



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA

“Optimización de la Producción de Energía de un Celda tipo PEM”

AUTORES

Wilson Stalin Guerrero Jijón

Miguel Angel Pesantes Pacheco

DIRECTOR: Ing. Cecilia Catalina Grünauer Espinoza. Msc.

GUAYAQUIL

2019

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gary Ampuño
DIRECTOR DE CARRERA

Ing. Cecilia Grünauer
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Juan Carlos Lata
VOCAL

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **WILSON STALIN GUERRERO JIJÓN** y **MIGUEL ANGEL PESANTES PACHECO**, autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de Los Autores.

Guayaquil, Septiembre 03, 2019

f) _____
Autor: Wilson Stalin Guerrero Jijón
Cédula: 0921900049

f) _____
Autor: Miguel Ángel Pesantes Pacheco
Cédula: 0918516527

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **WILSON STALIN GUERRERO JIJÓN**, con documento de identificación N°**0921900049**, manifiesto mi voluntad y cedo a **la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE UNA CELDA TIPO PEM**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Septiembre 03, 2019

f) _____

Autor: Wilson Stalin Guerrero Jijón

Cédula: 0921900049

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **MIGUEL ANGEL PESANTES PACHECO**, con documento de identificación N°**0918516527**, manifiesto mi voluntad y cedo a **la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE UNA CELDA TIPO PEM**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Septiembre 03, 2019

f) _____

Autor: Miguel Angel Pesantes Pacheco

Cédula: 0918516527

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR**

Yo, **CECILIA CATALINA GRÜNAUER ESPINOZA** directora del proyecto de Titulación denominado **“OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE UNA CELDA TIPO PEM”** realizado por los estudiantes **WILSON STALIN GUERRERO JIJÓN** y **MIGUEL ANGEL PESANTES PACHECO**, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, Septiembre 03, 2019

f) _____

Ing. Cecilia Catalina Grünauer Espinoza Msc.

DEDICATORIA

A nuestro Creador, a mis Padres y a todos cuanto me apoyaron para que este proyecto de tesis se cristalice.

A mi amada Stefanie, que con sus palabras de aliento no dejó, que me dé por vencido para poder seguir adelante y poder concluir este proyecto.

Wilson Stalin Guerrero Jijón

AGRADECIMIENTOS

Agradecido siempre con Dios, que con su guía me permitió tomar el camino correcto para poder cumplir este objetivo.

A mis compañeros de trabajo, que siempre me brindaron su apoyo.

Gracias

Wilson Stalin Guerrero Jijón

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo mi amor y cariño a mi esposa Paola Abad, que por su esfuerzo y sacrificio, ella es mi motor, motivación y mi inspiración de cada día para salir adelante; así también continuar en esta lucha para un futuro mejor.

A mis fieles hermanos, María, Ignacio, Jessica José y Daniel, a mis cuñadas y demás familiares quienes que con sus consejos, no me dejaron declinar y así poder alcanzar mis ideales profesionales.

Miguel Ángel Pesantes Pacheco

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, por su inmenso amor y bendiciones que me ha permitido cumplir con una más de mis metas.

A mi esposa Paola, que siempre ha estado brindándome su amor comprensión y cariño.
A mis padres, German Joaquín Pesantes Murillo, María Clemencia (+), que estuvieron aconsejándome para ser de mí una mejor persona, por sus palabras y su compañía, por ser parte de una familia unida.

A todos mis compañeros de trabajo, el Ing. José Alfredo Hanze Abikaran, Sr. Jorge Vaca C., quienes sin esperar nada a cambio estuvieron apoyándome.

A mi madrina de bodas la Sra. Martha Ruano, quien de una u otra forma siempre me daba ánimos para seguir avanzando en mis metas.

A la tutora, Ing. Cecilia Grünauer, quien brindo una excelente guía profesional y orientación para la elaboración del presente trabajo de titulación.

Miguel Angel Pesantes Pacheco

RESUMEN

Tema: OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE UNA CELDA
TIPO PEM

Autores: Wilson S. Guerrero J., Miguel A. Pesantes P.

Director de Tesis: Ing. Cecilia Grünauer Msc.

Palabras Claves: Setep, Celda, AU43, Electrólisis, Optimizar.

El electrolizador utilizado en la tesis anterior desarrollada por Piedra y Noboa no suministraba el caudal de Hidrógeno necesario para el correcto funcionamiento de la celda tipo PEM. Se realizó un diseño que permita mejorar el caudal, mantener una presión constante para poder mejorar el rendimiento de la celda y mejorar la generación eléctrica de la misma.

Este proyecto describe el paso a paso de las pruebas realizadas, desde la obtención del permiso de compra del hidróxido de potasio en el Setep ya que al ser una sustancia sujeta a fiscalización, este compuesto no se lo puede conseguir sin dicho permiso, también incluye el diseño de lo necesario para el almacenamiento de Hidrógeno producido por el electrolizador modelo AU43, consumos energéticos del nuevo electrolizador, generación de energía utilizado la celda de combustible tipo PEM de 100W, análisis y cuadros comparativos de las datos obtenidos con los que obtuvieron los investigadores anteriores Piedra y Noboa y como se logró mejorar el flujo de Hidrógeno en un 76.92%.

ABSTRACT

Topic: OPTIMIZATION OF THE ENERGY PRODUCTION OF A PEM TYPE
CELL

Authors: Wilson S. Guerrero J., Miguel A. Pesantes P.

Thesis Director: Ing. Cecilia Grünauer Msc.

Keywords: Setep, Cell, AU43, Electrolysis, Optimize.

The electrolyser used in the previous thesis developed by Piedra and Noboa did not supply the flow of Hydrogen necessary for the correct functioning of the PEM type cell. A design was made to improve the flow, maintain a constant pressure to improve the cell's performance and improve its power generation.

This project describes the step by step of the tests carried out, since obtaining the purchase permit for potassium hydroxide in the Setep since being a substance subject to control, this compound cannot be obtained without such permission, it also includes the design of what is necessary for the storage of hydrogen produced by the AU43 model electrolyzer, energy consumption of the new electrolyser, power generation using a 100W PEM type fuel cell, analysis and comparative tables of the data obtained with those obtained by previous researchers Piedra and Noboa and how the Hydrogen flow was improved by 76.92%.

INDICE DE CONTENIDOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN	ii
CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	v
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR.....	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
DEDICATORIA	ix
AGRADECIMIENTOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INDICE DE CONTENIDOS	xiii
INDICE DE FIGURAS.....	xvi
INDICE DE TABLAS	xviii
INDICE DE ANEXOS	xx
ABREVIATURAS.....	xxi
SIMBOLOGÍA	xxii
INTRODUCCIÓN	24
CAPÍTULO I	25
1. EL PROBLEMA.....	25
1.1. Planteamiento del problema.....	25
1.2. Justificación	25

1.3. Delimitación.....	25
1.3.1. Delimitación espacial.....	25
1.3.2. Delimitación académica.....	25
1.3.3. Delimitación temporal.....	26
1.4. Objetivos	26
1.4.1. Objetivos Generales	26
1.4.2. Objetivos Específicos.....	26
CAPÍTULO II	27
2. MARCO TEÓRICO.....	27
2.1. El Hidrógeno	27
2.1.1. Propiedades del Hidrógeno	28
2.1.2. Almacenamiento del Hidrógeno	29
2.1.2.1. Estado Gaseoso	29
2.1.2.2. Estado Líquido	30
2.1.2.3. Estado Sólido	30
2.2. Electrólisis.....	31
2.2.1. Tipos de electrolizadores	33
2.3. Electrolitos	36
2.4. Hidróxido de Potasio.....	37
2.5. Celda de Combustible	37
2.5.1. Tipos de Celdas de Combustible.....	39
CAPÍTULO III.....	41
3. METODOLOGÍA	41
3.1. El Diseño.....	41
3.2. Obtención del KOH en el Ecuador	42
3.3. Electrolizador Modelo AU43.....	43

3.4. Determinación del flujo volumétrico y presión de Hidrógeno producido por el electrolizador AU43.....	46
3.4.1. Determinación del volumen total del sistema.....	47
3.4.2. Determinación de la presión generada por el Hidrógeno en el sistema.....	49
3.4.3. Determinación del flujo volumétrico del Hidrógeno producido.....	51
3.5. Cálculo estequiométricos en el electrolizador para determinar la producción de hidrógeno gaseoso mediante el proceso de electrólisis del agua.....	53
3.6. Pasos para medir el voltaje y la intensidad de corriente consumida por el electrolizador modelo AU43.....	55
3.7. Generación.....	56
3.7.1. Pasos para medir el voltaje y la intensidad de corriente producida por la celda de Combustible tipo PEM.....	56
CAPÍTULO IV.....	58
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	58
4.1. Ensayos realizados para determinar la temperatura óptima de la solución electrolítica.....	58
4.2. Producción de Hidrógeno.....	61
4.3. Generación de energía eléctrica utilizando la celda de combustible tipo PEM..	63
CONCLUSIONES.....	64
RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	66
ANEXOS.....	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fuentes de Producción de Hidrógeno.....	27
Figura 2: Tanque de Almacenamiento Hidrógeno Gaseoso.	30
Figura 3: Tanque de Almacenamiento Hidrógeno Líquido.	30
Figura 4: Tanque de Almacenamiento Hidrógeno Sólido.	31
Figura 5: Proceso Electrolítico.....	32
Figura 6: Célula Unipolor.	33
Figura 7: Filtro- Prensa.	34
Figura 8: Diagrama de la constitución interna de un Electrolizador PEM	35
Figura 9: Procesos de Disolución del NaCl en Agua.....	36
Figura 10: Procesos de Disolución del HCl En Agua.....	36
Figura 11: Concepto general de la Celda de Combustible.....	38
Figura 12: Ánodo - Electrolito - Cátodo de una Celda de Combustible.	38
Figura 13: Placas de Acero Inoxidable	44
Figura 14: Empaques de Caucho.	44
Figura 15: Pernos, Anillos Planos, Anillos de Presión, Tuercas.	44
Figura 16: Placas de Acrílicos.	45
Figura 17: Cableado Rojo y Negro.	45
Figura 18: Conectores para Manguera.	45
Figura 19: Armado de AU43.	46
Figura 20: Segmentos para Calcular el Volumen de Agua en el Sistema.....	48
Figura 21: Segmentos para Calcular la Presión en el Sistema	49
Figura 22: Conexiones Electricas del Electrolizador Modelo AU43.....	50
Figura 23: Segmentos para calcular el flujo en el sistema con un tanque de 0.7L. ...	51
Figura 24: Producción de Hidrógeno Medición Mediante Probeta 1 Litro.	52
Figura 25: Segmentos para Calcular el Flujo en el Sistema con un Tanque de Almacenamiento de 7 Litros.....	52
Figura 26: Lectura de Intensidad de Corriente Continua en el Electrolizador.....	55
Figura 27: Lectura de Voltaje Continuo en el Electrolizador	55
Figura 28: Diagrama Esquemático de las Conexiones Eléctricas.....	56
Figura 29: Banco de Cargas VDC.....	57
Figura 30: Foto de las Conexiones Eléctricas con Carga	57

Figura 31: Gráfica Comparativa de las Presiones (PSI) de los tres ensayos realizados.	59
Figura 32: Gráfica Comparativa de las Corrientes (A) de los tres ensayos realizados.	60
Figura 33: Desplazamiento del Agua en la Probeta de 1 Litro	61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades Físicas y Químicas de los Hidrocarburos vs el Hidrógeno	29
Tabla 2: Beneficios y Barreras de las diferentes formas de Almacenar el Hidrógeno.	31
Tabla 3: Comparación de Tecnologías entre Electrolizadores Alcalinos y de Membranas Tipo PEM	35
Tabla 4: Descripción de los Principales Tipos de Celdas de Combustible.....	39
Tabla 5: Ventajas y Desventajas de los Diferentes Tipos de Celdas de Combustible.	40
Tabla 6: Especificaciones Técnicas del Generador de Hidrógeno.....	41
Tabla 7: Especificaciones Técnicas de La Pila Tipo PEM.	42
Tabla 8: Especificaciones Técnicas del Electrolizador.....	43
Tabla 9: Cuadro comparativo de la Presión en el Sistema llevando la Solución a las Temperaturas establecidas.	58
Tabla 10: Cuadro comparativo de la Corriente que consume el Electrolizador llevando a la Solución a las Temperaturas establecidas.	59
Tabla 11: Producción de Hidrógeno.	61
Tabla 12: Producción de Hidrógeno utilizando un Tanque de almacenamiento de 0.7 Litros.	62
Tabla 13: Producción de Hidrógeno utilizando un Tanque de Almacenamiento de 7 Litros.	62
Tabla 14: Cuadro comparativo de resultados de los Electrolizadores.	62
Tabla 15: Generación de Energía Eléctrica utilizando la Celda de Combustible tipo PEM con 7.5 PSI de Presión en el Sistema.....	63
Tabla 16: Generación de Energía Eléctrica utilizando la Celda de Combustible tipo PEM con 12 PSI de Presión en El Sistema.	63

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Ecuación Global de la Electrolisis del agua.....	32
Ecuación 2: Reacción en el ánodo.....	32
Ecuación 3: Reacción en el cátodo.....	32
Ecuación 4: Ecuación de la Producción de Hidrógeno.....	53
Ecuación 5: Ecuación de Conversión de Masa a Volumen del Hidrógeno.....	54

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Formulario FO-DCSC-UE-012 Solicitud para Autorización Ocasional....	70
Anexo 2: Formulario FO-DCSC-UE-013 Información Relacionada con el Plan de Investigación	71
Anexo 3: Certificado de Análisis del Hidróxido de Potasio	75
Anexo 4: Diagrama de Conexiones Eléctricas.....	76
Anexo 5: Sistema Scada de la Microcentral Optimizada- Suministro de Reacción Química al Sistema	78
Anexo 6: Diagrama Esquemático del Diseño para la Producción de Hidrógeno.	80
Anexo 7: Componentes utilizados para el Diseño del Equipo para la Producción de Hidrógeno.	81
Anexo 7: Medición de Temperatura de la Solución Electrolítica con una Pistola Láser.	84
Anexo 9: Resultados Obtenidos llevando a la solución a Temperaturas Establecidas.	85
Anexo 10: Resumen de los Equipos utilizados en La Producción de Hidrógeno.....	86

ABREVIATURAS

AIE	Agencia Internacional de Energía
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
°C	Grados Centígrados
CO ₂	Dióxido de Carbono
Der	Derecha
Fig	Figura
N	Normalidad
AFC	Celdas Alcalinas
PACF	Celdas de Ácido Fosfórico
MCFC	Celdas de Carbonatos Fundidos
SOFC	Celdas de Óxidos Sólidos
PEM	Membrana Intercambiadora de Protones
Ref	Referencia
Temp	Temperatura
P.F.	Punto de Fusión

SIMBOLOGÍA

%	Porcentaje
#	Número
°C	Grados Centígrados
O	Oxígeno
H	Hidrógeno
H ⁺	Catión Hidrógeno
OH ⁻	Oxidrilo o Hidroxilo (anión)
CO ₂	Dióxido de Carbono
W	Vatios
V	Voltios
A	Amperios
KW	Kilovatios
KW-H	Kilovatios-hora
MW	Megavatios
MW-H	Megavatios-hora
GW	Gigavatios
GW-H	Gigavatios-hora
M	Molaridad (Molar)
Na ⁺	ionSodio
Ca ²⁺	ionCalcio
Mg ²⁺	ionMagnesio
H ₂ O	Agua
HCl	Ácido Clorhídrico
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
CH ₃ COOH	Ácido Acético
NaOH	Hidróxido de Sodio
Ba(OH) ₂	Hidróxido de Bario
NH ₄ OH	Hidróxido de Amonio
NaCl	Cloruro de Sodio
KOH	Hidróxido de Potasio
Cl ₂	Cloro Molecular

Psi	Libra sobre Pulgada Cuadrada
Mpa	Megapascal
Bar	Bares
l	Litro
ml	Mililitro
km ²	Kilómetro Cuadrado
m ²	Metro Cuadrado
cm ²	Centímetro Cuadrado
m ³	Metro Cúbico
cm ³	Centímetro Cúbico
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
Kg	Kilogramo
g	Gramo
mg	Miligramo
g/cm ³	Gramos por Centímetros Cúbicos
g/mol	Gramos por Mol
h	Hora
Seg	Segundo
Min	Minuto
LPM	Litros por minuto

INTRODUCCIÓN

El hidrógeno es un combustible gaseoso que se encuentra en abundancia en la naturaleza, sin embargo no está en estado libre. Se lo puede obtener a partir de diversas materias primas, como gas natural y carbón, así como también en recursos renovables, como biomasa y agua, utilizando diferentes procesos como el químico, biológico, electrolítico, fotolítico y termoquímico.

Su gran poder energético y cero emisiones de carbono hace del hidrógeno un combustible amigable con el medio ambiente, este poder calorífico es aproximadamente más del doble con respecto a los combustibles convencionales, por lo tanto, se está invirtiendo un gran fuerza de investigación para el desarrollo de tecnologías para la producción, utilización y almacenamiento. Este último representa un reto debido a que el volumen que ocupa el hidrogeno debe ser mucho mayor a de un hidrocarburo convencional por su baja densidad de volumen.

Entre los procesos de obtención de Hidrógeno, la electrólisis alcalina de agua, es el proceso para su producción con el mayor porcentaje de pureza (99.99%), requerido para alimentar a la celda de combustible tipo PEM.

En el año 2017 Robert Piedra y Leonardo Noboa, realizaron un proyecto técnico de graduación donde implementaron un diseño que simula la generación eléctrica utilizando unacelda de combustible tipo PEM, alimentada por un electrolizador que producía un flujo de 0.3 LPM alcanzando una potencia máxima de operación de 27W versus su capacidad nominal de 100W.

Para poder alcanzar un mayor rendimiento energético de la celda de combustible tipo de PEM del proyecto anterior, se planteó mejorar la producción de hidrógeno mediante el reemplazo del electrolizador por uno de capacidad superior.

CAPÍTULO I

1. EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, cuenta con un módulo didáctico que simula el proceso de generación eléctrica de forma renovable utilizando una celda de combustible tipo PEM, la cual es alimentada por hidrógeno mediante electrólisis alcalina.

Según Piedra y Noboa investigadores anteriores, la celda alcanzó una potencia máxima con carga de 27W con respecto a su capacidad nominal de 100W, por lo que la potencia que genera la celda de combustible equivale al 27% para la que fue diseñada [1].

1.2. Justificación

Para que funcione de forma eficiente la celda de combustible tipo PEM, se debe suministrar un flujo constante de 1.3 LPM, recomendado por el fabricantes de la celda, para lo cual los investigadores anteriores Piedra y Noboa utilizaron un generador de hidrógeno para producir un flujo de 0.3 LPM [1], para alimentar la celda.

Razón por la cual es necesario la sustitución del electrolizador por uno de mayor capacidad y otras adecuaciones necesarias y así lograr que la Celda PEM existente, alcance una potencia mayor con carga.

1.3. Delimitación

1.3.1. Delimitación espacial

Es proyecto se desarrollará en el laboratorio de Instalaciones Eléctricas de la Universidad Politécnica Salesiana, ubicada en el sur de la ciudad de Guayaquil en el barrio Cuba avenida Gral. Francisco Robles 107 y Eloy Alfaro.

1.3.2. Delimitación académica

Será implementada para el sector educacional. Teniendo como área de estudio la tecnología y ciencias de ingeniería con aplicaciones para la Electroquímica.

1.3.3. Delimitación temporal

Este proyecto será desarrollado en el periodo 2019-2019, utilizando herramientas de diseño en programa AutoCAD®, cálculos químicos, implementación de conexiones eléctricas en el electrolizador con herramientas básicas de electricidad y pruebas ejecutadas en el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivos Generales

Lograr la eficiencia energética de la celda de combustible tipo PEM existente, de capacidad nominal de 100 vatios, 8 amperios, 12 voltios corriente directa, otorgándole un flujo de hidrógeno para su continuo y óptimo funcionamiento.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Incrementar la capacidad de producción de hidrógeno para alimentar la celda combustible.
- Obtener una mayor producción de energía eléctrica con carga.
- Determinar el balance energético producido entre la potencia consumida por el generador de hidrogeno y la producida por la celda tipo PEM.
- Cotejar los resultados experimentales alcanzados con los logrados por Piedra y Noboa.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. El Hidrógeno

Los motivos para aprovechar el hidrógeno como combustible son de tipo ambiental y por la previsión del agotamiento del petróleo, que hoy en día es la principal base energética a nivel mundial [2]. La principal ventaja del hidrógeno radica en su combustión, liberando únicamente vapor de agua, lo que significa que no produce CO₂, siendo adecuado para el reemplazo del petróleo y de sus derivados que no son recursos naturales.

En la actualidad, se pueden considerar dos formas básicas de obtención del hidrógeno, una a partir del reformado de hidrocarburos y otra de la producción electrolítica [2] [3].

Se observa en la figura 1, las principales fuentes energéticas de donde se obtiene el hidrógeno a nivel mundial en los últimos 10 años, donde muestra que casi la mitad del hidrógeno se lo obtiene del gas natural y corresponde a un 48% y en donde un 96% emplea los combustibles fósiles como fuente primaria, tales como el carbón, petróleo y gas natural [3].

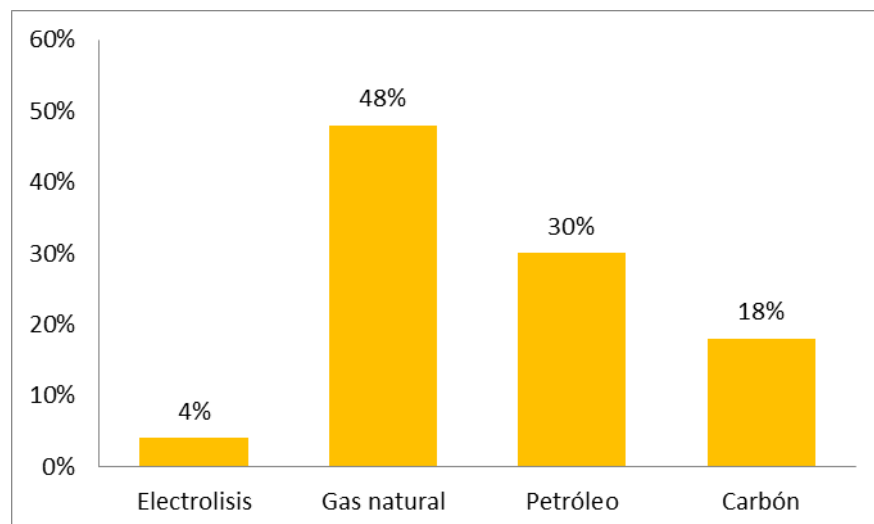


FIGURA 1: FUENTES DE OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO. [3]

2.1.1. Propiedades del Hidrógeno

El Hidrógeno es elemento químico que en el Universo se lo encuentra en mayores cantidades, que representa el 91% de nuestro sistema solar [4] y en la tierra está mezclado en su mayor parte por agua. El símbolo químico es H y su número atómico es 1, su nombre proviene de la combinación del griego “*hydor*” que significa agua y “*geinomai*” que significa traer, es decir, el elemento que trae agua [5].

Las principales propiedades del hidrógeno son [6]:

- El hidrógeno es insípido, invisible, incoloro y normalmente es un gas a 25 °C y 1 atm. (101.325 KPa).
- El hidrógeno es una molécula estable, no es explosivo, necesita mezclarse con un oxidante para que se produzca la ignición.
- La masa atómica del hidrógeno es de 1.007940 Kg/Kmol [6].
- La masa atómica del hidrógeno es 2.01588 Kg/Kmol[6].
- El hidrógeno gaseoso tiene una densidad de 0.0838 kg/m³ que lo convierte en el elemento más ligero de la tabla periódica.
- El punto de ebullición es de -252.7 °C.
- El punto de fusión es de -259.14 °C.
- Tiene un poder calorífico 120MJ/kg, este valor es muy superior al de otros combustibles convencionales por lo que tiene una alto capacidad de concentración de energía por unidad de masa [6].

Las propiedades del metano, propano, gasolina con las del hidrógeno, son descritas en la tabla 1:

- Los límites de velocidad de propagación de la llama y límites de ignición son los más desventajosos.
- El hidrógeno no es un elemento tóxico.
- El poder calorífico es superior, pero su densidad energética es la más baja, por lo que se requiere mayor cantidad de hidrógeno para obtener la misma cantidad de energía en comparación a los otros elementos.
- La temperatura de autoignición es la más alta de los 4 elementos, por lo que requiere mayores temperaturas para que arda y se mantenga así sin la necesidad de calor externo.

TABLA 1: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS HIDROCARBURO VERSUS EL HIDRÓGENO. [2]

Propiedad	Metano	Propano	Gasolina	Hidrógeno
	CH ₄	C ₃ H ₆	C ₈ H ₁₆	H ₂
Poder Calorífico (MJ/Kg)	50	46.3	44.5	120
Densidad Energética (MJ/m ³)	32.6	86.7	31.15	10
Temperatura de Autoignición (°C)	540	487	228 - 501	585
Temperatura Adiabática de la llama en aire (°C)	1875	1925	2197	2045
Límites de Ignición en aire (% en vol.)	5,3 - 15	2.1 - 10	1 - 7.6	abr-75
Propagación de la llama en aire (m/s)	0.4	-	0.4	2.65
Coefficiente de Difusión en aire (cm ² /s)	0.18	-	0.05	0.61
Toxicidad	No	-	Alta	No
ΔV en la reacción con oxígeno	Positivo		Positivo	Negativo

2.1.2. Almacenamiento del Hidrógeno

El hidrógeno a diferencia de la electricidad es un portador de energía completamente almacenable, esta flexibilidad permite un uso en diferentes instancias de la producción y utilización de la de energía [7]. El problema más grande de la producción de Hidrógeno es el precio elevado para obtenerlo [8].

La producción del hidrógeno siempre encierra riesgos debido por una parte a la rápida propagación y mezcla con el aire y explosiva del gas y por otra a la gran presión a la que debe estar en los recipientes que lo contienen en estado gaseoso [2].

El hidrógeno puede almacenarse en forma gaseosa (gas comprimido), como un líquido y en medios sólidos.

2.1.2.1. Estado gaseoso

El almacenamiento en estado gaseoso es uno de los métodos más simples y eficientes en donde se encuentran las aplicaciones estacionarias y móviles [4].

En la aplicaciones estacionarias, el Hidrógeno se almacena en recipientes que soportan presiones 20.000 kPa en recipientes de 10 o 50 litros[8].

En las aplicaciones móviles los recipientes de almacenamiento de Hidrógeno soportan presiones entre 20.000 a 70.000 kPa [4], empleando tanques de acero de paredes mucho más gruesas y de forma cilíndrica hechas de materiales de gran resistencia para asegurar durabilidad con un gasto de compresión del 8 al 15% [8]. Ver figura 2.

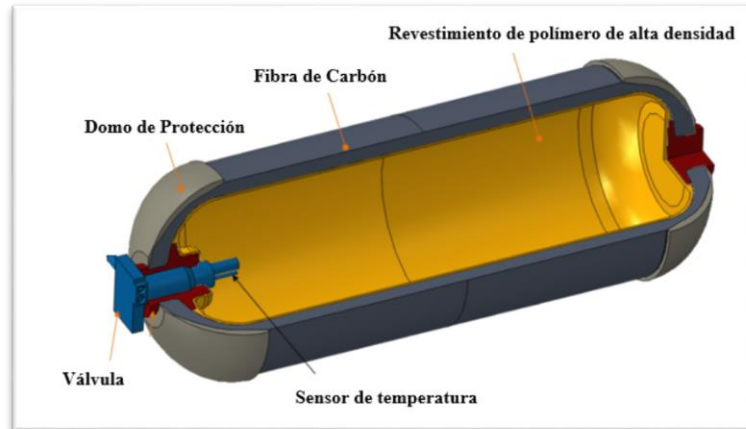


FIGURA 2: TANQUE DE ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO GASEOSO. [4]

2.1.2.2. Estado líquido

La densidad energética del Hidrógeno en estado líquido es mucho más alta que en su forma gaseosa[4], por eso lo convierte en un medio de almacenamiento atractivo y efectivo, pero su desventaja principal es la gran cantidad de energía requerida para obtenerlo ya que es necesario mantenerlos en tanques criogénicos que soportan más de 1.551 Kpa y a temperaturas menores de -250° [8].

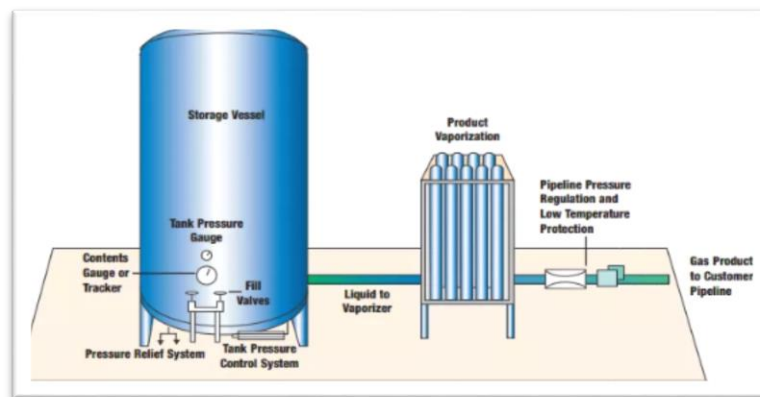


FIGURA 3: TANQUE DE ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO LÍQUIDO. [9]

2.1.2.3. Estado sólido

En la figura 4 se muestra un ejemplo de los materiales especiales más conocidos como carbono ultraporoso, que actúan como una esponja absorbente del Hidrógeno gaseoso [4]

El almacenamiento de hidrógeno en materiales sólidos utiliza un gran volumen ya que para obtener un equivalente a 1 litro de gasolina se necesitan 21 kg de hidruros. Es una forma segura de almacenamiento [8],.

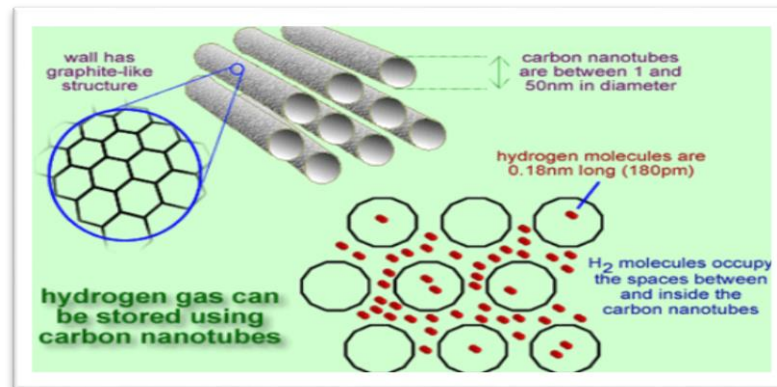


FIGURA 4: TANQUE DE ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO SÓLIDO. [4]

TABLA 2: BENEFICIOS Y BARRERAS DE LAS DIFERENTES FORMAS DE ALMACENAR EL HIDRÓGENO. [10]

Almacenamiento de Hidrógeno	Beneficios	Barreras
Gas Comprimido	Presión máxima almacenamiento es de 200.1 bar, en ocasiones es barato	Cantidades pequeñas de H ₂ se almacenan a 200.1 bar, El almacenamiento a alta presión se encuentra en desarrollo.
Tanques de líquido	Tecnología desarrollada, permite un buen almacenamiento.	Se necesita un excelente aislamiento. El costo almacenamiento es alto. El H ₂ se pierde producto de la gasificación . La energía almacenada aún no es comparable a de los derivados del petróleo
Hidruros metálicos	El almacenamiento se lo puede realizar en diferentes formas. El calor que genera pueden ser utilizado en otras aplicaciones. Muy seguro.	Es pesado, el llenado requiere un circuito de enfriamiento que lo hace caro.

2.2. Electrólisis

El proceso mediante el cual el agua se divide en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de energía eléctrica se llama electrólisis del agua, en la ecuación 1 se muestra este proceso. La energía total que se necesita para la electrólisis aumenta ligeramente con la temperatura, mientras que la energía eléctrica requerida disminuye

[7]. Por lo tanto, un proceso de electrólisis a alta temperatura es más eficiente. Ver Ecuación 1.



Ecuación 1: Ecuación Global de la Electrólisis del agua.[11]

La electrólisis se produce en un compartimiento que contiene, un electrodo catódico que es el polo negativo y otro electrodo anódico que es el polo positivo, que se encuentran sumergidos en una solución y que al emplear corriente se produce el desprendimiento de los iones a sus respectivos electrodos. Es necesario utilizar un electrolito como disolución alcalina, usualmente se utiliza hidróxido de potasio (KOH) [12].

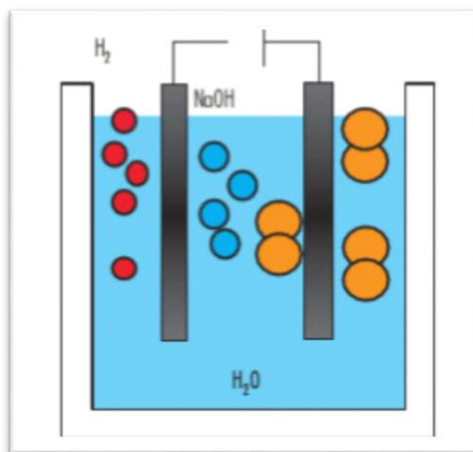
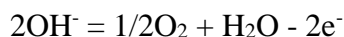
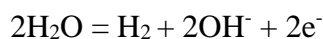


FIGURA 5: PROCESO ELECTROLÍTICO. [12]

En los electrodos se producen las siguientes reacciones:



Ecuación 2: Reacción en el ánodo.[13]



Ecuación 3: Reacción en el cátodo.[13]

La electrólisis en la actualidad es beneficiosa en países donde tengan una gran producción hidroeléctrica o nuclear y la electricidad resulte barata [8].

2.2.1. Tipos de electrolizadores

En la actualidad se conocen dos tipos electrolizadores: Los de alcalino líquido y los de electrolito polímero sólido [14].

Electrolizadores de alcalino líquido: Son los más utilizados para la obtención de Hidrógeno y los más requeridos a nivel comercial. En estos electrolizadores se utiliza un electrolito típicamente una solución del 20% de hidróxido de potasio (KOH) [15]. Estos electrolizadores por la disposición y la forma en cómo se conectan sus electrodos se los clasifica en electrolizadores de célula y los de filtro prensa [16].

El electrolizador de célula que se muestra en la figura 6, es conocido como electrolizador de tanque, donde cada placa contiene un cátodo y un ánodo, con su respectivo espacio para el electrolito, que están separados entre sí por una membrana que suele ser una empaque que cubre al electrodo [15]. El O_2 y H_2 se recolectan en los respectivos canales acoplados a los espacios catódico y anódico, de cada célula. [14].

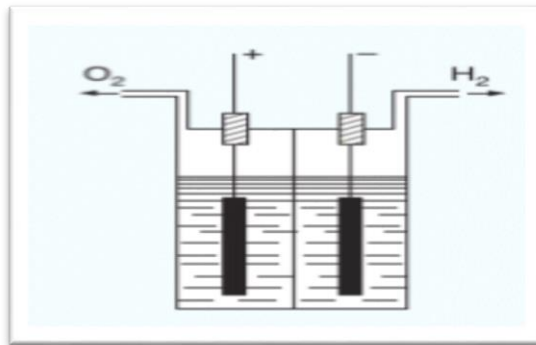


FIGURA 6: CÉLULA UNIPOLOR. [17]

Los electrolizadores filtro-prensa, también son conocidos como bipolares, constan de electrodos que están conectados en serie y trabajan como ánodo por un lado y cátodo por cara opuesta [16]. Entre cada dos láminas encontramos un diafragma y la conexión eléctrica se efectúa en los electrodos terminales, por lo que el voltaje de trabajo es la sumatoria existente de cada uno de los elementos [15]. En la figura 7, se muestra esquemáticamente este tipo de electrolizadores [14].

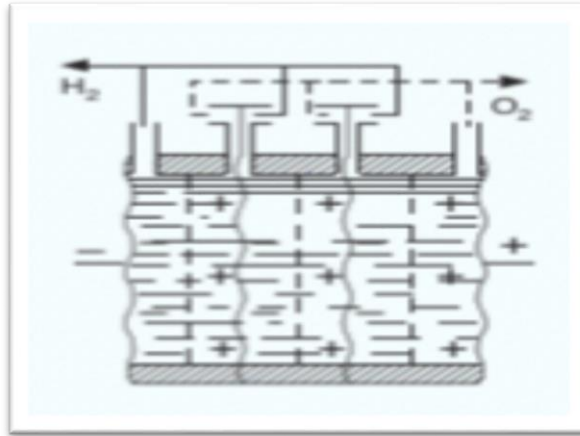


FIGURA 7: FILTRO- PRENSA. [17]

En los electrolizadores tipo de célula y los de filtro prensa, el electrolito circula de forma continua, con la finalidad de disipar el calor producido durante el proceso, y que la temperatura se mantenga constante.

Electrolizadores de membrana polimérica (PEM): La tecnología empleando electrolizadores utilizan materiales muy estables y son los únicos capaces de resistir las condiciones de oxidación enormemente impuestas al momento de realizar el proceso de electrolisis [18]

El diseño de un electrolizador de tipo PEM es bien simple. Como se ilustra en la figura 8, comprende una pila de celdas elementales conectadas en serie por placas bipolares. Cada celda tiene dos electrodos separados por una membrana de intercambio de protones (PEM). Cada electrodo está formado por una delgada capa catalítica que es el sitio de la oxidación (ánodo) o reacción de reducción (cátodo), y capas de materiales porosos que actúan como distribuidores / receptores de corriente dependiendo del electrodo en cuestión. En general, este material poroso será incompresible (titanio) en el ánodo y comprimible (carbono) en el cátodo para añadir flexibilidad mecánica cuando se comprime todo el conjunto. [19]

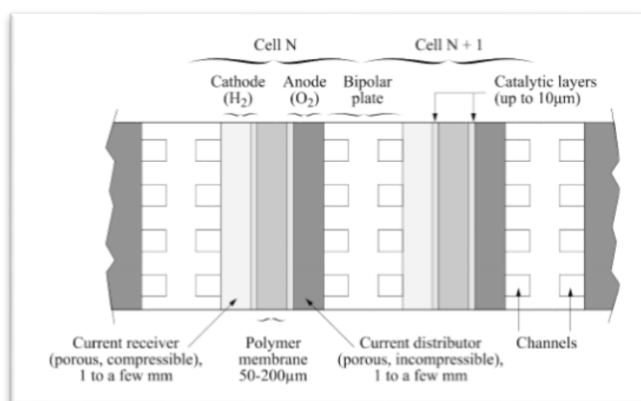


FIGURA 8: DIAGRAMA DE LA CONSTITUCIÓN INTERNA DE UN ELECTROLIZADOR PEM. [19]

Se muestra el cuadro comparativo de las diversas características que tienen los electrolizadores alcalinos y los de membrana polimérica,

TABLA 3: COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS ENTRE ELECTROLIZADORES ALCALINOS Y DE MEMBRANAS TIPO PEM. [20]

Comparación de Tecnologías	<i>Electrolizador Alcalino</i>	<i>Electrolizador de Membrana tipo PEM</i>
Electrolito	Solución Caustica	Electrolito de Polímero
Densidad de Corriente Nominal	0.45 A/cm ²	1 A/cm ²
Consumo de Energía	4.35 kW*h/Nm ³ @ 0.45 A/cm ²	4.35 kW*h/Nm ³ @ 1 A/cm ²
Máx. Densidad de Corriente	0.8 A.cm ⁻²	10 A.cm ⁻²
Presión de Entrega de H ₂	Hasta 30 bar	Hasta 300 bar
Pureza de H ₂	≥ 99.99%	≥ 99.99%
Durabilidad	≥ 60,000 h	≥ 25,000 h
Rango dinámico	0 - 100%	0 - 100%
Densidad Volumétrica	16 l por Nm ³ /h H ₂	1 por Nm ³ /h H ₂

2.3. Electrolitos

“Los electrolitos son sustancias que en su disolución se encuentran disociadas en iones permitiendo la conductividad eléctrica” [21].

Cuando un sólido iónico se disuelve en agua se produce el desprendimiento de iones del retículo cristalino, como se observa en la figura 9, que representa el proceso de disolución del NaCl en agua.

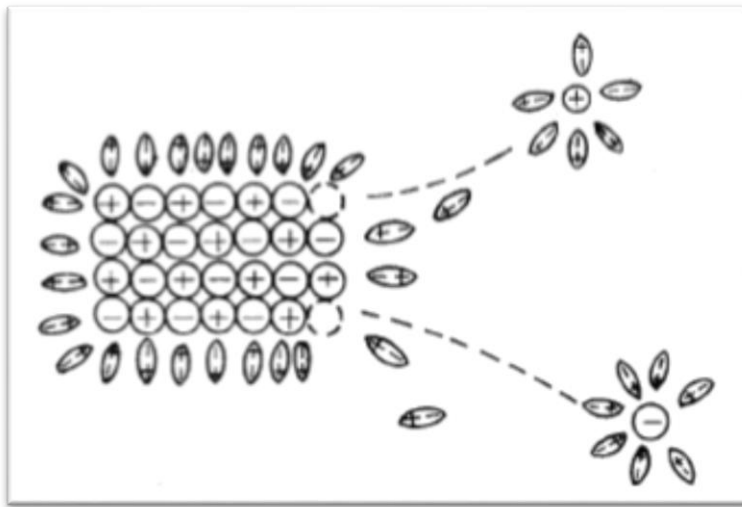


FIGURA 9: PROCESOS DE DISOLUCIÓN DEL NaCl EN AGUA. [11]

En este caso el soluto disuelto se ha disociado en iones. Cuando se disuelven en agua sustancias moleculares polares, los iones se producen en el proceso de disolución, ya que no existen en la sustancia molecular antes de disolverse. La figura 10, representa el esquema del proceso de disolución del HCl en agua donde el soluto se ha disociado en iones.

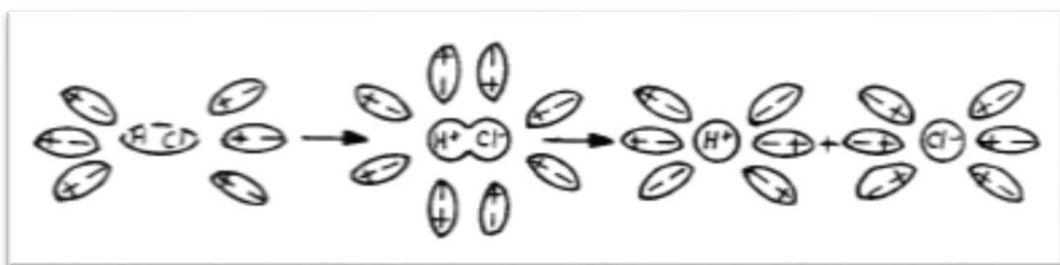


FIGURA 10: PROCESOS DE DISOLUCIÓN DEL HCl EN AGUA. [11]

La concentración de iones que existen en una disolución, en algunos casos será relativamente alta y en otros será baja. Esta característica permite clasificar los electrolitos en dos grupos: electrolitos fuertes y electrolitos débiles [19].

Las disoluciones de los electrolitos fuertes son consideradas buenas conductoras debido a que están muy disociadas en iones, mientras que las de los electrolitos débiles son ligeramente conductoras porque están muy poco disociados en iones[22].

Son electrolitos las sustancias como los ácidos, los hidróxidos, y los que más se emplean son:

- KCl: Cloruro de Potasio
- CuSO₄: Sulfato de cobre
- HCl: Ácido clorhídrico
- H₂SO₄: Ácido sulfúrico
- CH₃COOH: Ácido acético
- NaOH: Hidróxido de Sodio
- KOH: Hidróxido de Potasio

2.4. Hidróxido de Potasio

El símbolo químico del Hidróxido de Potasio es el KOH y en el mercado también se lo conoce con el nombre de Potasa Cáustica. Es un compuesto químico que tiene muchos usos industriales y comerciales, este debe ser almacenado en lugares que no tengan humedad ya que tiene la capacidad de absorber la humedad del medio provocando su disolución.

El Hidróxido de Potasio al disolverse en agua genera una reacción química que desprende energía en forma de calor, provocando que la temperatura de disolución aumente.

2.5. Celda de Combustible

Una celda de combustible es como una fábrica que toma el combustible como entrada y produce electricidad como salida, este proceso se muestra en la figura 11. Como en una fábrica, una celda de combustible continuará produciendo electricidad siempre y cuando se provea materia prima que para este caso es el combustible. Esta es la

diferencia principal entre una celda de combustible y una batería. Mientras que ambos dependen de la electroquímica para hacer su trabajo, una celda de combustible no se consume cuando produce electricidad. Realmente es una fábrica, que transforma la energía química, en energía eléctrica [23].



FIGURA 11: CONCEPTO GENERAL DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE. [23]

La corriente generada por una celda de combustible depende del tamaño del área de reacción donde se encuentran los reactivos, el electrodo y el electrolito, en otras palabras, aumentar el área de una celda de combustible aumenta la cantidad de corriente producida. Esta conversión involucra necesariamente un paso de transferencia de energía, donde la energía de la fuente de combustible pasa a los electrones que constituyen la corriente eléctrica. Esta transferencia debe ocurrir en una superficie de reacción, por lo tanto, la cantidad de electricidad generada depende del área de superficie de reacción disponible para la transferencia de energía [24].

Para obtener grandes superficies de reacción que maximicen las relaciones de superficie a volumen, las celdas de combustible generalmente se convierten en estructuras delgadas y planas, como se muestra en la figura 12, con una capa delgada de electrolito que separa espacialmente los electrodos de combustible y oxidante para asegurar que las dos medias reacciones individuales se produzcan aisladas una de la otra [24].

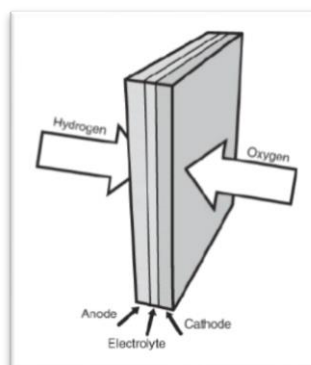


FIGURA 12: ÁNODO - ELECTROLITO - CÁTADO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE. [24]

2.5.1. Tipos de Celdas de Combustible

Hay cinco tipos principales de celdas de combustible, diferenciadas entre sí por su electrolito, temperatura de funcionamiento, materiales de construcción y características de rendimiento, que se detallan a continuación [25]:

- Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC) [23].
- Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM) [23].
- Celda de combustible alcalina (AFC) [23].
- Celda de combustible de carbonato fundido (MCFC) [23].
- Celda de combustible de óxido sólido (SOFC) [23].

A continuación, el detalle de las principales características de las diferentes celdas de combustible:

TABLA 4: DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE. [25]

PILAS	PEM	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nombre	Pila de Membrana de Intercambio Protónico	Pila de Metanol Directo	Pila alcalina	Pila de ácido fosfórico	Pila de Carbonatos fundidos	Pila de óxidos sólidos
Carga	H ⁺	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Temperaturas	50-120°C	50-100°C	90-100°C	150-200°C	600-700°C	700-1000°C
Eficiencias	60%	40%	60-70%	40%	45-50%	60%
Electrolito	Membrana de polímeros	Membrana de polímeros	KOH disuelto en agua	Ácido fosfórico	Carbonatos fundidos	Óxidos sólidos
Combustible	H ₂	Metanol	H ₂	H ₂	H ₂ , CH ₄ , CO ₂	H ₂ , CH ₄ , CO ₂
Usos	Transporte, portátiles, residencial	Portátiles	Espaciales	Generación eléctrica distribuída. Automoción	Generación eléctrica, cogeneración	Generación eléctrica, cogeneración

En la tabla 5 en encontraremos las ventajas y desventajas de las diferentes celdas de combustibles.

TABLA 5: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE LA CELDAS DE COMBUSTIBLE. [26]

Celda de Combustible	Ventajas	Desventajas
Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC).	Tecnología madura. Excelente fiabilidad, rendimiento a largo plazo. El electrolito tiene un costo relativamente bajo.	El catalizador de platino es caro. Susceptible al envenenamiento por CO y S. El electrolito es un líquido corrosivo que debe reponerse durante la operación.
Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM).	Mayor densidad de potencia. Buena capacidad de arranque y parada. El funcionamiento a baja temperatura lo hace adecuado para aplicaciones portátiles.	Utiliza un catalizador de platino caro. La membrana de polímero y los componentes auxiliares son caros. A menudo se requiere una gestión activa del agua. Muy poca tolerancia a CO y S.
Celda de combustible alcalina (AFC)	Mejora en el rendimiento del cátodo. Potencial para catalizadores de metales no preciosos. Bajos costos de materiales, bajo costo del electrolito.	Debe usar H ₂ y O ₂ puro. El electrolito KOH necesita una reposición ocasional. Debe quitar el agua del ánodo.
Celda de combustible de carbonato fundido (MCFC).	Flexibilidad de combustible. Catalizador de metal no precioso. Calor residual de alta calidad para aplicaciones de cogeneración.	Se debe implementar el reciclaje del CO ₂ . Electrolito fundido y corrosivo. Degradación de los materiales que conforman la celda. Materiales relativamente caros.
Celda de combustible de óxido sólido (SOFC).	Flexibilidad de combustible. Catalizador de metal no precioso. Calor residual de alta calidad para aplicaciones de cogeneración. Electrolito sólido. Densidad de potencia relativamente alta	Utiliza materiales que resistan alta temperatura. Problemas de sellado. Componentes y fabricación relativamente caros.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. El Diseño

La optimización de producción de energía en la celda tipo PEM, que simula a una microcentral, comprende la sustitución el generador de hidrógeno existente, por uno de mayor capacidad de producción de hidrógeno, para lograr suministrar el caudal nominal a la celda de combustible, así aumentar eficiencia y la potencia generada bajo condiciones de trabajo.

Los datos de fábrica del generador de hidrógeno, utilizado en el módulo diseñado por Piedra y Noboa [1], utiliza un electrolizador modelo HYH-300 que produce un flujo volumétrico de 0 – 300 ml/ min, ver tabla 6. Siendo el flujo volumétrico de entrada mínimo requerido por la celda tipo PEM (Celda de combustible) es de 1.3 L/min, ver tabla 7. Para cumplir con el flujo requerido por la celda tipo PEM, se reemplazará el generador actual por uno de mayor capacidad de producción de Hidrógeno, se utilizará un filtro de sílica y zeolita para deshumidificar, para mejorar la pureza del hidrógeno y manómetros. Posterior al diseño se procederá a realizar las pruebas de generación, consumo, eficiencia y comparar los resultados obtenidos por los anteriores autores [1].

TABLA 6: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO. [27]

Modelo	HYH-300
Pureza del Hidrógeno	99.9%
Flujo de salida	0-300 ml/min
Presión de salida	0.4Mpa
Condiciones de trabajo	Voltaje de suministro 220V 60Hz
Condición ambiental	Temperatura 0-40°C, Humedad relativa<85% Sin polvo ni gases corrosivos
Potencia máxima	150W
Tamaño	360x190x380mm(LxWxH)
Peso	12Kg

TABLA 7: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PILA TIPO PEM. [28]

Tipo de pila de combustible	PEM
Número de celdas	20
Potencia nominal	100 W
Estabilidad	12 V @8.3 A
Voltaje de válvula de purga	12 V
Voltaje del ventilador	12 V
Reactivos	Hidrógeno y Aire
Temperatura externa	5 a 30 °C
Temperatura máxima de la pila	65 °C
Presión H ₂	0.45 - 0.55 bar
Pureza de hidrógeno	≥99.995% seco H ₂
Humidificación	Auto-humidificado
Refrigeración	Aire (ventilador de refrigeración integrado)
Peso de la pila (con ventilador & carcasa)	1290 gramos (±50gramos)
Peso del controlador	400 gramos (±30 gramos)
Dimensión	11.8cmx10.4x9.4cm
Caudal mínimo de entrada*	1.3 L/min
Tiempo de inicio	≤30 S a temperatura ambiente
Eficiencia de la pila	40% @ 12 V
Apagado por sobre corriente	12 AMP
Apagado por sobre temperature	65 °C
Fuente de alimentación externa**	13 V(±1V), 5A

El proyecto de titulación principiará con la observación, comparación y análisis de los datos existentes del trabajo de titulación desarrollado por Piedra y Noboa [1]. Posteriormente se desarrollarán los diseños para determinar las capacidades de los equipos, ubicación de manómetros, longitud y diámetros de mangueras, preparación de la solución de hidróxido de potasio, cantidad de hidrógeno producido y cálculos para la optimización de la potencia producida por la celda.

3.2. Obtención del KOH en el Ecuador

En el Ecuador el hidróxido de potasio (KOH) está catalogada como una sustancia que está sujeta a fiscalización, por lo que su comercialización únicamente es posible mediante una calificación que es otorgada por el ente regulador en el Ecuador. Este organismo es el SETEP (Secretaría Técnica de prevención Integral de Drogas).

Para obtener el permiso se deben llenar 2 formularios de autorización ocasional, que se descargan de la página web en el link www.prevenciondrogas.gob.ec, estos

formularios son el FO-DCSC-UE-012 (Ver anexo 1) que es la solicitud para autorización ocasional y el FO-DCSC-UE-013 (Ver anexo 2) que es el plan de investigación o adiestramiento [29].

Una vez aprobado estos formularios se podrá realizar la compra del KOH en el distribuidor autorizado por el SETEP durante el tiempo aprobado para realizar la compra.

3.3. Electrolizador Modelo AU43

El electrolizador seleccionado para este proyecto de titulación es la celda modelo AU43 del proveedor Fuel Cell LLC, esta celda está diseñada con las especificaciones que cumplen con los requisitos para alimentar a la celda de combustible tipo PEM. En la tabla 8 se detalla las características:

TABLA 8: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ELECTROLIZADOR. [30]

Modelo	AU43
Pureza del Hidrógeno	99.9%
Flujo de salida	0-6 l/min
Condiciones de trabajo	12 – 14 Voltios DC
Placas	43
Condición ambiental	Temperatura 0 -35°C, humedad Sin polvo, ni gases corrosivos
Potencia máxima	1000W
Tamaño	170x95x150mm(LxWxH)
Peso	6 lb

El proveedor Fuel Cell suministra el equipo desarmado por lo que se procedió al respectivo ensamblaje, a continuación, detallaremos las piezas que conformar al equipo.

- 43 Placas de acero inoxidable. Ver figura 13.

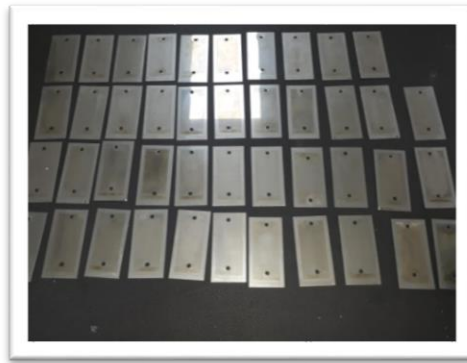


FIGURA 13: PLACAS DE ACERO INOXIDABLE

- 44 Empaques de caucho que sirven para separar las placas de acero como se muestra en la figura 14.



FIGURA 14: EMPAQUES DE CAUCHO.

- 6 Pernos pasantes de $3/8'' \times 8''$ que sirven para formar el cuadrante que compactan las placas de acero con los cauchos, 24 anillos planos, 12 anillos de presión, 18 tuercas, 12 contratuercas como se muestra en la figura 15.



FIGURA 15: PERNOS, ANILLOS PLANOS, ANILLOS DE PRESIÓN, TUERCAS.

- 2 Placas de acrílicos que sirven para formar la base que asegura las placas de acero y empaques de caucho como se muestra en la figura 16.



FIGURA 16: PLACAS DE ACRÍLICOS.

- Cableado color negro y rojo calibre #14 AWG, que sirven para realizar las conexiones en el ánodo y cátodo del electrolizador como se muestra en la figura 17.



FIGURA 17: CABLEADO ROJO Y NEGRO.

- 2 Conectores para manguera #12 como se muestra en la Figura 18.



FIGURA 18: CONECTORES PARA MANGUERA.

Para poder ensamblar el electrolizador AU43 se coloca sobre la placa de acrílico el empaque de caucho seguido de la placa de acero inoxidable que tiene una ranura en el extremo superior derecho como se muestra en la Figura 19, donde se conecta el primer terminal positivo, seguido por 5 placas sin ranuras con sus respectivos empaques, de ahí se coloca la placa que tiene la ranura en el extremo superior izquierdo, seguido por 5 placas sin ranuras, el equipo utiliza 4 terminales positivos y 4 negativos.

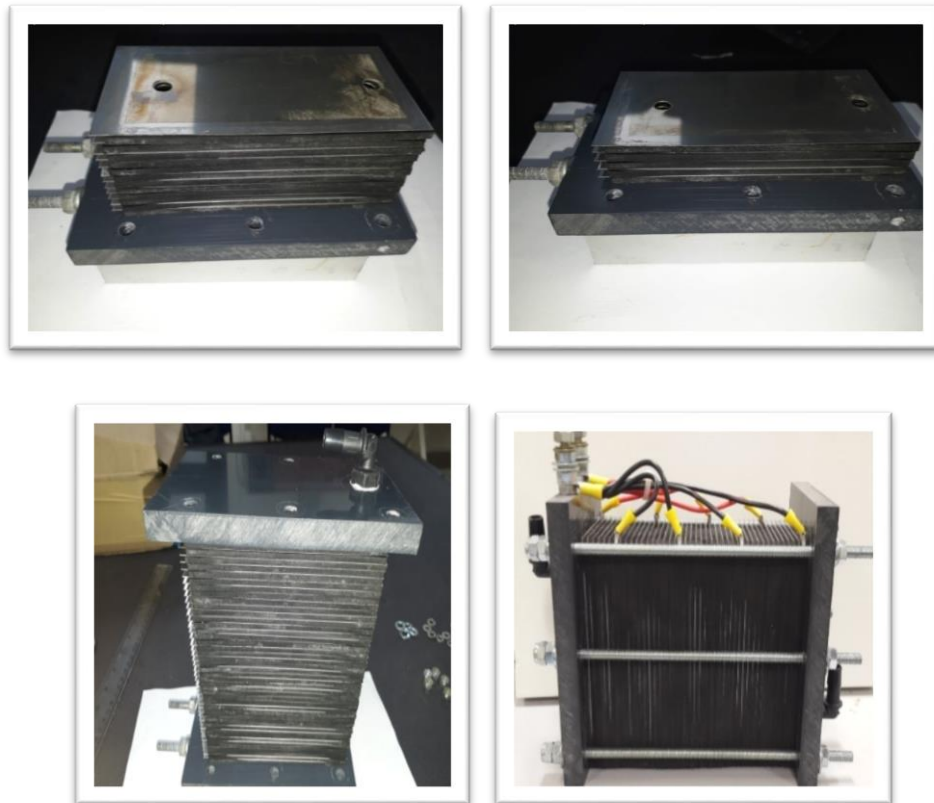


FIGURA 19: ARMADO DE AU43.

3.4. Determinación del flujo volumétrico y presión de Hidrógeno producido por el electrolizador AU43.

Para determinar el flujo volumétrico, presión que genera el gas a la salida de electrolizador se realizan los siguientes ensayos previos que son necesarios para esta determinación:

- Volumen total del sistema.
- Presión de salida del electrolizador.

- Flujo de Hidrógeno producido.

3.4.1. Determinación del volumen total del sistema.

Para realizar este ensayo pasos, es necesario utilizar los siguientes materiales:

- Tanque que contiene la solución electrolítica
- Mangueras de 10mm y 12mm
- Acoples de acceso rápido para mangueras
- Electrolizador AU43
- Agua destilada
- Embudo

En la figura 20, se muestra el armado y montaje de los componentes utilizados para este ensayo, que consiste en armar un circuito de lazo cerrado que servirá para determinar el volumen que ocupa cada componente en el sistema con la finalidad de saber cuánto queda de espacio libre en el reservorio ya que en ese espacio es donde se acumulará el hidrógeno.

El diseño del sistema como se muestra en la figura 20, está conformado por un reservorio con una capacidad de 3.3 litros cuyo volumen está representado por V1, y posee un orificio en la parte izquierda con un acople rápido de 3/8 npt para manguera de 10 mm, que sirve de entrada de la solución electrolítica y que para esta prueba la utilizamos para verter agua destilada, tiene un orificio en la parte inferior con un acople rápido de 3/8 npt para manguera de 12 mm que conecta a la entrada del electrolizador (Tramo B-C), otro orificio en la parte derecha con un acople rápido de 3/8 npt para manguera de 12 mm que conecta de la salida del electrolizador (Tramo D-E), y un orificio en la parte superior con un acople rápido de 1/4 npt para manguera 10 mm que será la salida del hidrógeno producido.

El electrolizador modelo AU43 cuyo volumen está representado por V3 posee en su entrada y salida 1 acople rápido en cada extremo de 3/8 npt para manguera de 12 mm que se conecta al reservorio en los tramos B-C y D-E. .

En el extremo superior izquierdo del reservorio se coloca un embudo y se vierte agua destilada con la finalidad de que se llene todo el sistema, el volumen que ocupa de agua en todo sistema es de 3.8 litros:

$$\text{Volumen del Sistema} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 3.8 \text{ litros}$$

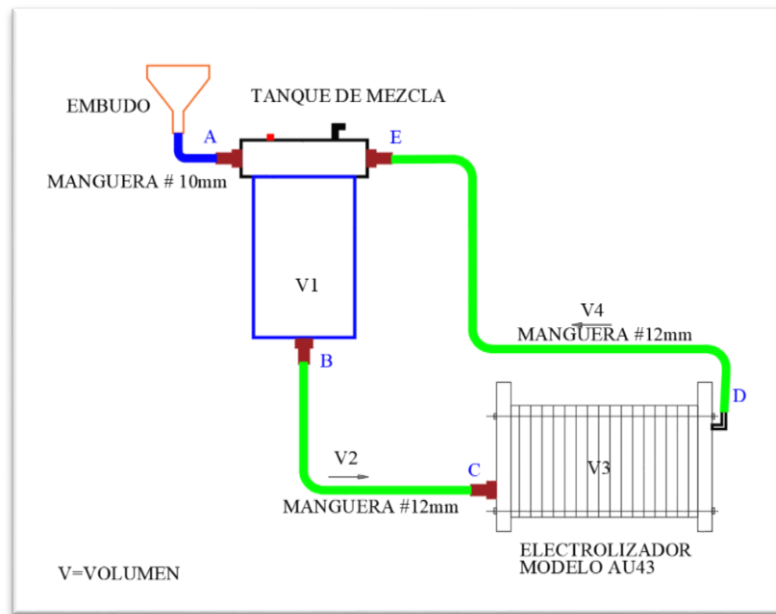


FIGURA 20: SEGMENTOS PARA CALCULAR EL VOLUMEN DE AGUA EN EL SISTEMA.

El volumen del sistema está conformado por la sumatoria del volumen del tanque representado por V_1 , el volumen de agua que hay en las mangueras que en el gráfico están representada por V_2 y V_4 y el volumen de agua que hay en el electroizador representada por V_3 .

Para calcular el volumen que ocupa cada tramo de manguera en el sistema, se realiza de forma experimental llenando cada tramo con agua, a continuación se detalla el volumen obtenido para cada tramo de manguera en el sistema:

$$\text{Volumen de agua en la manguera del tanque al electroizador} = V_2 = 0.020\text{L}$$

$$\text{Volumen de agua en la manguera del electroizador al tanque} = V_4 = 0.040\text{L}$$

El volumen de agua que hay en el electroizador se lo obtiene se lo tiene de la siguiente forma:

$$V_3 = V_S - V_T - V_2 - V_4 = 3.8 - 3.3 - 0.020 - 0.040 = 0.44 \text{ litros}$$

3.4.2. Determinación de la presión generada por el Hidrógeno en el sistema.

Para realizar este ensayo es necesario utilizar los siguientes materiales:

- Tanque que contiene la solución electrolítica
- Mangueras de 10 mm y 12 mm
- Acoples de acceso rápido para mangueras
- Fuente conmutada de poder 12VDC
- Electrolizador AU43
- Agua destilada, dos listros
- Manómetro de 0 a 100 PSI
- Tanque de almacenamiento de Hidrógeno de 0.7 litros
- Hidróxido de potasio 191 gramos por litro
- Balanza
- Embudo

Para esta prueba se arma el circuito como se muestra en la figura 21 en donde se incluye un tanque de almacenamiento de hidrógeno de 0.7 litros de capacidad que posee 2 orificios en la parte inferior con acoples rápidos de 1/4 npt para manguera de 10 mm y en la parte superior un orificio de 1/4 para colocar un manómetro de 0 a 100 PSI que servirá para medir la presión en el sistema. En el extremo izquierdo del reservorio y en el extremo de la salida del tanque se coloca tapones para cerrar el circuito.

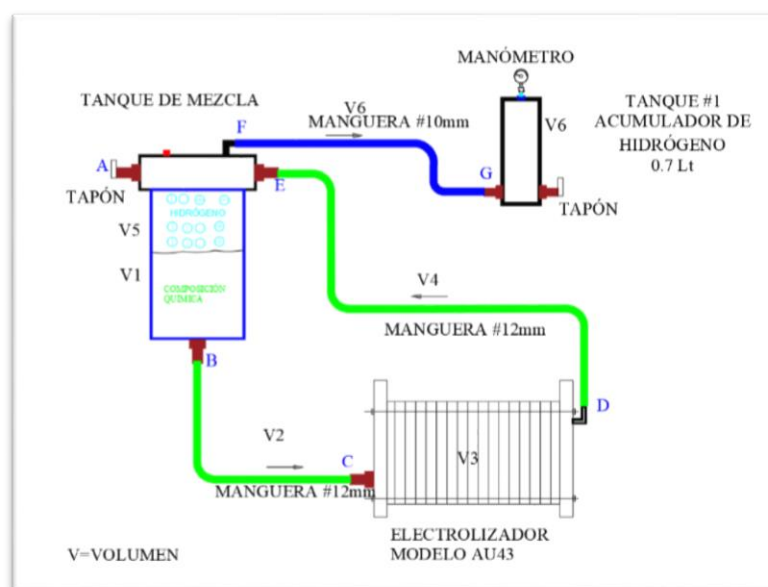


FIGURA 21: SEGMENTOS PARA CALCULAR LA PRESIÓN EN EL SISTEMA.

Para energizar el electrolizador modelo AU43 se utiliza una fuente conmutada de poder de 12 VDC que se conecta como se muestra en la figura 22. Se utiliza cables de calibre #6 AWG con su respectivo terminal de compresión.

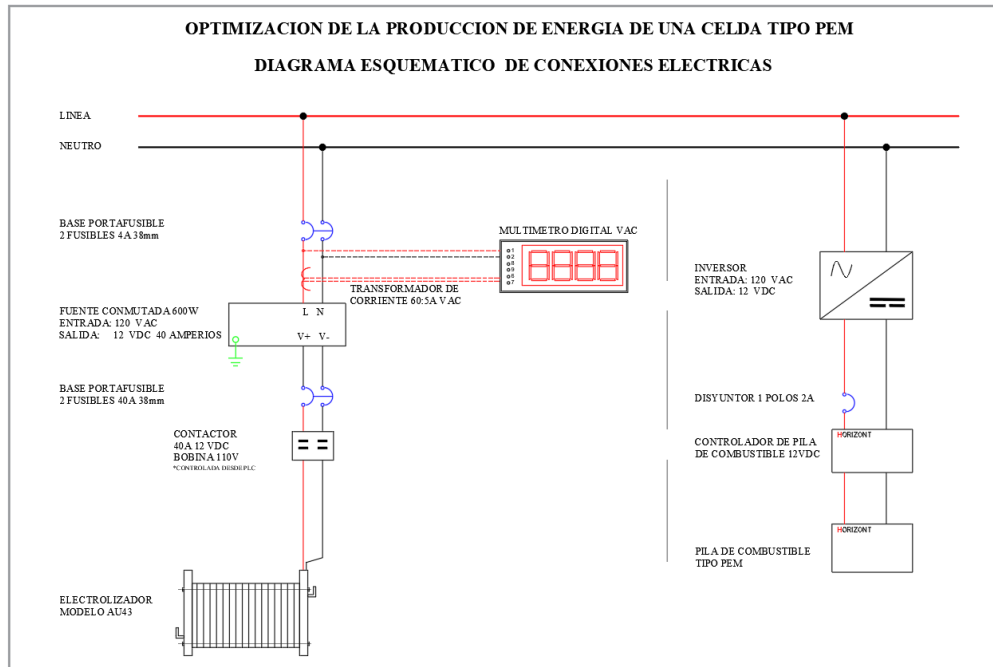


FIGURA 22: CONEXIONES ELECTRICAS DEL ELECTROLIZADOR MODELO AU43.

3.4.2.1. Preparación de la solución electrolítica

Una vez armado el circuito, se procede a preparar la solución electrolítica de KOH. El fabricante recomienda para el electrolizador modelo AU43 una solución con una concentración de 20% de Hidróxido de Potasio, que equivale a 191 gramos por cada litro de agua destilada.

3.4.2.2. Determinación de la temperatura óptima de la solución electrolítica

Esta prueba permite determinar la temperatura óptima de trabajo de la solución electrolítica, evaluada a tres temperaturas distintas (30°C, 45°C, 73.2°C). Se inicia preparando la solución electrolítica y llevandola a la temperatura que se evalúa, posteriormente se coloca en el tanque de el cual está conectado al electrolizador manteniendo durante un tiempo de 20 minutos, determinando el flujo volumétrico del hidrógeno producido por el electrolizador y la presión generada por este en el tanque.

3.4.3. Determinación del flujo volumétrico del Hidrógeno producido.

Para realizar este ensayo es necesario utilizar los siguientes materiales:

- Tanque que contiene la solución electrolítica
- Mangueras de 10 mm y 12 mm
- Acoples de acceso rápido para mangueras
- Fuente conmutada de poder 12VDC
- Electrolizador AU43
- Agua destilada
- Manómetro de 0 a 100 PSI
- Tanque de almacenamiento de Hidrógeno de 0.7 litros
- Hidróxido de potasio 191 gramos por litro
- Balanza
- Flujómetro de 0 a 3 LPM
- Probeta de 1 Litro de capacidad
- Soporte para probeta
- Reservorio para el agua

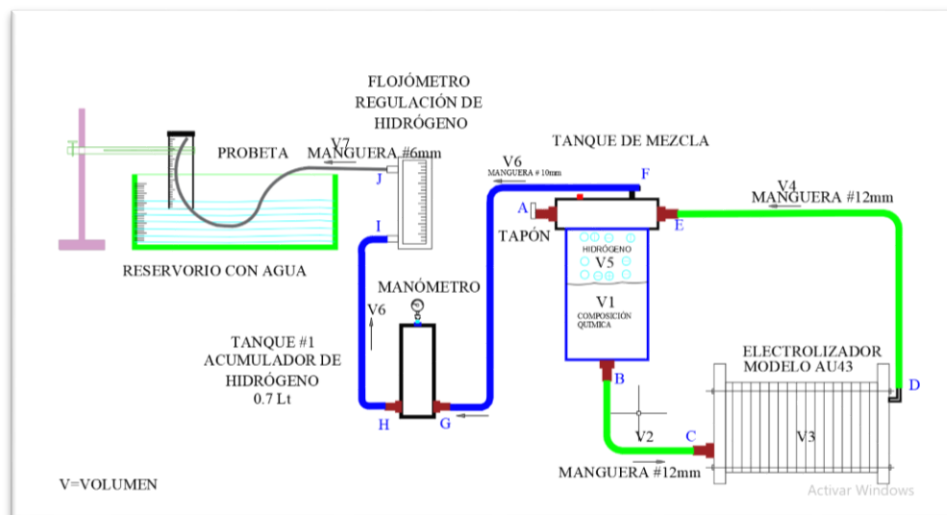


FIGURA 23: SEGMENTOS PARA CALCULAR EL FLUJO EN EL SISTEMA CON UN TANQUE DE 0.7L.

En esta prueba se incluye un flujómetro de 0 a 3 LPM para regular la cantidad de hidrógeno producido, una probeta de 1 litro de capacidad, esta probeta se coloca de forma invertida sujeta por una pinza, la probeta se llena con agua y se introduce una manguera de 6 mm, Ver Fig. 24.

El hidrógeno producido por el electrolizador modelo AU43, desplaza el agua que hay en la probeta, se mide el tiempo de desplazamiento del agua en intervalos de 0.1 litros y a una presión de 10 psi, se mide el tiempo que se mantiene la presión en un rango de 10 psi.



FIGURA 24: PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO, MEDIDO MEDIANTE EL USO DE UNA PROBETA DE 1 LITRO.

A continuación realizamos la misma prueba para determinar el flujo generado por el Hidrógeno producido, pero en esta ocasión se reemplaza el tanque de almacenamiento de hidrógeno de 0.7 litros por uno de 7 litros, para garantizar una mayor cantidad de hidrógeno almacenado en el sistema, Ver Fig. 25.

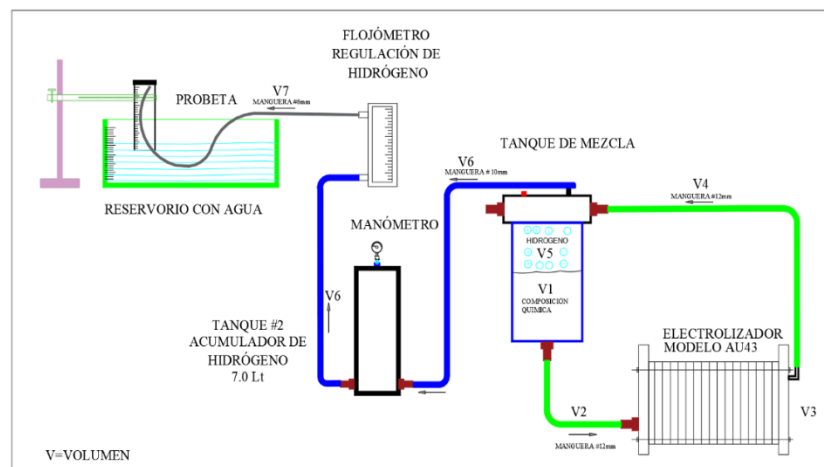
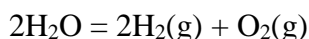


FIGURA 25: SEGMENTOS PARA CALCULAR EL FLUJO EN EL SISTEMA CON UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE 7 LITROS.

3.5. Cálculo estequiométricos en el electrolizador para determinar la producción de hidrógeno gaseoso mediante el proceso de electrólisis del agua.

Empleando la ecuación global de electrólisis del agua se obtiene el Hidrógeno gaseoso producido.



Ecuación 1: Ecuación global de la Electrólisis del Agua.

Cálculos Estequiométricos:

Datos:

Volumen de Agua = 2000 cm³

Densidad del Agua = 1Kg/m³ = 1g/cm³

Masa del O = 16g/mol

Masa del H = 1.008g/mol

$2\text{H}_2\text{O}$	=	$2\text{H}_2(\text{g})$	+	$\text{O}_2(\text{g})$
$2[(2(1.008\text{g/mol}) + (16\text{g/mol}))]$	=	$2[(1.008\text{g/mol}) (2)]$	+	$(16\text{g/mol}) (2)$
36g/mol H₂	=	4.032 g/mol H₂	+	32g/mol O₂

Producción de hidrógeno:

$$2000 \text{ g H}_2\text{O} \times \frac{4.032 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{H}_2}{36 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{H}_2\text{O}} = 224 \text{ g H}_2 = 0.224 \text{ Kg H}_2$$

(4) Ecuación 4: Ecuación de la Producción de Hidrógeno.

Conversión de masa a volumen

Aplicando Ley de los gases ideales PV=NRT

Presión (P) = 1.68 atm

Volumen (V) = ? (L)

Número de moles (N)= 224g H₂ x (1mol/2g H₂) = 112 moles H₂

Constante universal de los gases (N)= 0.082(atm x L/mol x k)

Temperatura absoluta (T)= 45°C +273 K= 298K

$$\begin{aligned} \text{Volumen (L)} &= \frac{112 \text{ mol H}_2 \times 0.082 \frac{\text{atm} \times \text{L}}{\text{mol} \times \text{K}} \times (45^\circ\text{C} + 273\text{K})}{1.68 \text{ atm}} = 1738,40\text{L} \\ &= 1,7 \text{ m}^3 \text{ H}_2 \end{aligned}$$

Ecuación 5: Ecuación de Conversión de Masa a Volumen del Hidrógeno.

3.6. Pasos para medir el voltaje y la intensidad de corriente consumida por el electrolizador modelo AU43.

Para medir el voltaje y la corriente que consume el electrolizador modelo AU43 se realiza lo siguiente:

- Se utiliza un amperímetro de gancho y se lo coloca en el cable que conecta en la entrada del electrolizador como se muestra en la figura, esta lectura indica la corriente que consume el electrolizador. Ver figura 26.



FIGURA 26: LECTURA DE INTENSIDAD DE CORRIENTE CONTÍNUA EN EL ELECTROLIZADOR

- Para medir el voltaje que consumen el electrolizador se coloca las puntas del voltímetro en el terminal positivo y negativo del electrolizador, como se muestra en la figura 27.



FIGURA 27: LECTURA VOLTAJE CONTÍNUO EN EL ELECTROLIZADOR

3.7. Generación

El principio de este ensayo es determinar cuanta potencia generó la celda de combustible tipo PEM.

Para esta etapa se debe tener las siguientes consideraciones:

- El tiempo de la producción de Hidrógeno.
- La temperatura de trabajo en el sistema debe ser menor a 65°C.
- Verificar que todas las mangueras estén instaladas correctamente.

3.7.1. Pasos para medir el voltaje y la intensidad de corriente producida por la celda de Combustible tipo PEM.

Una vez que se realiza la producción y almacenamiento del Hidrógeno se procede a alimentar la celda tipo PEM con un flujo Hidrógeno de 1.3 LPM y 10 PSI de presión, Se arma el esquema eléctrico como se muestra en la figura 28.

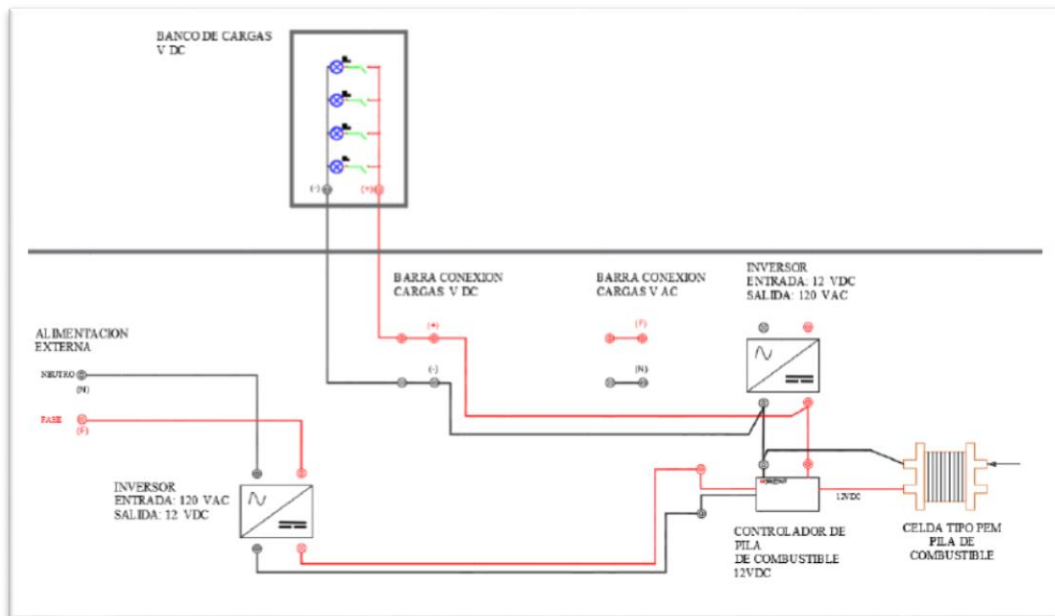


FIGURA 28: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS

Se utiliza un banco de cargas que está conformado por 4 focos de 12V, 21W cada uno, como se muestra en la figura 29.



FIGURA 29: BANCO DE CARGAS VDC

Este banco de cargas VDC se conecta con la salida de carga de la celda de combustible tipo PEM, para obtener el voltaje y corriente que genera la celda, cuyos datos serán comparados con los resultados obtenidos por los investigadores anteriores de este proyecto.

En la figura 30 se muestra las conexiones que se realizan en el tablero con el banco de cargas VDC.

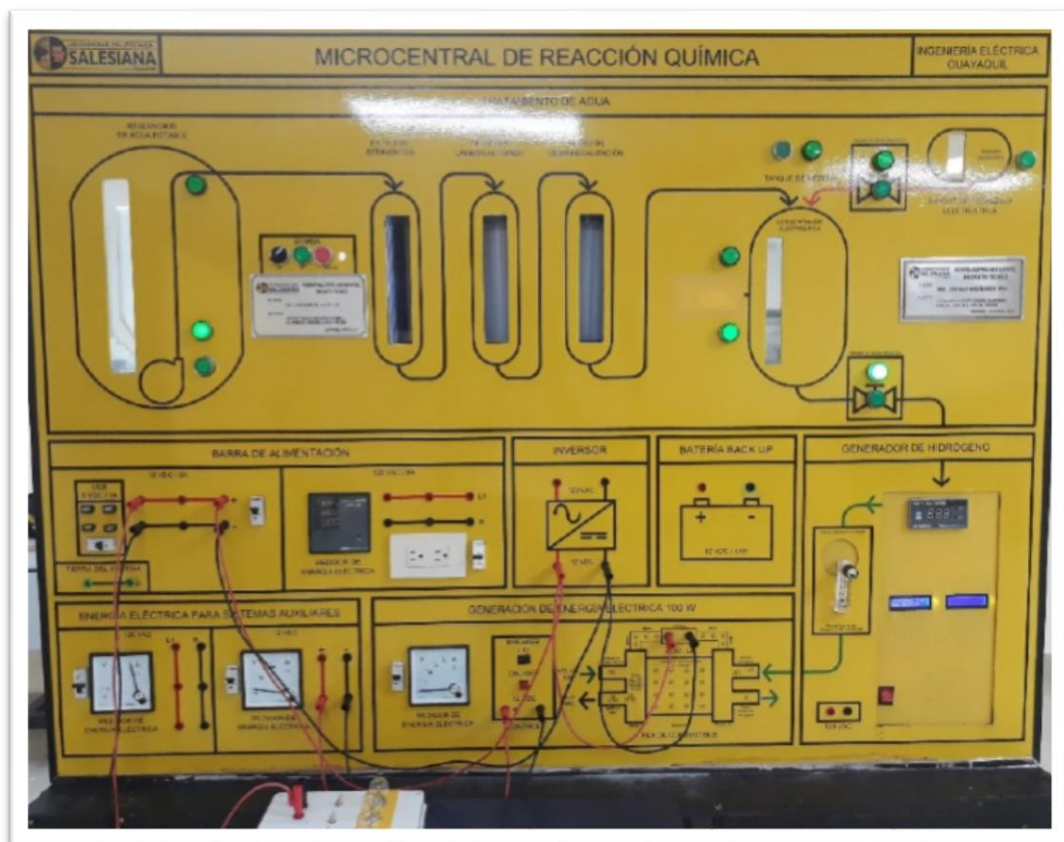


FIGURA 30: FOTO DE LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS CON CARGA

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Las etapas que conforman la Optimización de la Producción de Energía de un Celda tipo PEM son las siguientes:

- Elección del electrolizador.
- Determinación de la temperatura óptima de la solución electrolítica para la producción de Hidrógeno.
- Tiempo de producción de Hidrógeno.
- Generación de Energía Eléctrica.
- Tiempo de Generación de Energía Eléctrica.
- Comparación de resultados obtenidos con los de los Autores anteriores Piedra y Noboa.

4.1. Ensayos realizados para determinar la temperatura óptima de la solución electrolítica.

Con los datos obtenidos de la tabla 9, se realiza la gráfica (Ver figura 31), del tiempo necesario para alcanzar la presión de 7.5 PSI con las diferentes temperatura establecidas para la solución electrolítica.

TABLA 9: CUADRO COMPARATIVO DE LA PRESIÓN EN EL SISTEMA LLEVANDO LA SOLUCIÓN A LAS TEMPERATURAS ESTABLECIDAS.

TIEMPO	PSI	PSI	PSI
min	31.7°C	45°C	71.3°C
1	0,00	0,00	0,00
4	0,45	0,50	0,50
8	0,65	1,00	1,00
10	1,00	1,20	1,20
12	1,25	2,50	2,50
14	1,75	3,40	3,40
16	2,00	5,00	5,00
17	4,50	6,40	6,40
18	6,20	7,50	7,00
19	7,00	8,90	7,25
20	7,50	10,00	7,50

En la figura 31, se observa que la solución llevada a una temperatura de trabajo a 45°C, es la que alcanza más rápido la presión de 7.5 PSI en un tiempo de 18 min.

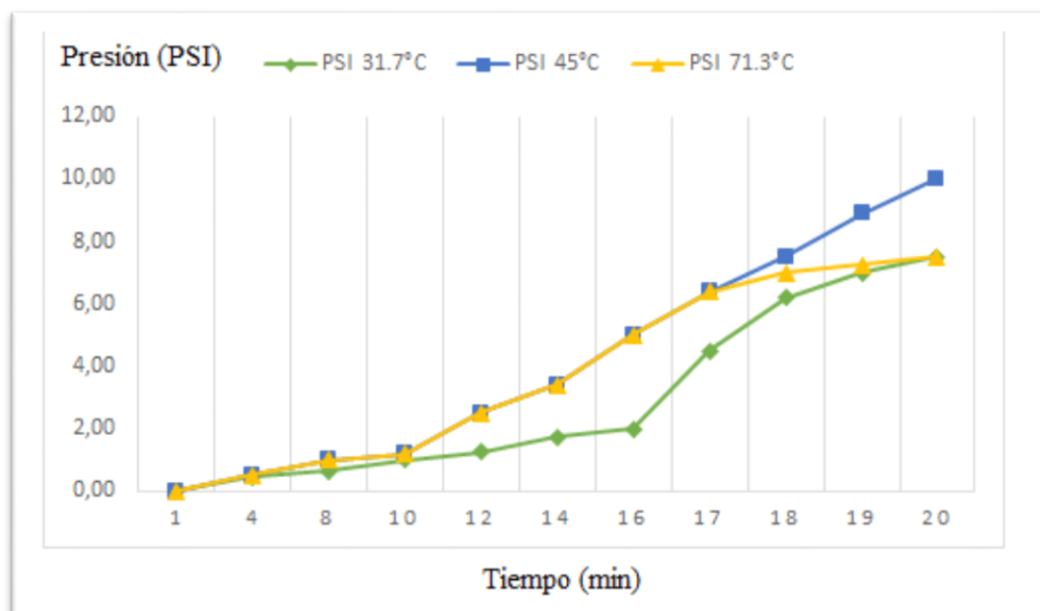


FIGURA 31: GRÁFICA COMPARATIVA DE LAS PRESIONES (PSI) DE LOS 3 ENSAYOS REALIZADOS.

En la tabla 10, se muestran los datos de corriente que consumen el electrolizador modelo AU43, llevando a la solución a las tres temperaturas establecidas, utilizando un voltaje DC constante de 11.88V en el electrolizador.

TABLA 10: CUADRO COMPARATIVO DE LA CORRIENTE QUE CONSUME EL ELECTROLIZADOR LLEVANDO A LA SOLUCIÓN A LAS TEMPERATURAS ESTABLECIDAS.

TIEMPO	CORRIENTE		
	(A)	(A)	(A)
min	31.7°C	45°C	71.3°C
1	13,65	13,60	17,30
4	14,45	14,30	17,32
8	15,55	15,40	17,44
10	16,25	16,21	17,65
12	16,78	16,40	18,44
14	17,02	16,50	18,52
16	17,08	16,70	18,78
17	17,25	17,00	18,90
18	17,45	17,10	19,00
19	17,88	17,23	19,25
20	18,22	17,87	19,30

En la figura 32, se observa que el electrolizador tiene un consumo menor de corriente de 17.87A, cuando trabaja con la solución que es llevada a una temperatura de 45°C.

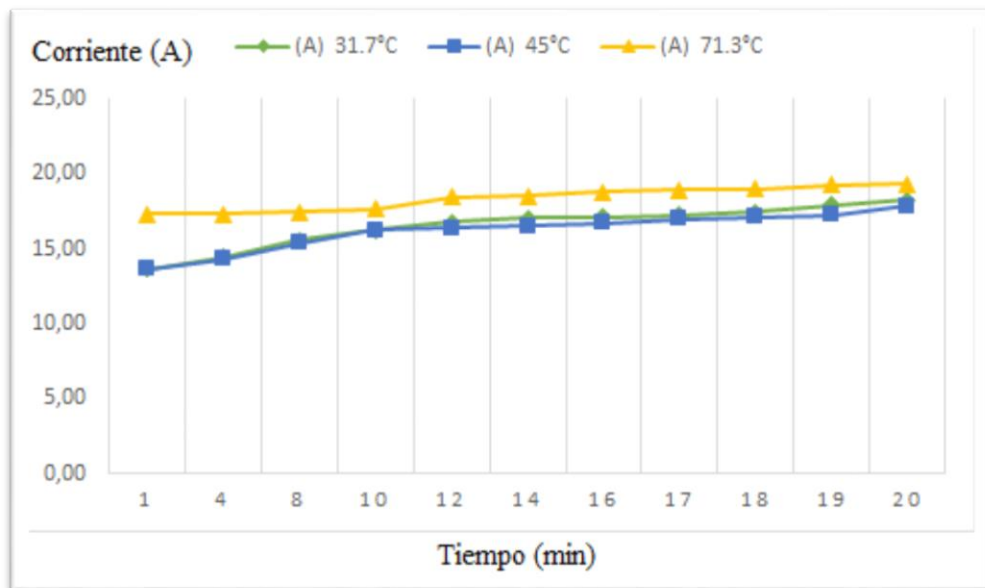


FIGURA 32: GRÁFICA COMPARATIVA DE LAS CORRIENTES (A) DE LOS 3 ENSAYOS REALIZADOS.

De los resultados obtenidos de los 3 ensayos, se observa lo siguiente:

- La producción de hidrógeno que se obtiene con una temperatura en la solución de 31.7°C toma mas de 20 minutos llegar a 7.5 PSI.
- La producción de hidrógeno que se obtiene con una temperatura en la solución de 47°C, toma 20 minutos llegar a 7.5 PSI.
- La producción de hidrógeno que se obtiene con una temperatura en la solución de 73.7°C, toma mas de 20 minutos llegar a 7.5 PSI.

Entoces a 31.7°C y 73.7°C, se puede inferir que la conductividad de la solución electrolítica disminuye, aumentando la resistencia de la corriente al fluir la corriente, como consecuencia provocando un aumento de consumo de la corriente que alimenta el electrolizador que se observa en la figura 32.

Se elige la solución electrolítica que es llevada a una temperatura de 45°C cuyo consumo de corriente en el electrolizador es de 17.87A y 11.88V consumiendo una potencia de 212.30W.

4.2. Producción de Hidrógeno.

Para medir el flujo del hidrógeno utilizamos la solución electrolítica que es llevada a una temperatura de 45°C. y con una presión en el sistema de 7.5 PSI.

TABLA 11: PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.

Producción de Hidrógeno		
Tiempo (s)	Volumen (L)	Presión (PSI)
0	0	7.5
5	100	7.5
10	200	7.5
15	300	7.5
18	400	7.5
20	500	7.5
26	600	7.5
30	700	7.5
33	800	7.5
35	900	7.5
40	1000	7.5

Con los datos obtenidos tenemos una producción de hidrógeno en donde con un tiempo de 40 segundos se desplaza un litro de agua, los valores incrementan de forma casi constante como se muestra en la gráfica detallada en la figura 35, por lo que en un minuto, la producción de hidrógeno sería de 1.4 litros y que utilizando un flujómetro de 0 a 3 LPM se puede regular el flujo a 1.3 LPM. Este el valor es el que requiere la celda de combustible tipo PEM para funcionar de forma eficiente según el fabricante.

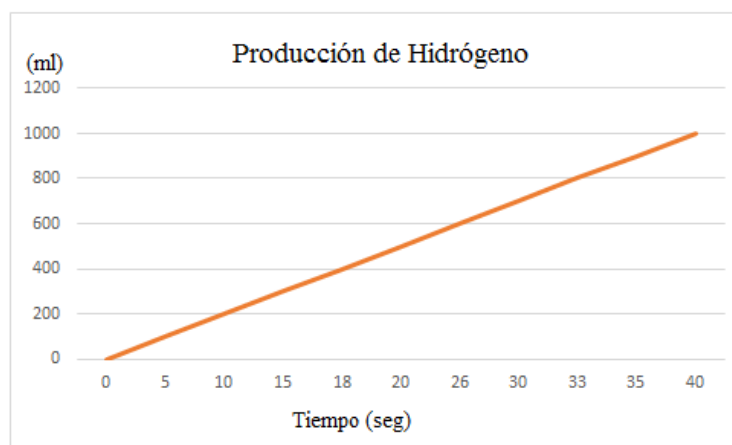


FIGURA 33: PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

A partir de los datos obtenidos de la tabla 12, el tiempo que se mantiene la presión de 7.5 PSI y flujo 1.5 LPM es de 17 segundos, por lo que es necesario reemplazar el tanque de almacenamiento de hidrógeno de 0.7 litros por uno de mayor capacidad, para mantener la presión constante durante un mayor tiempo.

TABLA 12: PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO UTILIZANDO UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE 0.7 LITROS.

TIEMPO	PRESIÓN TANQUE	FLUJO DE HIDRÓGENO
	[PSI]	[LPM]
0	10,00	1,5
17 seg	7,50	1,5
33 seg	5,00	1
37 seg	2,50	0,5

En la tabla 13, se muestran los datos en donde se realiza el reemplazo del tanque de 0.7 litros por uno de 7 litros de capacidad; el flujo de 1.5 LPM y presión 7.5 PSI se mantiene constante por un tiempo de 1 minuto con 20 segundos (80 seg), logrando un mejoramiento .

TABLA 13: PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO UTILIZANDO UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE 7 LITROS.

TIEMPO	PRESIÓN TANQUE	FLUJO DE HIDRÓGENO
	[PSI]	[LPM]
0	10,00	1,5
1 min 20 seg	7,50	1,5
2 min 06 seg	5,00	1
2 min 52 seg	2,50	0,5

En la tabla 14, se muestra un cuadro comparativo de los resultados obtenidos por los investigadores Piedra y Noboa del electrolizador modelo HYH-300 [1], con respecto a los datos obtenidos del electrolizador modelo AU43. El voltaje con el que trabaja el electrolizador es de 11.88V y la corriente que consume de 17.87A

TABLA 14: CUADRO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE LOS ELECTROLIZADORES.

	Electrolizador	
	Modelo HYH-300	Modelo AU43
Potencia de Consumo	150W	212.30W
Flujo de salida de gas de Hidrógeno	0.3 LPM	1.3 LPM
Presión	6.53 PSI	7.5 PSI

4.3. Generación de energía eléctrica utilizando la celda de combustible tipo PEM.

En la tabla 15, se muestran los resultados obtenidos de la generación eléctrica con la celda de combustible tipo PEM, manteniendo una presión constante de 7.5 PSI en el sistema. A los 40 segundos se obtuvo el voltaje y corriente más alto de la generación, dando una potencia de 29.48W.

TABLA 15: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZANDO LA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM CON 7.5 PSI DE PRESIÓN EN EL SISTEMA.

TIEMPO (Segundos)	TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN [°C]	PRESIÓN TANQUE [PSI]	FLUJO DE HIDRÓGENO [LPM]	VOLTAJE DC PILA DE COMBUSTIBLE [V]	INTENSIDAD DE CORRIENTE DC [A]
5	45	7,50	1,50	12,00	0,8
10	45	7,50	2,00	8,00	1,2
20	45	7,00	2,50	12,00	0,8
30	45	6,00	3,00	7,30	1,5
40	45	5,00	2,50	13,40	2,2
50	45	3,00	2,00	11,40	1,8
80	45	2,50	1,50	6,50	0,8
Tiempo aproximado de prueba 80 segundos					
Carga en barras de Distribución de voltaje VDC					
Carga instalada en banco de pruebas 42W 12VDC (2 FOCOS 21W-12VDC)					

Para la tabla 16, se lleva el sistema a una presión de 12.5 PSI, para concluir si el voltaje y corriente que genera la celda de combustible mejora, dando resultados similares en cuanto a la generación de energía eléctrica. La potencia generada para ambos casos se mantiene.

TABLA 16: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA UTILIZANDO LA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM CON 12 PSI DE PRESIÓN EN EL SISTEMA.

TIEMPO (Segundos)	TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN [°C]	PRESIÓN TANQUE [PSI]	FLUJO DE HIDRÓGENO [LPM]	VOLTAJE DC PILA DE COMBUSTIBLE [V]	INTENSIDAD DE CORRIENTE DC [A]
5	47	12,50	2,50	11,59	1,19
10	47	12,50	2,50	8,33	1,23
20	47	12,00	2,50	11,34	0,78
30	47	11,50	2,50	7,59	1,44
40	47	11,00	2,50	13,60	2,16
50	47	10,00	2,00	11,47	1,69
60	47	10,50	2,00	6,33	0,73
70	47	10,00	1,50	6,22	0,74
80	47	9,00	1,50	6,22	0,69
Tiempo aproximado de prueba 80 segundos					
Carga en barras de Distribución de voltaje VDC					
Carga instalada en banco de pruebas 21W 12VDC					

CONCLUSIONES

- Al implementar el diseño utilizando el electrolizador modelo AU43, con su respectivo tanque de almacenamiento para Hidrógeno, se logra mantener un flujo constante de 1.3 LPM y una presión superior a 7.5 PSI en el sistema, logrando mejorar la producción de Hidrógeno en comparación con el Modelo HYH-300 utilizado por los investigadores Leonardo Noboa y Robert Piedra, el aumento de la producción de Hidrógeno equivale a un 76.92%
- Al aumentar el flujo de Hidrógeno y mantenerlo constante en un intervalo de tiempo mayor, se mejoró la generación de energía eléctrica de 27.5W a 29.48W, que equivale a un aumento de 1.98% en el rendimiento.
- El electrolizador modelo AU43 consume una potencia de 212.30W y la celda de combustible genera 29.48W, que equivale a que hay una deficiencia energética de 182.82W, concluyendo que el proceso de electrólisis con la tecnología actual todavía no es viable y que los costos de producción son elevados.
- Se compararon los resultados obtenidos con los datos que obtuvieron los investigadores anteriores y se concluye que hubieron mejoras en los rendimientos de producción de Hidrógeno y generación de energía eléctrica.

RECOMENDACIONES

- Se debe desarmar el electrolizador modelo AU43 después de cada tres prácticas, debido a la acumulación de KOH en las placas provocando una capa de color negro que afecta al proceso eficiente de la electrólisis.
- Revisar los terminales de conexiones en cada una de las placas, ánodo y cátodo del electrolizador.
- Revisar cada uno de los puntos de conexión de las mangueras en toda la maqueta para evitar fugas.
- Cambiar cada 2 meses los conectores de acople rápido en el tanque de mezcla y electrolizador, debido que el KOH deteriora los acoples por su naturaleza alcalina.
- Drenar el agua que se acumula en los tanques de almacenamiento de Hidrógeno después de cada práctica.
- Realizar limpieza en el filtro de retención de humedad compuesto por silica gel y zelita, también cambiar el algodón que se encuentra en el interior del filtro.
- La temperatura en el sistema y del Hidrógeno no debe ser superior a los 65°C, la Celda de Combustible no trabaja a temperatura igual o mayor a los 65°C.
- Controlar la presión que se genera en el sistema, que no sean superior a los 20 PSI, ya que puede provocar el colapso del electrolizador modelo AU43.
- El fabricante de la celda de combustible recomienda que cada 30 días se realice un proceso de hidratación de las membranas poliméricas, que consiste en inyectar agua destilada por la entrada de Hidrógeno de la celda.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Saavedra, L. Vicente, P. Pineda, y R. Gonzalo, «Diseño e implementación de una micro central de reacción química empleando una pila de combustible», 2017.
- [2] Luis Gutiérrez Jodra, «El hidrógeno, combustible del futuro», *Rev. Real Acad. Cienc. Exactas Físicas Nat.*, vol. 99, n.º 1, pp. 49-68, 2005.
- [3] J. I. L. Hurtado y B. Y. M. Soria, *El hidrógeno y la energía*. Universidad Pontificia Comillas, 2007.
- [4] E. Tzimas y Europäische Kommission, Eds., *Hydrogen storage: state-of-the-art and future perspective*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [5] M. Aguer Hortal, Á. L. Miranda Barreras, y C. e-libro, *El hidrógeno fundamento de un futuro equilibrado*. 2005.
- [6] «Fundamentos del hidrógeno gaseoso». [En línea]. Disponible en: http://www.energiasostenible.net/fundamentos_hidrogeno.htm. [Accedido: 20-may-2018].
- [7] «Hydrogen Production and Storage», *IEA webstore*. [En línea]. Disponible en: <https://webstore.iea.org/hydrogen-production-and-storage>. [Accedido: 13-jun-2018].
- [8] M. Aguer Hortal y A. L. Miranda Barrera, *El Hidrogeno, El: Fundamento de un futuro equilibrado*. Editorial Díaz de Santos, S.A., 2012.
- [9] N. R. Braton, *Cryogenic Recycling and Processing*. CRC Press, 2018.

- [10] Europäische Kommission y Europäische Kommission, Eds., *Hydrogen energy and fuel cells: a vision of our future*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [11] S. Holguín Quiñones, F. Montoya Vega, y E. Flores Valverde, *Fundamentos de electroquímica*. México: Instituto Politécnico Nacional, 1988.
- [12] E. Muñoz Camacho y M. Grau Ríos, *Ingeniería química*. 2013.
- [13] R. Chang, J. Saucedo Zugazagoitia, y J. M. Hernández Solís, *Química general*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2008.
- [14] A. Vian Ortuno, *Introducción a la química industrial (2a. ed.)*. Place of publication not identified: Editorial Reverte, 2012.
- [15] «e-REdING. Biblioteca de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.» [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/30127>. [Accedido: 23-mar-2018].
- [16] «Los diferentes tipos de electrolizadores y sus características | QuimiNet.com». [En línea]. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/los-diferentes-tipos-de-electrolizadores-y-sus-caracteristicas-2704580.htm>. [Accedido: 08-jul-2018].
- [17] J. C. García, «Producción de hidrógeno mediante electrolizadores. Estado del arte de la tecnología.» [En línea]. Disponible en: <http://www.ingenieriaquimica.net/articulos/302-produccion-de-hidrogeno-mediante-electrolizadores-estado-del-arte-de-la-tecnologia-electrolizadore>. [Accedido: 08-jul-2018].
- [18] *Electrochemical components*. Hoboken, NJ: ISTE Ltd/John Wiley and Sons Inc, 2013.


- [19] A. Godula-Jopek y D. Stolten, Eds., *Hydrogen production: by electrolysis*, 1st ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2015.
- [20] M. Sankir y N. Demirci Sankir, Eds., *Hydrogen production technologies*. Beverly, MA : Hoboken, NJ: Scrivener Publishing ; John Wiley & Sons, 2017.
- [21] N. I. Collada Martínez, M. Gil Rodríguez, R. Marrero Rojas, M. Martínez Sánchez, F. M. Mesa García, y R. Pérez Otaño, *Química: oncenno grado*. La Habana: Pueblo y Educación, 2015.
- [22] N. M. Metheney, *Fluid & electrolyte imbalance: nursing considerations*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2000.
- [23] R. P. O'Hayre, S.-W. Cha, W. G. Colella, y F. B. Prinz, *Fuel cell fundamentals*. 2016.
- [24] S. E. Grasman, Ed., *Hydrogen energy and vehicle systems*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [25] R. Steinberger-Wilckens y W. Lehnert, Eds., *Innovations in fuel cell technologies*. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2010.
- [26] C. Spiegel, *PEM fuel cell modeling and simulation using Matlab*. Amsterdam :Boston: Academic Press/Elsevier, 2008.
- [27] «hydrogen generator - HYH-300;HYH-500 - Polar Light (China Manufacturer) - Analysis Instrument - Electronic Instrument Products - DIYTrade», *DIYTrade.com*. [En línea]. Disponible en: http://www.diytrade.com/china/pd/3091141/hydrogen_generator.html. [Accedido: 07-jul-2018].
- [28] «Fuel Cell Store». [En línea]. Disponible en: <https://www.fuelcellstore.com/>. [Accedido: 06-nov-2018].

[29] «Menú: Control del manejo de sustancias catalogadas sujetas a fiscalización. – Ministerio del Interior». [En línea]. Disponible en: <https://www.ministeriointerior.gob.ec/menu-control-del-manejo-de-sustancias-catalogadas-sujetas-a-fiscalizacion/>. [Accedido: 06-nov-2018].

[30] «Fuel Cell LLC». [En línea]. Disponible en: <http://www.fuelcellllc.com/>. [Accedido: 07-jul-2018].

ANEXO

ANEXO 1: Formulario FO-DCSC-UE-012 Solicitud para Autorización Ocasional

 Secretaría Técnica de Drogas	DIRECCIÓN DE CONTROL DE SUSTANCIAS CATALOGADAS SUJETAS A FISCALIZACIÓN FORMULARIO SOLICITUD PARA AUTORIZACIÓN OCASIONAL	Revisión 00
	CÓDIGO: FO-DCSC-UE-012	Página 1 de 1

SOLICITUD PARA AUTORIZACIÓN OCASIONAL

1. DATOS DEL COMPRADOR:

Nombre/ Razón Social:	
C.C./RUC:	
Actividad registrada en SRI	
Dirección:	
Provincia/ Cantón / Ciudad:	
Teléfono:	
Correo-e:	

2. SUSTANCIAS Y CANTIDADES REQUERIDAS:

NOMBRE DE LA SUSTANCIA	CANTIDAD	UNIDAD kg/g/mg/l/ml	TIEMPO PREVISTO ACTIVIDAD*	ACTIVIDAD EN LA QUE SE UTILIZARÁ LA SUSTANCIA

* La autorización ocasional tendrá vigencia hasta el cumplimiento de la actividad y finalidad para la que fue concedida, la cual no podrá ser superior a un año.

3. DATOS DEL PROVEEDOR:

Nombre/ Razón Social:	
RUC:	

f) Persona Natural o Representante Legal del Comprador
CC: _____

AUTORIZO REALIZAR EL TRÁMITE A:

NOMBRE	
Cédula o Pasaporte No.	

FIRMA PERSONA
AUTORIZADA

REQUISITOS:



1. Presentar cédula original del solicitante y persona autorizada
2. Adjuntar Plan de Investigación o Adiestramiento (Llenar Formulario STCA-UE-13)

Doy fe y certifico que la información presentada es verdadera, y puede ser verificada o validada por parte de la SETED.

Nota: Una vez que se apruebe su solicitud de AUTORIZACIÓN OCASIONAL; previa la entrega del CERTIFICADO, deberá cancelar el valor que corresponde al servicio.

General Robles E-4-54 y Río Amazonas
Teléfonos: (593 2) 022-940-300 Quito- Ecuador
www.prevencondrogas.gob.ec

ANEXO 2: Formulario FO-DCSC-UE-013 Información relacionada con el Plan de Investigación

 Secretaría Técnica de Drogas	DIRECCIÓN DE CONTROL DE SUSTANCIAS CATALOGADAS SUJETAS A FISCALIZACIÓN AUTORIZACION OCASIONAL PERSONAS NATURALES O JURÍDICAS PLAN DE INVESTIGACIÓN O ADIESTRAMIENTO	 Revisión 00
	CÓDIGO: FO-DCSC-UE-013	Página 1 de 4

INFORMACIÓN RELACIONADA CON EL PLAN DE INVESTIGACIÓN O ADIESTRAMIENTO

Título: Se refiere al nombre de la Investigación o Plan de Adiestramiento

1. Objetivo (s)

Los objetivos expresan las situaciones que se esperan resolver con la investigación o adiestramiento

2. Datos Generales



Investigador o Capacitador Principal	
Apellidos y Nombres	
Cédula /Pasaporte	Nacionalidad:
Correo-e:	
Domicilio Provincia	Cantón
Ciudad de Domicilio	Dirección domiciliaria
Referencia Domicilio	
Teléfono domicilio	
Teléfono celular	

Total de Capacitadores / Investigadores (número)

Integrantes del Proyecto (Capacitadores o Investigadores secundarios)

Apellidos y Nombres	
Cédula /Pasaporte	Nacionalidad:
Correo-e:	
Domicilio Provincia	Cantón
Ciudad de Domicilio	Dirección domiciliaria
Referencia Domicilio	
Teléfono domicilio	
Teléfono celular	

Apellidos y Nombres	
Cédula /Pasaporte	Nacionalidad:
Correo-e:	
Domicilio Provincia	Cantón
Ciudad de Domicilio	Dirección domiciliaria
Referencia domiciliaria	
Teléfono domicilio	
Teléfono celular	

 Secretaría Técnica de Drogas	DIRECCIÓN DE CONTROL DE SUSTANCIAS CATALOGADAS SUJETAS A FISCALIZACIÓN AUTORIZACION OCASIONAL PERSONAS NATURALES O JURÍDICAS PLAN DE INVESTIGACIÓN O ADIESTRAMIENTO	 Revisión 00
	CÓDIGO: FO-DCSC-UE-013	Página 2 de 4

Línea de Investigación: Científica / Práctica educativa
 Industrial / Práctica adiestramiento

Razón social de la entidad a la que pertenece: _____

RUC: _____

3. Lugar y Tiempo de Ejecución del Proyecto:



Provincia	Ciudad	
Parroquia		
Dirección		
Referencia		
Coordenadas Geográficas	Latitud:	Longitud:
Duración (en meses)		

3.1. Plano de ubicación (puede incluir captura de software de mapas como google maps, bing maps u otros):

3.2. Infraestructura física

Espacio físico dado en m2 _____

PAREDES	INSTALACIONES PARA CAPACITACIÓN /INVESTIGACIÓN	BODEGA
Hormigón Armado	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bloque	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ladrillo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Madera	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Otros	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

 Secretaría Técnica de Drogas	DIRECCIÓN DE CONTROL DE SUSTANCIAS CATALOGADAS SUJETAS A FISCALIZACIÓN AUTORIZACION OCASIONAL PERSONAS NATURALES O JURÍDICAS PLAN DE INVESTIGACIÓN O ADIESTRAMIENTO	 Revisión 00
	CÓDIGO: FO-DCSC-UE-013	Página 3 de 4

PISOS	INSTALACIONES PARA CAPACITACIÓN /INVESTIGACIÓN	BODEGA
Hormigón con recubrimiento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cemento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Adoquín	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Madera	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Otros	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Cubierta	INSTALACIONES PARA CAPACITACIÓN /INVESTIGACIÓN	BODEGA
Hormigón armado	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Zinc	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fibro cemento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Policarbonato	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stell panel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Otros	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4. Sustancias Catalogadas Sujetas a Fiscalización (a solicitar)

SUSTANCIA	Cantidad solicitada	Unidad

Unidad: kg, g, l, ml



5. Uso que se dará a la o las sustancias catalogadas sujetas a fiscalización.

Nombre de Análisis / práctica	Sustancia Controlada	% de Sustancia Controlada	Acción Química (Oxidante, Catalizador, etc.)	Usos	Norma, método o técnica de análisis

6. Indicador de uso de sustancias

Sustancia Controlada	Consumo total Previsto	Consumo por muestras ó ensayos	Índice Consumo previsto / # muestras



 Secretaría Técnica de Drogas	DIRECCIÓN DE CONTROL DE SUSTANCIAS CATALOGADAS SUJETAS A FISCALIZACIÓN AUTORIZACION OCASIONAL PERSONAS NATURALES O JURÍDICAS PLAN DE INVESTIGACIÓN O ADiestRAMIENTO	 Revisión 00
	CÓDIGO: FO-DCSC-UE-013	Página 4 de 4

7. Equipos y/o materiales a emplear para la investigación o adiestramiento

EQUIPO	MARCA	MODELO

MATERIALES

**FIRMA DEL INVESTIGADOR o
CAPACITADOR PRINCIPAL**

Doy fe y certifico que la información presentada es verdadera, y puede ser verificada o validada por parte de la SETED.

ANEXO 3: Certificado de Análisis del Hidróxido de Potasio



Jebesen & Jessen Life Science GmbH - Kohlenkiedler 11 - D-20457 Hamburg - Telefon +49(0)40 30 14 011 - http://www.jj-lifescience.de

Dirección postal: Jebesen & Jessen Life Science GmbH - Postfach 11 13 13 - 20413 Hamburg

RESIQUIM S.A.
RUC 0990854092001
Dirección Lotización Inmaconsa
Calle Dr. Honorato Vasquez
Solar 13, Manzana 9
GUAYAQUIL
ECUADOR

Certificado del análisis
Factura no.: 9140100241 Fecha: 15.01.2018
No. de contrato: 300016828
Referencia del representante: GJJ 3548.11.17
No. de cliente: 404138
Contacto / Dpto.: Stella Eggers / 1055
Tel. / Fax: +49(0)40 3014 - 175 / 3175
E-Mail: stella.eggers@jj-lifescience.de

POS	No.	Descripción de la mercancía	Cantidad
1	10	Potasa cáustica 90% en escamas Nuestro nº de art.: 10003778 Marca: J&J-1055/300016828 POTASA CAUSTICA EN ESCAMAS 90% FOOD PESO NETO:25KGS/PESO BRUTO:25.625KGS GUAYAQUIL/ECUADOR / FECHA DE FABRICACION:02-JAN-2018 FECHA DE CADUCIDAD:1 AÑO DESPUES FECHA DE FABR. NO. 1-1600 / BATCH NO.:180102 A 161-200 IMDG LABEL 8/UN NO 1813 Código SA: 2815.20.00	40.000 KG
		BATCH NO. 180102 A 161-200 MANUFACTURING DATE 02.01.2018 EXPIRY DATE 1 YEAR FROM MANUFACTURING DATE KOH (total alkali as KOH) 90.8 % K ₂ CO ₃ 0.2 % KCl 0.006 % Fe 0.2 ppm NaOH 0.12 % Ni 0.2 ppm Appearance white flake	

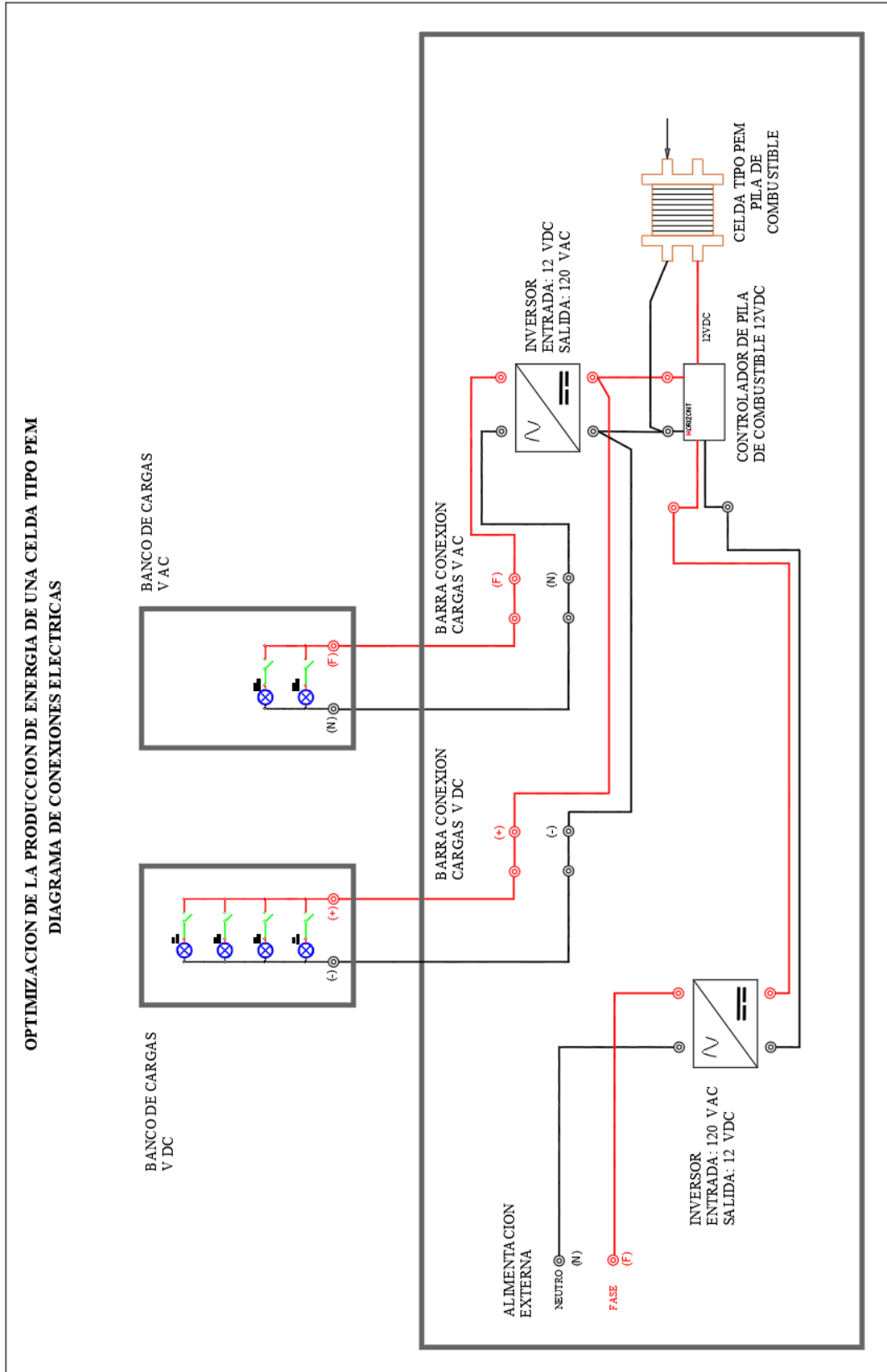
- Analysis as received from our supplier -

Jebesen & Jessen Life Science GmbH
S. Juhnke (clerk)

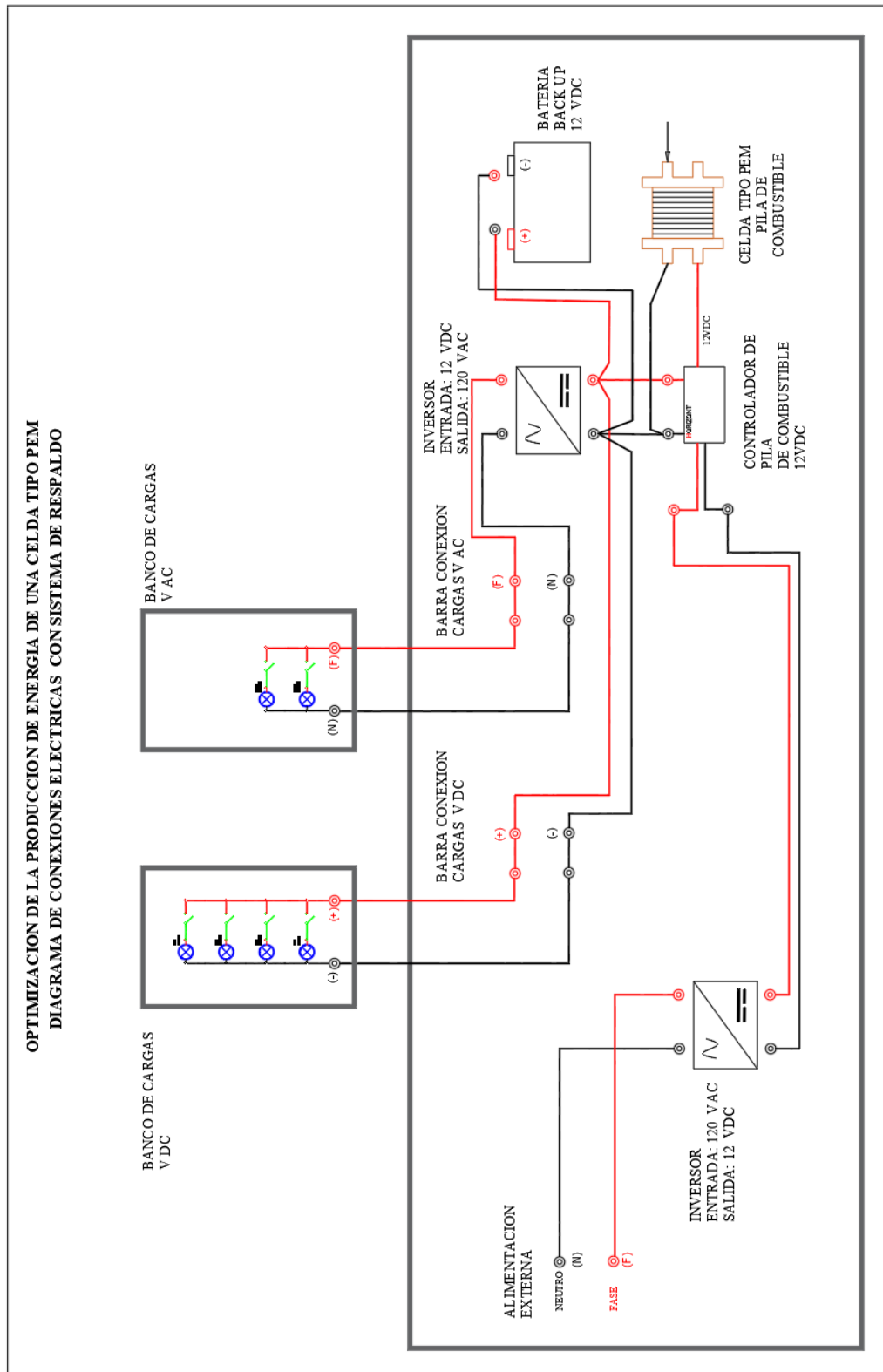
Tous les numéros se réfèrent au numéro d'achat ou aux conditions générales de vente. La marchandise demeure propriété du client jusqu'à l'expédition de la page 1018 de la facture. Filiale de notre entreprise y compris en Hambourg, Allemagne. Structure legal: GmbH, domicile social: Hambourg, registre commercial de Hambourg numéro HRB 144832. Domicile en général: Jebesen & Jessen Verwaltungsgesellschaft mbH, domicile social: Hambourg, registre commercial de Hambourg numéro HRB 14521. di'ccio generale: JJ&J. Tema.

Detos bancarios Deutsche Bank, 20079 Hamburg, Código bancario, No. de cta., SWIFT-Code: DE44 2512 0510 0007 9134 5000

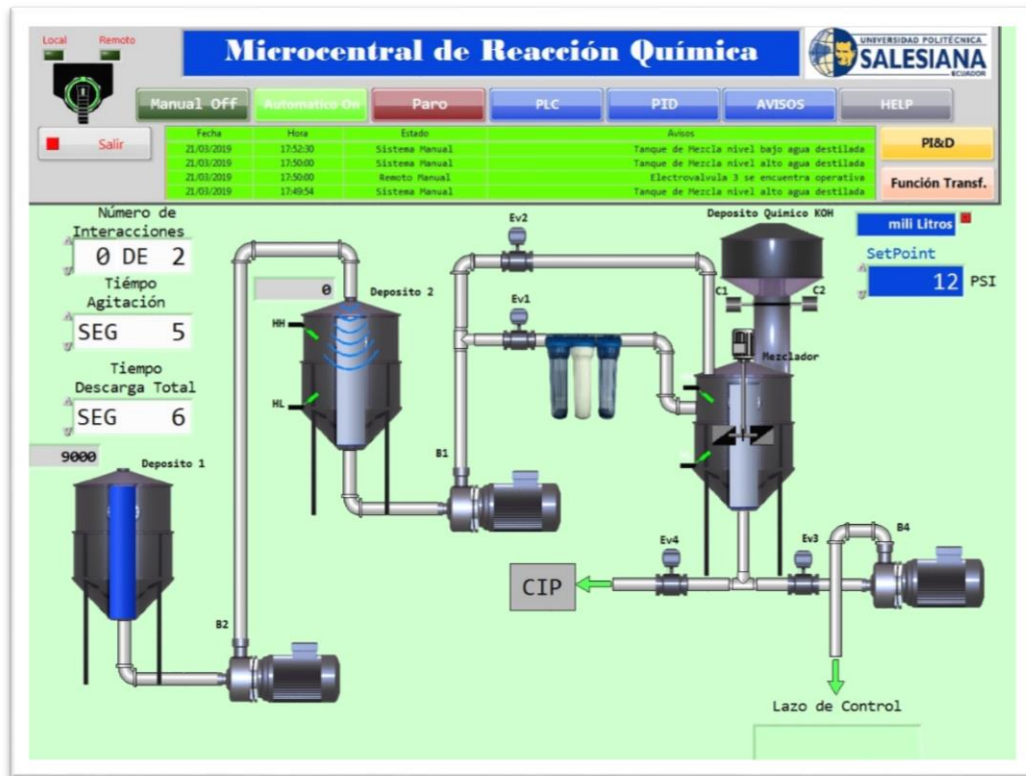
ANEXO 4: Diagrama de Conexiones Eléctricas.



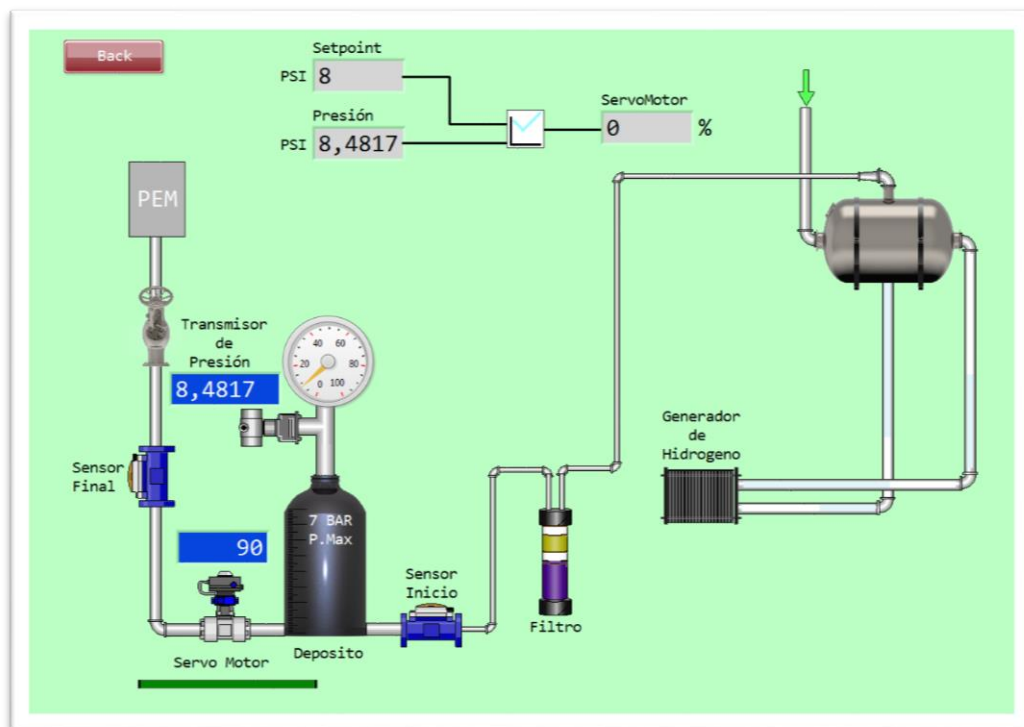
**OPTIMIZACION DE LA PRODUCCION DE ENERGIA DE UNA CELDA TIPO PEM
 DIAGRAMA DE CONEXIONES ELECTRICAS CON SISTEMA DE RESPALDO**

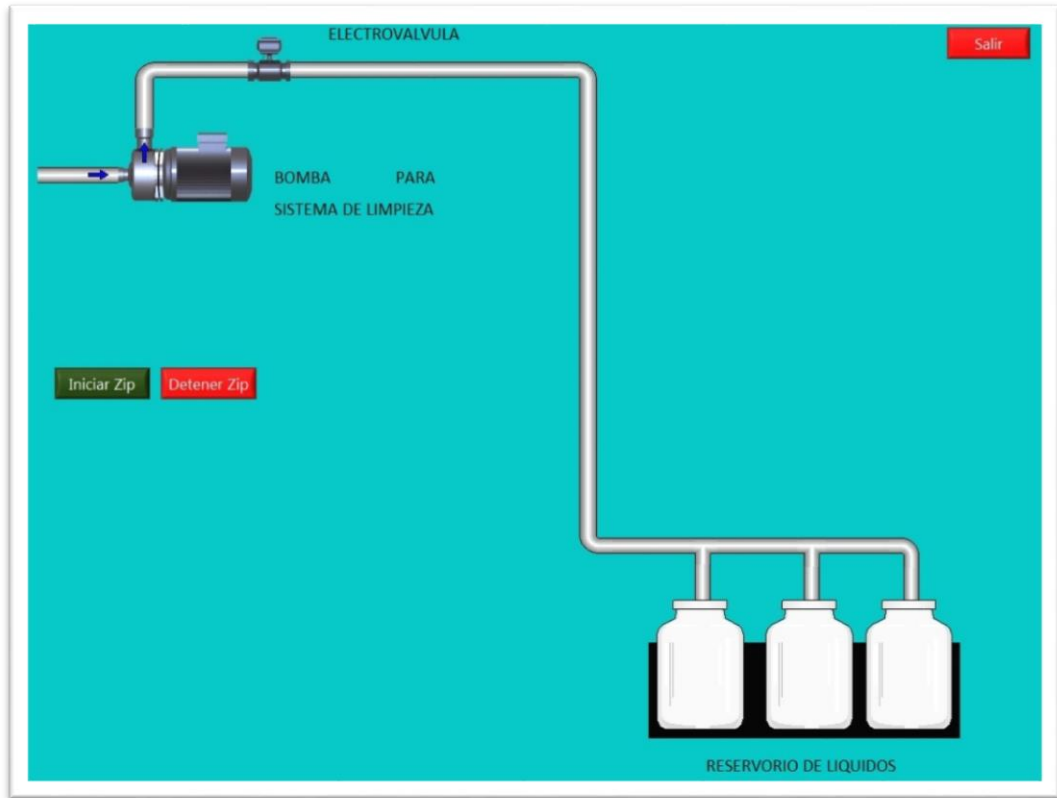


ANEXO 5: Sistema Scada de la Microcentral Optimizada- Suministro de reacción química al sistema

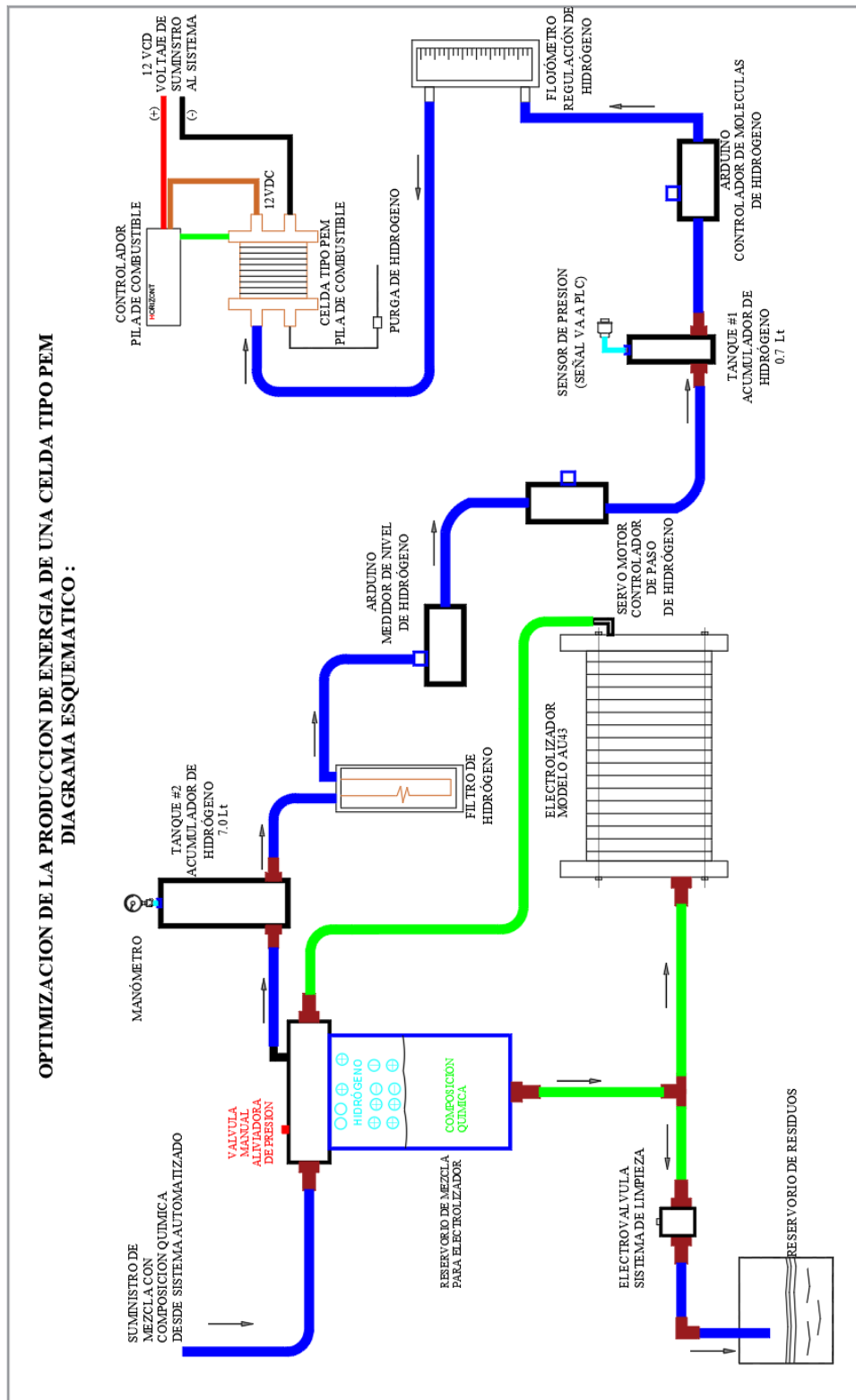


Fuente: Tesis de grado “VICTOR MENDOZA – KATHERINE GARCIA”

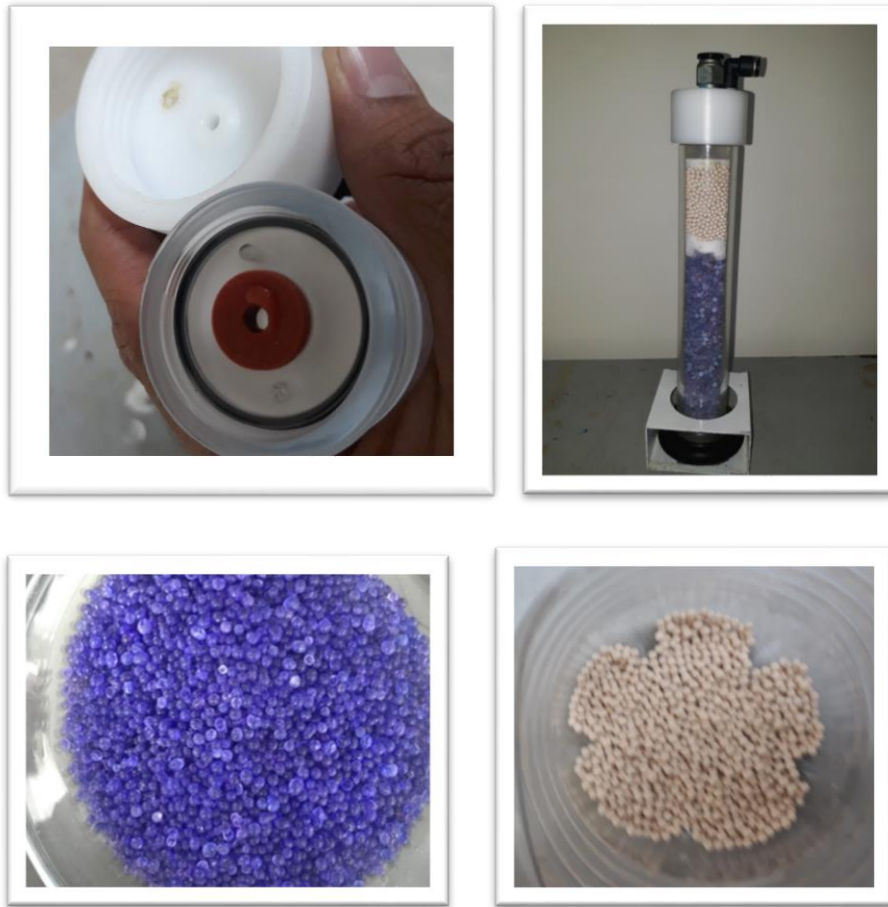




ANEXO 6: Diagrama Esquemático del diseño para la producción de Hidrógeno.



ANEXO 7: Componentes utilizados para el diseño del Equipo para la producción de Hidrógeno.



Filtro para secar Hidrógeno Gaseoso



Flujómetro 0-3 LPM



Banco de Cargas - Voltaje VDC
(4 FOCOS 21W 12VDC)



Equipos – Hornilla Eléctrica



Hidróxido de Potasio KOH 90% en escamas (Estado Sólido)



Depósito de Hidrogeno #1
Con Transmisor de presión
(Capacidad 0.75 litros)



Depósito de Hidrogeno #2
Con Manómetro
(Capacidad 7.0 litros)



Fuente de conmutada 600W 120VAC/12VDC – 60 amperios máx. (Corriente DC)

ANEXO 8: Medición de Temperatura de la solución electrolítica con una pistola láser.



Medición de Temperatura en solución a 45°C.



Medición de Temperatura en solución a 30°C.



Medición de Temperatura en solución a 73.2 °C.

ANEXO 9: Resultados obtenidos llevando a la solución a temperaturas establecidas.

Resultados del ensayo con la solución a 31.7°C

TIEMPO (minutos-seg)	VOLTAJE AC EN LA FUENTE [V]	INTENSIDAD DE CORRIENTE AC EN LA FUENTE [A]	VOLTAJE DC EN LA FUENTE [V]	INTENSIDAD DE CORRIENTE DC EN LA FUENTE [A]	TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN SALIDA DE ELECTROLIZADOR [°C]	PRESIÓN TANQUE [PSI]	FLUJO DE HIDRÓGENO [LPM]
1	123	1,70	12,2	13,65	31,70	0,00	0
4	123	1,80	12,2	14,45	31,80	0,45	0
8	123	2,00	12,2	15,55	32,50	0,65	0
10	123	2,10	12,2	16,25	33,00	1,00	0
12	123	2,20	12,2	16,78	34,00	1,25	0
14	123	2,30	12,2	17,02	35,00	1,75	0
16	123	2,50	12,2	17,08	37,00	2,00	0
17	122	2,70	12	17,25	37,00	4,50	0
18	122	2,80	12	17,45	37,00	6,20	0
19	121	3,00	11,89	17,88	37,00	7,00	0
20	121	3,00	11,88	18,22	38,00	7,50	1,5
20 min 20 seg	121	2,24	11,88	17,87	38,00	7,50	1,5
21 min 06 seg	121	2,24	11,88	17,87	40,00	5,00	1
21 min 52 seg	121	2,24	11,88	17,87	40,50	2,50	0,5

Resultados del ensayo con la solución a 45°C

TIEMPO (minutos-seg)	VOLTAJE AC EN LA FUENTE [V]	INTENSIDAD DE CORRIENTE AC EN LA FUENTE [A]	VOLTAJE DC EN LA FUENTE [V]	INTENSIDAD DE CORRIENTE DC EN LA FUENTE [A]	TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN SALIDA DE ELECTROLIZADOR [°C]	PRESIÓN TANQUE [PSI]	FLUJO DE HIDRÓGENO [LPM]
1	123	1,00	12,2	13,60	45,00	0,00	0
4	123	1,50	12,2	14,30	45,00	0,50	0
8	123	1,89	12,2	15,40	45,00	1,00	0
10	123	2,02	12,2	16,21	45,00	1,20	0
12	123	2,45	12,2	16,40	45,00	2,50	0
14	123	2,55	12,2	16,50	45,00	3,40	0
16	123	2,65	12,2	16,70	45,00	5,00	0
17	122	2,78	12	17,00	45,00	6,40	0
18	122	2,88	12	17,10	45,00	7,50	0
19	121	2,98	11,89	17,23	48,00	8,90	0
20	121	3,02	11,88	17,87	50,00	10,00	1,5
20 min 20 seg	121	3,12	11,88	17,87	50,00	7,50	1,5
21 min 06 seg	121	3,15	11,88	17,87	50,00	5,00	1
21 min 52 seg	121	3,22	11,88	17,87	50,00	2,50	0,5

Resultados del ensayo con la solución a 71.3°C.

TIEMPO (minutos-seg)	VOLTAJE AC EN LA FUENTE [V]	INTENSIDAD DE CORRIENTE AC EN LA FUENTE [A]	VOLTAJE DC EN LA FUENTE [V]	INTENSIDAD DE CORRIENTE DC EN LA FUENTE [A]	TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN SALIDA DE ELECTROLIZADOR [°C]	PRESIÓN TANQUE [PSI]	FLUJO DE HIDRÓGENO [LPM]
1	123	1,45	12,2	17,30	71,30	0,00	0
4	123	1,85	12,2	17,32	71,50	0,50	0
8	123	2,20	12,2	17,44	75,00	1,00	0
10	123	2,50	12,2	17,65	75,00	1,20	0
12	123	2,80	12,2	18,44	75,00	2,50	0
14	123	3,20	12,2	18,52	75,00	3,40	0
16	123	3,50	12,2	18,78	75,00	5,00	0
17	122	3,80	12	18,90	75,00	6,40	0
18	122	4,10	12	19,00	78,00	7,00	0
19	121	4,20	11,89	19,25	80,00	7,25	0
20	121	4,60	11,88	19,30	82,00	7,50	1,5
20 min 20 seg	121	4,10	11,89	19,27	80,00	7,50	1,5
21 min 06 seg	122	4,30	11,89	19,25	75,00	5,00	1
21 min 52 seg	122	4,25	11,87	19,26	75,00	2,50	0,5

ANEXO 10: Resumen de los equipos utilizados en la Producción de Hidrógeno.

Equipo / Material	Capacidad	Cantidad	Dimensión de Tubería	Función	Tipo	Riesgos
Reservorio de mezcla	3.3 Litros	2 Litros	Acople izquierdo para manguera de 10 mm Acople derecho para manguera de 12 mm Acople inferior para manguera de 12 mm Acople superior para manguera de 10 mm	Contener la solución de 2 L de agua destilada y 382 g de KOH	Plástico	Fisurarse y derramar la solución
Agua destilada	N/A	2 Litros	N/A	Agua libre de iones e impureza	Agua destilada	Ocasionar un cortocircuito
KOH	N/A	382 g	N/A	Su disolución en agua es altamente exotérmica, lo que lo hace adecuado para la producción de gas de Hidrógeno	Compuesto químico iorgánico de color blanco	Puede causar daños permanentes como quemaduras e incluso la muerte
Electrolizador AU43	0.44 Litros	1	Acople para manguera de 12 mm	Produce Hidrógeno mediante electrólisis del agua a un flujo de 6 LPM	Placas de acero y empaques de caucho	El exceso de presión puede reventar los empaques
Flujómetro	0 - 6 LPM	1	10 mm	Medir el flujo de Hidrógeno	Plástico	Romperse
Tanque 1 de almacenamiento del Hidrógeno	0.7 Litros	1	10 mm	Almacenar el Hidrógeno	Aceros inoxidable	Ninguno
Tanque 2 de almacenamiento del Hidrógeno	7 Litros	1	10 mm	Almacenar el Hidrógeno	Aceros inoxidable	Ninguno

ANEXO 11: Limpieza de las placas del electrolizador modelo AU43.



ANEXO 12: Limpieza del filtro de sílica y gel.



10. Storage and Re-Use

When finished operating the stack, place it in an enclosed area for storage to keep the stack from getting too dry. The stack should be stored at room temperature.

If the stack is un-used for a long period of time (more than 4 weeks) and its performance goes down 50% to the rated power at 12V after 30 minutes operation, we recommend do the following steps.

Note: Generally, injecting water into the stack it is not recommended. Only if the performance of the stack decreases 50% is it recommended to inject water into the stack to activate the stack before operation.

Rejuvenate by injecting water into the stack:

1. Connect a short section of hosing to the gas port marked "H2 in".
2. Fill a syringe (not provided) with water (distilled or purified). Make sure there is no air in the syringe. And then connect it to the hose attached to the "H2 in" port.
3. Inject distilled or purified water into the stack until you see water coming out of the "H2 out" port (see picture A below for reference). Keep the water inside the stack for about 2 minutes. Now disconnect the syringe with the tube, and leave the water in the stack.
4. Purged the water out of the stack as much as possible before use, say, it is not coming out of the output. Connect a short tube to the "H2 out" port. And connect the H2 supply (0.45-0.55Bar) to the stack without a load attached, to purge the stack as much as possible (i.e. letting hydrogen flow through the stack to remove water and other contaminants). Using the fuel cell stack with too much water inside can irreparably damage it! Please see picture B below for reference. **Make sure the hydrogen supply pressure is 0.45-0.55Bar.**

