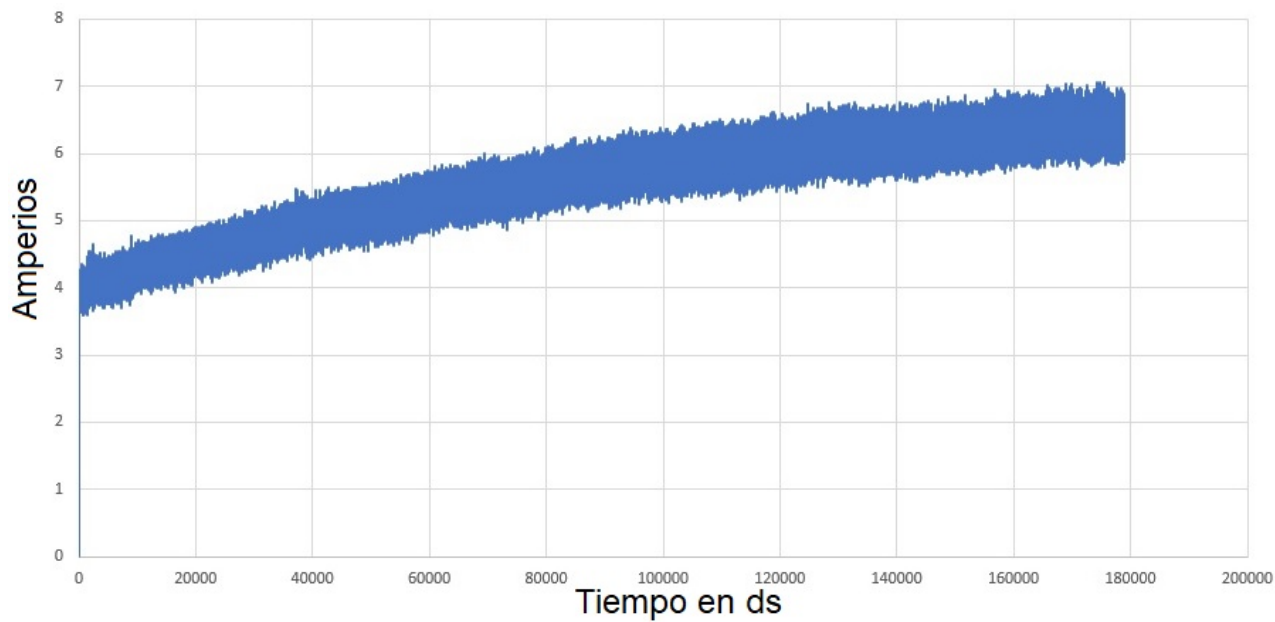


Figura 81. comportamiento de la corriente con 3% de NaOH.

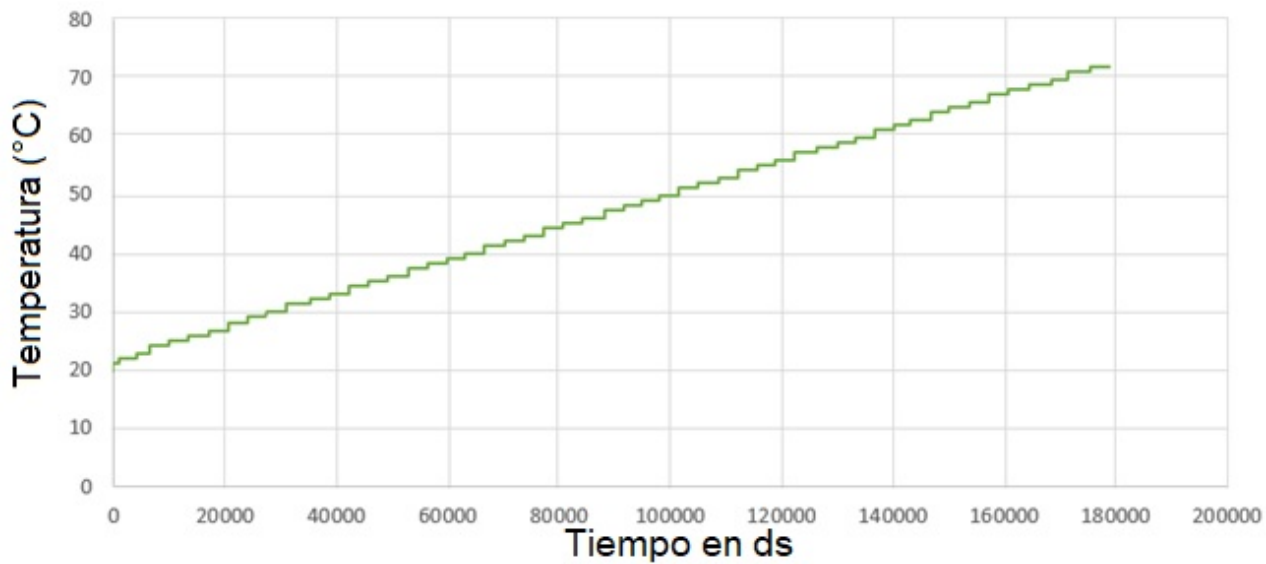


Figura 82. comportamiento de la temperatura con 3% de NaOH.

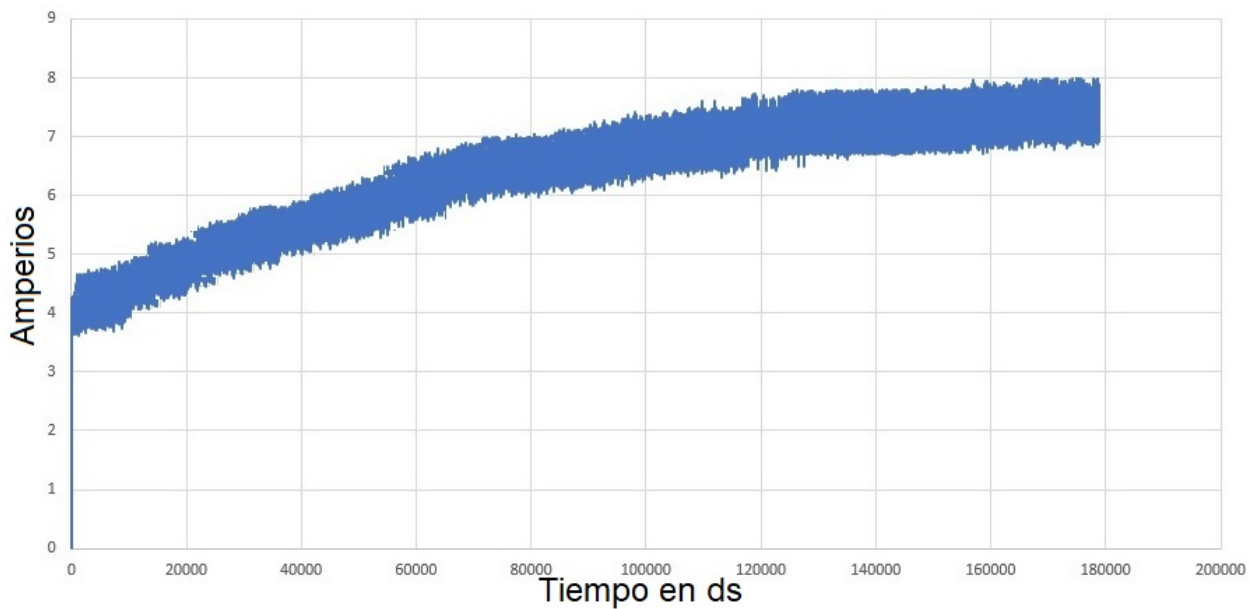


Figura 83. comportamiento de la corriente con 5% de NaOH.

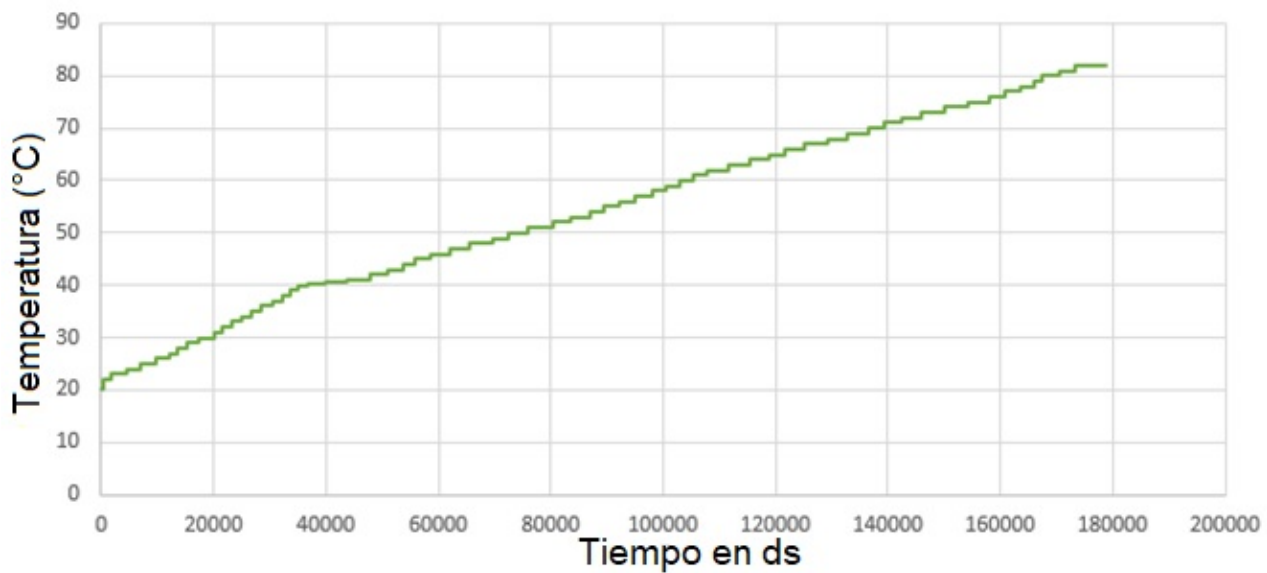


Figura 84. comportamiento de la temperatura con 5% de NaOH.

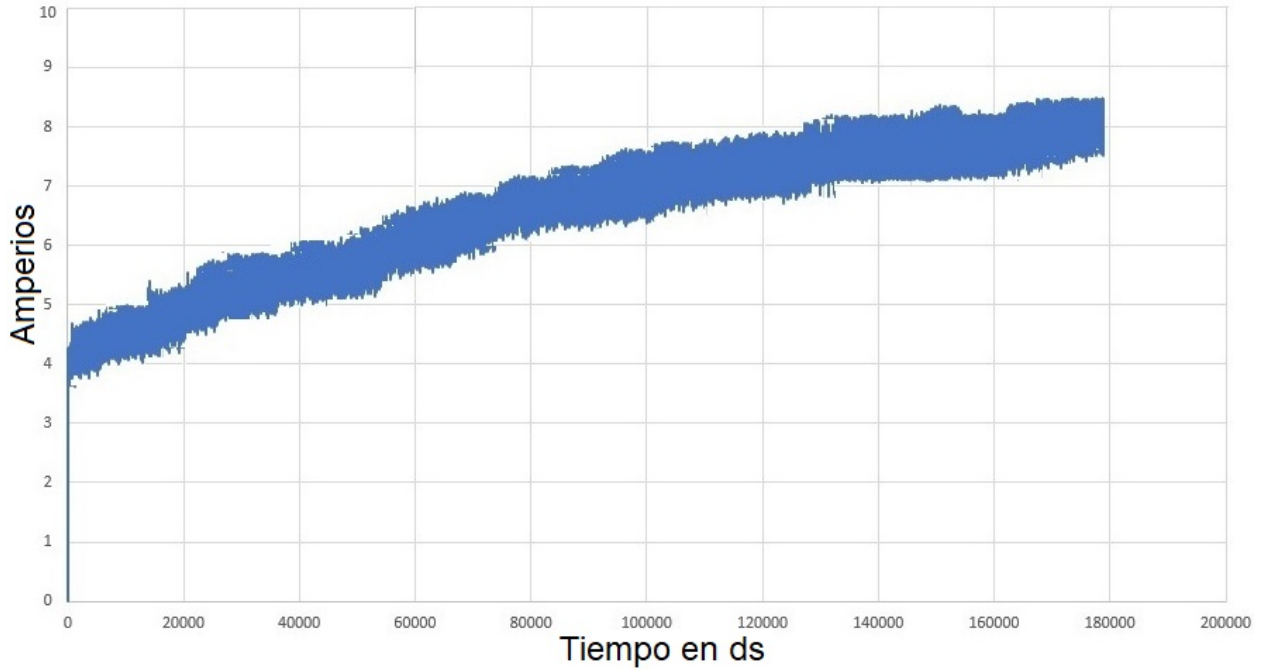


Figura 85. comportamiento de la corriente en una solución del 10% de NaOH.

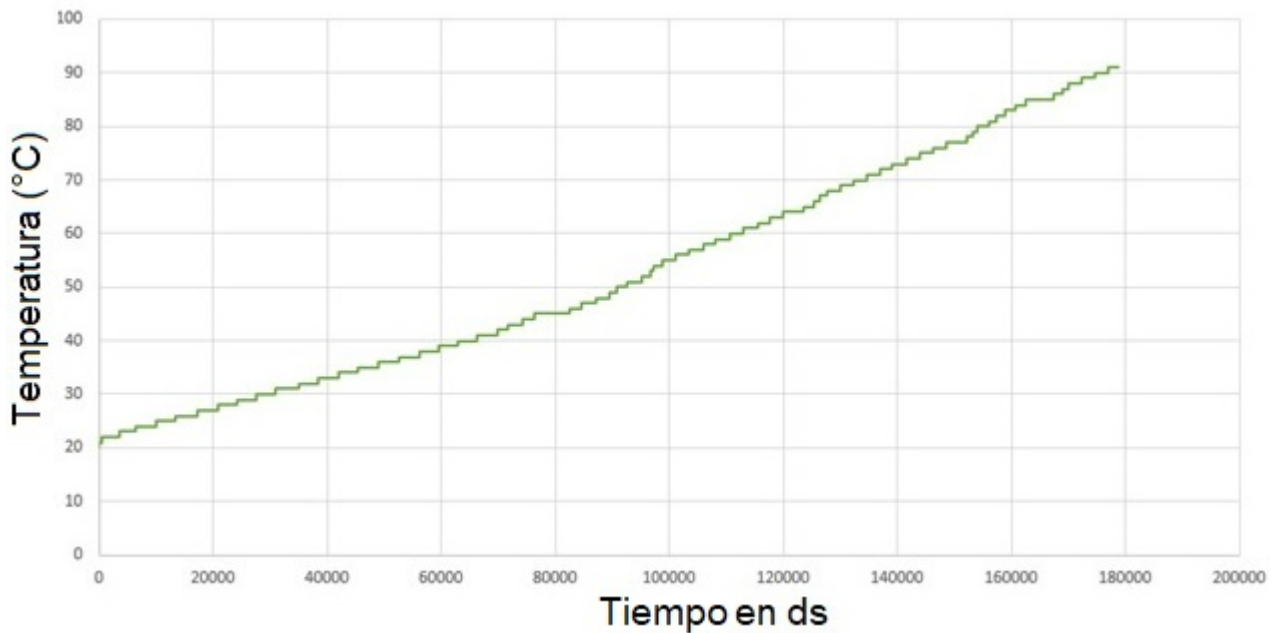


Figura 86. comportamiento de la temperatura en una solución del 10% de NaOH.

Como se observa en las gráficas, el comportamiento de la corriente y la temperatura se acentúa acorde el aumento del hidróxido de sodio (NaOH) es presente en el agua. Por lo cual podemos entender que las pruebas arrojan que el agua al subir su temperatura sube su continuidad y entre más NaOH esté presente como electrolito, mayor será la corriente que el electrolizador exija conforme la temperatura

aumente. Este comportamiento era el esperado, pues como ya se ha venido explicando con anterioridad el aumento de temperatura es un factor que ayuda al proceso de electrolisis. Sin embargo, se observó que, al subir el porcentaje de NaOH al agua, la fuente de alimentación empezó a calentarse, ya que al parecer estaba entrando en cortocircuito por la el aumento de continuidad que se generaba. Es por esto que se pensó en implementarse un control de corriente que a pesar que la temperatura aumente el consumo de corriente sea el mismo.

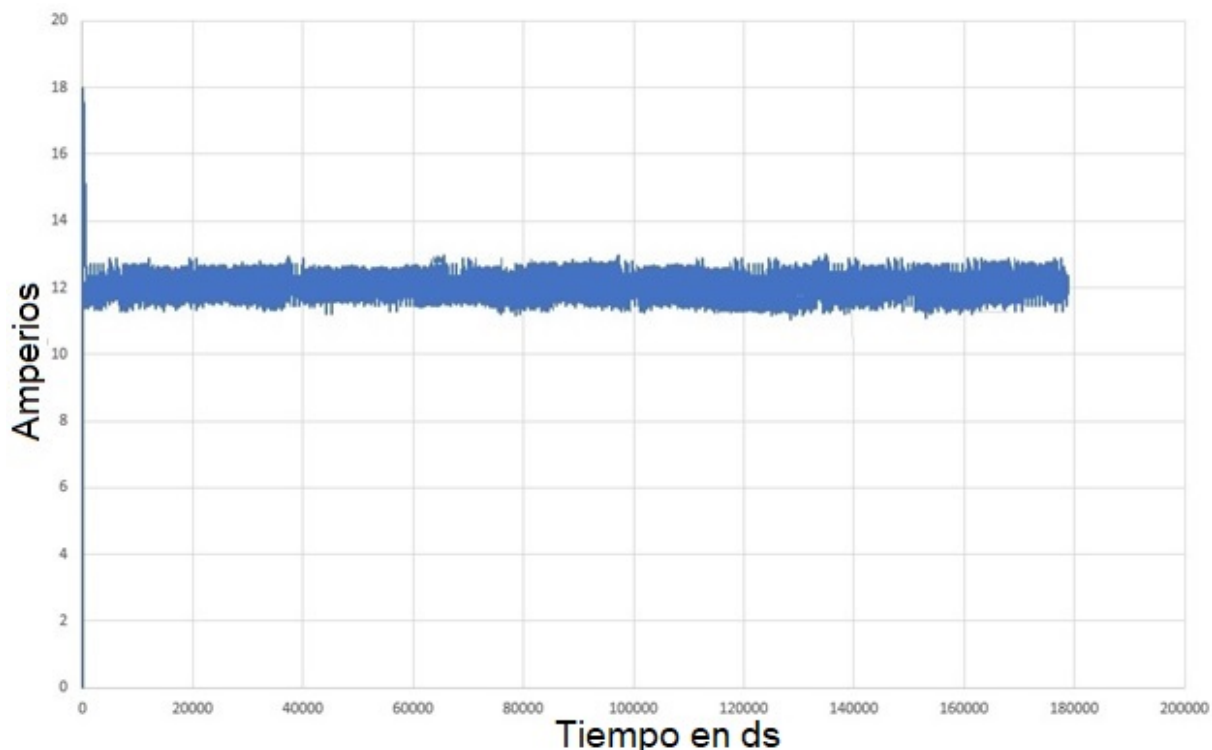


Figura 87. Comportamiento de la corriente con el control PI en una solución del 5% de NaOH

Como se observa en la figura 87, el control PI cumple el propósito por el cual fue diseñado, se fijó el valor en 12A y a pesar que se presentan sobresaltos para poder estabilizar el valor, durante el tiempo de la prueba a pesar de lo que establece la Figura 84, la corriente se mantuvo en el punto establecido y no subió a pesar de la temperatura.

4.4 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

En las pruebas para conocer la producción de hidrogeno, se utilizó el sensor de flujo D6F-A3 OMRON. Este sensor se conectó al Arduino en conjunto con el controlador PI, hay que señalar que las pruebas se realizaron en el prototipo No. 2, ya que durante las pruebas se observó que el prototipo No.1 a

pesar que su producción era muy buena no separaba los gases, es por ello que al final se enfocó en el prototipo No.2 para su estudio observándose los siguientes resultados.

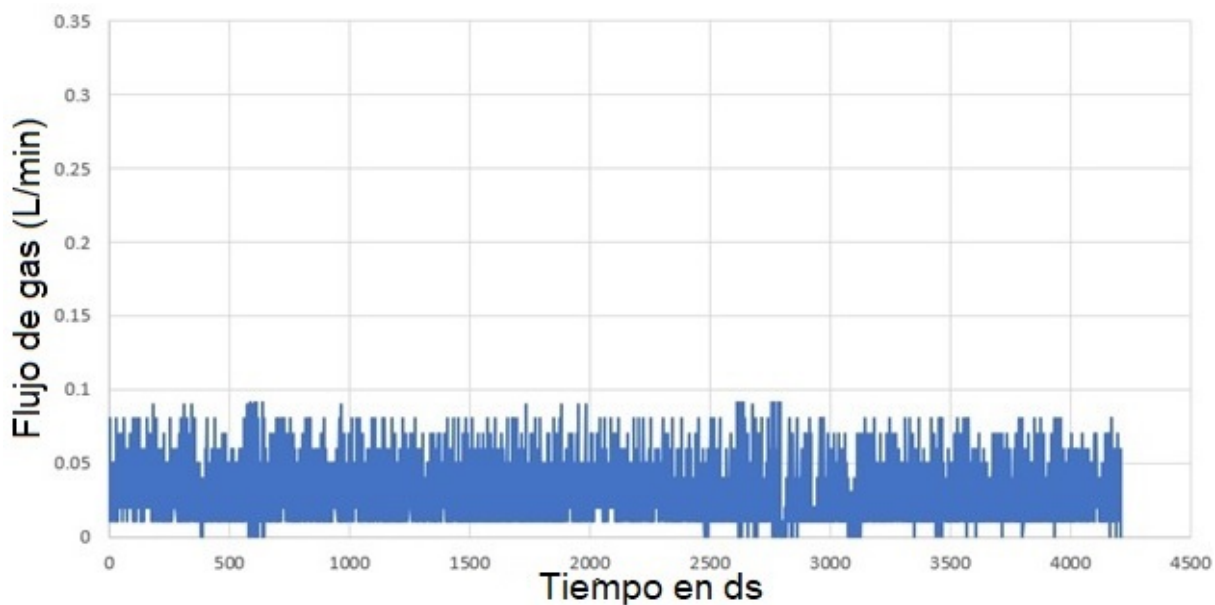


Figura 88. Producción de gas Hidrógeno

Como se observa en la figura 88, la producción del gas hidrogeno es similar al calculado en el punto 3.2.7, ya que en promedio se registró una producción del 0.08 L/min es por esto que se puede intuir que el proceso de control es correcto y estable según los cálculos.

Para corroborar los datos obtenidos, se estableció el llenado de una bolsa plástica con capacidad de 5L.

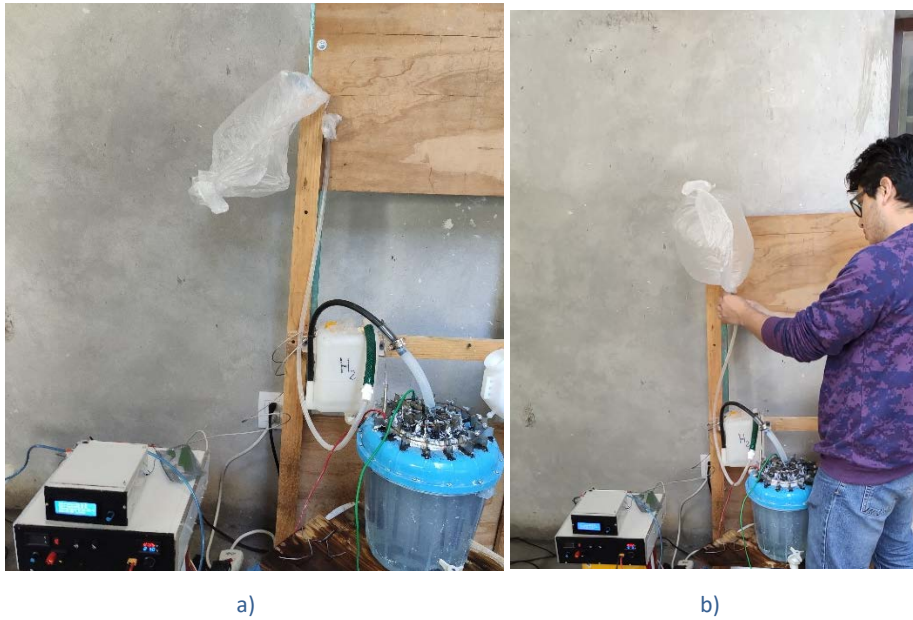


Figura 89. Experimentación llenando bolsa plástica. a) bolsa vacía b) bolsa llena

El proceso de llenado llevo una hora, por lo cual es un hecho que la producción y los cálculos son correctos, de igual manera al llenarse la bolsa plástica, al ser Hidrógeno en forma gaseosa tenía que tender a elevarse (figura 89) ya que como se ha explicado, el Hidrógeno es el elemento más liviano que existe en el universo, es por ello que se pudo comprobar que se trataba de Hidrógeno.



Figura 90. Bolsa plástica con 5L de gas Hidrógeno

4.5 PUREZA DEL GAS

A pesar que ya se contaba con las pruebas que demostraban la separación de los gases en el electrolizador, se necesitaba conocer la pureza de este, ya que el prototipo trabajara para alimentar una celda de combustible y es importante que sea de la mayor pureza posible, es por ello que se recurrió al uso de un cromatógrafo de gases para realizar las mediciones de la pureza con las que este contaba. Se tomaron muestras de la producción de gas que se obtuvo con los diferentes tipos de agua que se manejaron en el electrolizador.



Figura 91. Recolección de muestras de gas



Figura 92. muestras tomadas mediante diferencia de masas

El cromatógrafo que se ocupó fue el PeakSimple-COM1, este cromatógrafo era capaz de leer diferentes tipos de gases, por desgracia no era capaz de leer Hidrógeno, fue por ello que se tomó la decisión que mediante la muestra que se ingresara al cromatógrafo si encontraba algún otro tipo de gas, se haría la diferencia con respecto a la pureza del gas hidrogeno, y esto nos daría el porcentaje de pureza en el gas.

La primera muestra en analizar fue la recabada del agua destilada:

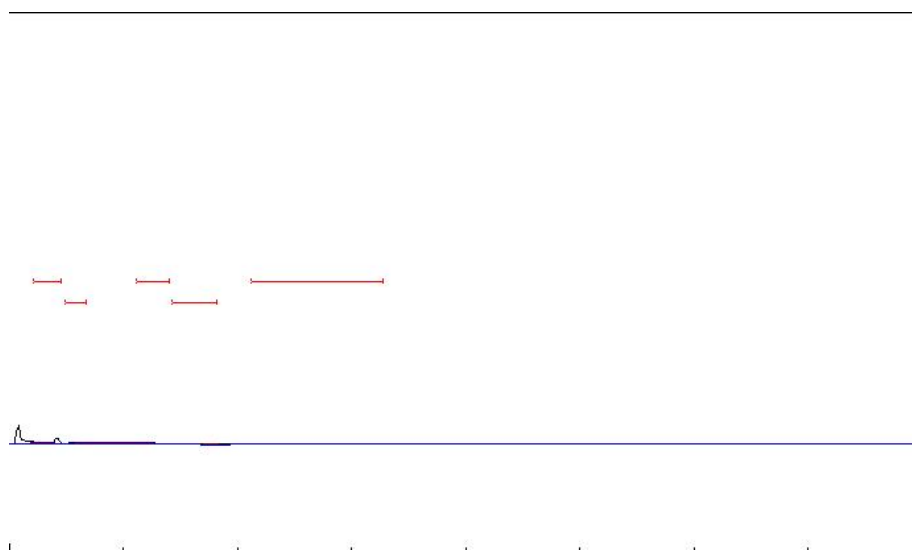


Figura 93. análisis del gas hidrógeno obtenido del agua destilada

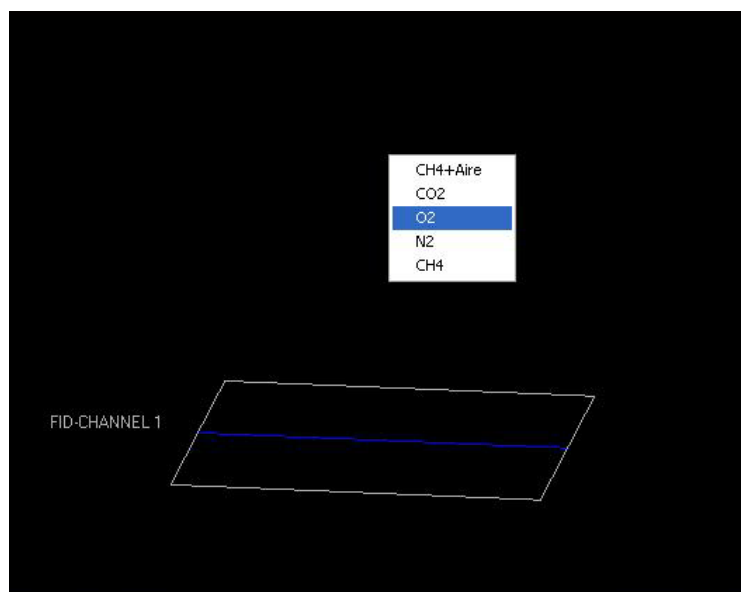


Figura 94. sin detección de Oxígeno en la muestra.

Como se esperaba de la muestra obtenida del agua destilada, no se encontraron rastros de algún otro gas, más que de una mínima perturbación haciendo que su pureza sea de un 99%.

La siguiente muestra fue la recabada con el agua de grifo, esta muestra es la que más interesa, ya que es la que se piensa seguir ocupando para su uso en la celda de combustible.

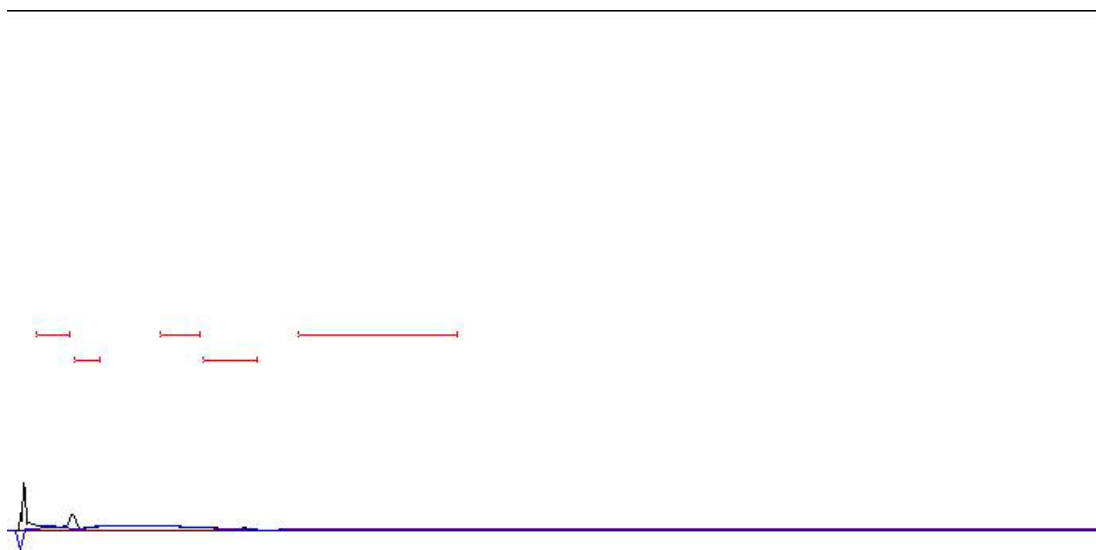


Figura 95 . análisis del gas hidrógeno obtenido del agua de grifo

La muestra no salió tan perfecta como la muestra obtenida del agua destilada, pero es suficiente para poder trabajar con la celda de combustible, ya que la maquina arrojó que la pureza de esta muestra es del 96%.

La muestra del agua superficial no está mal ya que dio una pureza del 92% (figura 95), pero el agua de grifo está más accesible para su proceso electroquímico, por lo cual se seguirá trabajando con este tipo de agua.

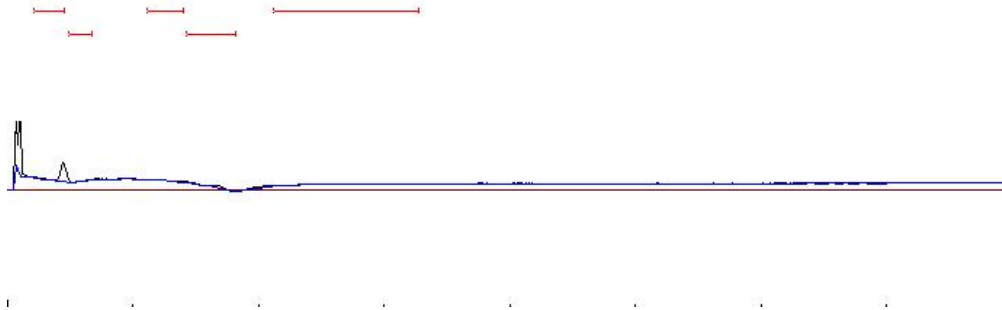


Figura 96. análisis del gas hidrógeno obtenido del agua superficial

CONCLUSIONES

Es obvio que la demanda de energía que existe hoy en día está haciendo que se busquen alternativas para cuando las fuentes de energía que nos abastecen actualmente se agoten. Es por ello que una opción es la utilización de energías que no emitan más sustancias nocivas comprometiendo la salud y los ecosistemas.

La redacción de este trabajo está enfocada en la investigación de almacenamiento de energía mediante el elemento más abundante del universo, el Hidrógeno. Este sistema busca la utilización de fuentes de energía renovables para el proceso de electrolisis, por lo cual el poder buscar controlar la corriente que suministre esta, permite que se aproveche mejor cualquier tipo de fuente sin el riesgo de estar gastando en reposiciones de las fuentes, llegando a hacer el mismo gasto que el utilizar la administración de una compañía eléctrica. En el marco teórico se expone el desarrollo de un sistema de generación de hidrógeno utilizando aguas superficiales alimentado por energía solar. El primer punto se demostró ya que el utilizar este tipo de agua reduce el gasto de producción de hidrogeno, y se probó que se puede obtener Hidrógeno de alta pureza capaz de utilizarse en una celda de combustible, el segundo punto se buscó la utilización de paneles solares para su prueba con el electrolizador, pero e demostró que mediante el controlador PI se puede utilizar cualquier tipo de fuente, ya que se puede evitar el sobrecalentamiento de esta.

También se espera que mediante las lecturas proporcionadas de los sensores que se ocuparon en este proyecto quede demostrado que mientras la calidad del sensor sea mayor, la sensibilidad mejorara, dando mejores lecturas y menos ruido, por lo cual se recomienda que en un futuro los sensores a ocupar sean de mayor calidad, ya que el sensor de corriente presentaba un calentamiento excesivo aun cuando el fabricante exponía que soportaba hasta 30A.

Para poder complementar el proyecto se podría implementar un control de temperatura mediante una circulación del electrolito, esto para que la estabilidad de corriente y temperatura sea más eficiente, de igual manera un tratamiento del agua después de su proceso de electrolisis sería muy conveniente ya que los electrodos a pesar de ser de acero inoxidable con el tiempo se degradan soltando diferentes tipos de metales y así poder evitar la contaminación de cualquier parte del proyecto.

Bibliografía

- [1] C. Alatorre Frenk, «Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México,» *SENER*, p. 70, 2009.
- [2] C. Funes Guerra, E. Almansa Rodríguez y D. Fuentes Ferrera, «El Hidrogeno: vector energético del futuro,» *Actualidad Tecnologica*, pp. 20-27, 2010.
- [3] A. Bailón Martínez, Artist, *DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO ACOPLADO AL TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE AGUAS SUPERFICIALES UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR*. [Art]. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO - FACULTAD DE QUÍMICA, 2013.
- [4] s. A. Awawdeh y C. Tweed, «Buildings' Energy Efficiency and Buildings' Energy Codes: a Literature Review,» *International Journal of Applied Science and Technology*, pp. 37-46, 2014.
- [5] J. Iwaro y A. Mwashu, «A review of building energy regulation and policy for energy conservation in developing countries,» *Energy Policy*, pp. 7744-7755, 2010.
- [6] L. Beltrán Rodríguez, R. Alexandri Rionda, F. d. J. Cafaggi Félix, S. Barrera Ríos, B. Henández Miranda y M. d. P. Guerrero Hernández, «Balance Nacional de Energía,» *SENER*, México, 2017.
- [7] R. Alexandri Rionda y L. A. Muñoz Cano, «Prospectiva de Energías Renovables 2016 - 2030,» *SENER*, pp. 17-26-105, 2016.
- [8] N. V. Gnanapragasam y M. A. Rosen, «Sustainability of an energy conversion system in Canada involving largescale integrated hydrogen production using solid fuels,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, vol. 2, 2015.
- [9] INEGI, «CUENTAS ECONÓMICAS Y ECOLÓGICAS DE MÉXICO,» AGUASCALIENTES, AGS., 2015.
- [10] E. Aguilar Jaramillo y A. Aguinaga, Artists, *Modelamiento y Simulación de la Producción de Hidrógeno en un Electrolizador a Partir de Vapor Sobrecalentado de Agua*. [Art]. Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador, 2018.
- [11] E. A. GARCÍA, Artist, *EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE DISTINTOS ARREGLOS DE ELECTROLIZADORES ALCALINOS*. [Art]. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2015.
- [12] Á. Aguinaga, Artist, *Diseño y construcción de un prototipo de planta dispensadora de hidrógeno doméstica, con electrolizador híbrido, solar y eléctrico*. [Art]. Departamento de Ingeniería Mecánica (DIM), 2009.

- [13] M. V. Félix Lerma y J. J. Contreras Pacheco, Artists, *DISEÑO DE ELECTROLIZADOR CON EFICIENCIA ÓPTIMA PARA LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO INDUSTRIAL*. [Art]. Instituto Tecnológico Superior de Mascota, Mascota, Jalisco, México, 2015.
- [14] R. M. M.J. Lavorante, Artist, *ESTUDIO SISTEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO DE ELECTRODOS DE ACERO INOXIDABLE 316L PICADOS CON HCl PARA SU USO EN ELECTROLIZADORES BIPOLARES ALCALINOS*. [Art]. Pontificia Universidad Católica Argentina de los Buenos Aires,, 2011.
- [15] D. M. E. C. André, Artist, *SIMULACIÓN DE MODELO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO PURO COMO COMBUSTIBLE PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR*. [Art]. UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, 2018.
- [16] C. GIOCOMINI, «Sistema generador de hidrógeno para múltiples fines». España Patente 2627448, 03 09 2010.
- [17] M. BRICHESE, A. CALDERARA y C. DEL CURTO, «Cátodo para liberación electrolítica de hidrógeno». España Patente 2606306, 11 11 2013.
- [18] O. E. RAMOS AGUNDO, «Sistema de electrolisis para la producción de hidrógeno, oxígeno y energía eléctrica a partir». España Patente 2609978, 21 09 2015.
- [19] A. PATRU, F. FAVIER y N. JEREZ, «Electrodos compuestos para la electrólisis del agua». España Patente 2612784, 02 08 2013.
- [20] Foronuclear, «Foro Nuclear,» Pilar Sánchez, 02 02 2019. [En línea]. Available: <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqas-sobre-energia/capitulo-1/115491-ique-unidades-se-usan-para-medir-la-energia>. [Último acceso: 02 02 2019].
- [21] S. J. Sánchez Miño, «ENERGÍAS RENOVABLES Conceptos y Aplicaciones,» *WWF - Fundación Natura*, pp. 1-129, 2003.
- [22] N. Vidal, «El Insignia,» 17 junio 2017. [En línea]. Available: <https://blog.elinsignia.com/2017/06/17/concepto-de-energia/>. [Último acceso: 10 febrero 2019].
- [23] J. Cepeda y A. Sierra, «Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones,» Bogota, Colombia, 2018.
- [24] E. M. BENAVIDES FARÍAS y H. P. ROSARIO MORALES, Artists, *IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE REGULACIÓN PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS*. [Art]. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DE QUITO, 2010.

- [25] B. Rios, M. Roland y A. Viscarret, Artists, *Energía Solar Fotovoltaica: Estrategias de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia*. [Art]. Facultad de Ingeniería Universidad de la República Uruguay, 2014.
- [26] V. H. BELTRAN ARMAZA, Artist, *ELECTRIFICACION MEDIANTE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS*. [Art]. UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS, 2013.
- [27] C. R. Acosta Rojas y G. E. Acosta Quishpe, Artists, *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROLIZADOR DE CORRIENTE CONTINUA DE 200 WATIOS CON ENERGÍA SOLAR E INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA MEDIR LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO*. [Art]. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.
- [28] C. B. Fernández Bolaños, Artist, *Energética del hidrógeno. Contexto, Estado Actual y Perspectivas de Futuro*. [Art]. Universidad de Sevilla, 2015.
- [29] W. J. Brown, «SAFETY STANDARD FOR HYDROGEN AND HYDROGEN SYSTEMS,» Office of Safety and Mission Assurance, Washington, DC , 2007.
- [30] «Termodinámica II,» 11 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://termodinamic2.blogspot.com/2016/02/el-coeficiente-de-joule-thomson.html>. [Último acceso: 15 febrero 2019].
- [31] A. Mendoza Medellín, «El hidrógeno y la energía,» *Ciencia Ergo Sum*, vol. 13, nº 1, pp. 99-104, 2006.
- [32] E. Flores Suárez, Artist, *Estado Actual del Hidrógeno Aplicado a Celdas de Combustible*. [Art]. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM), 2016.
- [33] G. Pi Amorós, Artist, *Sistema de aprovechamiento de la energía de las olas del mar*. [Art]. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona - Enginyeria Industrial- Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [34] O. REYES VELIZ y R. TRUJILLO RODRIGUEZ, Artists, *GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE HIDRÓGENO OBTENIDO POR MEDIO DE ELECTRÓLISIS*. [Art]. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL- ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD ADOLFO LOPEZ MATEOS DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA, 2016.
- [35] L. MONROY MORA, J. ROJAS FLORES, A. YATE, D. ARAMBURO y C. ARANGO, Artists, *PROYECTO DE INVESTIGACION DEL HIDROGENO VEHICULAR*. [Art]. FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA - INGENIERIA QUIMICA, METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION, BOGOTA, 2013.
- [36] J. H.-E. M. D.-S. C. F.-I. A. S. M. Ibanez, «Environmental Chemistry,» *Springer*, 2007.

- [37] E. AGUILAR GARCÍA, Artist, *EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE DISTINTOS ARREGLOS DE ELECTROLIZADORES ALCALINOS*. [Art]. ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2015.
- [38] R. Krishnan, R. McConnel y S. Licht, *Solar Hydrogen Generation*, New York: Springer, 2009.
- [39] L. G. MORENO VALLEJO y C. E. VARGAS GALLO, Artists, *LA TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO, UNA OPORTUNIDAD ESTRATÉGICA PARA LA PERDURABILIDAD DEL SECTOR ENERGÉTICO EN COLOMBIA*. [Art]. UNIVERSIDAD DE NUESTRA SEÑORA DEL ROSARIO, FACULTAD DE ADMINISTRACIÓN, 2013.
- [40] B. B. G. R. & L. B.-M. C. Barrera-Díaz, «Physicochemical Aspects of Electrocoagulation,» *Separation & Purification Reviews*, vol. 40, pp. 1-24, 2011.
- [41] M. Pulido Bosch y F. Romero Hinojosa, «La Física y la Química en su contexto histórico,» 14 marzo 2001. [En línea]. Available: <https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0314-01/leyconma.htm>. [Último acceso: 17 marzo 2019].
- [42] P. Rey, L. Rivera y E. Terradillos, Artists, *Conductímetro Digital*. [Art]. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Avellaneda, 2012.
- [43] E. R. AGUILAR JARAMILLO, Artist, *MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN UN ELECTROLIZADOR A PARTIR DE VAPOR SOBRECALENTADO DE AGUA*. [Art]. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2015.
- [44] R. L. LEROY, «INDUSTRIAL WATER ELECTROLYSIS: PRESENT AND FUTURE,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 8, nº 6, pp. 401-417, 1983.
- [45] O. Engineering, «omega,» spectris company, 01 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>. [Último acceso: 20 Enero 2020].
- [46] R. H. Gaviño, *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*, ciudad de México: Prentice Hall, 2010.
- [47] E. J. DUQUE CABRERA y J. P. MASAQUIZA MASAQUIZA, Artists, *IMPLEMENTACIÓN DE UN GENERADOR E INYECTOR DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE VEHÍCULO MAZDA BT-50 2.2 L, PARA REDUCIR EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES*. [Art]. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, 2013.
- [48] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2010.
- [49] M. C. M. Massa de Campos y H. C. G. Teixeira, *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*, São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2010.

- [50] A. B. Corripio, *Tuning of Industrial Control Systems*, USA: ISA, 2015.
- [51] E. A. GARCÍA, Artist, *EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE DISTINTOS ARREGLOS DE ELECTROLIZADORES ALCALINOS*. [Art]. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2015.
- [52] A. Riveiro, «astrobitacora,» 5 abril 2017. [En línea]. Available: <https://www.astrobitacora.com/el-hidrogeno-es-el-elemento-mas-comun-del-universo-pero-por-que/>.
- [53] S. M. Rozo Q. y J. E. Tibaquirá G., Artists, *CELIDAS DE COMBUSTIBLE TIPO MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO*. [Art]. Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- [54] Iván, «<http://www.ingenieriaquimica.net>,» 13 Noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.ingenieriaquimica.net/articulos/300-evaluacion-de-los-metodos-de-produccion-de-hidrogeno-a-partir-de-biomasa>. [Último acceso: 26 mayo 2018].
- [55] C. F.-B. Badía, «SISTEMA DE ENERGÍA DEL HIDROGENO,» *Energética del hidrógeno. Contexto, Estado Actual y Perspectivas de Futuro*, pp. 91-126, 2016.