



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA

“Diseño e Implementación de una Micro Central de Reacción Química empleando una Pila de Combustible alimentada por Hidrógeno y Oxígeno”

AUTORES

Leonardo Vicente Noboa Saavedra

Robert Gonzalo Piedra Pineda

DIRECTOR: Ing. Cecilia Catalina Grünauer Espinoza. Msc.

GUAYAQUIL

2017

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gary Ampuño

DIRECTOR DE CARRERA

Ing. Cecilia Grünauer

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. José Jaime Carriel

VOCAL

Ing. Gabriela Sánchez

VOCAL

Ing. Holger Santillán

VOCAL

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, LEONARDO NOBOA SAAVEDRA y ROBERT PIEDRA PINEDA 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, 24 de febrero de 2017

f) _____

Autor: Leonardo Noboa Saavedra

Cédula: 0923065734

f) _____

Autor: Robert Piedra Pineda

Cédula: 0705382570

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **LEONARDO VICENTE NOBOA SAAVEDRA**, con documento de identificación N° **0923065734**, 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 **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRO CENTRAL DE REACCIÓN QUÍMICA EMPLEANDO UNA PILA DE COMBUSTIBLE ALIMENTADA POR HIDRÓGENO Y OXÍGENO”** 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, 24 de febrero de 2017

f) _____

Autor: Leonardo Noboa Saavedra

Cédula: 0923065734

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Yo, **ROBERT GONZALO PIEDRA PINEDA**, con documento de identificación N° **0705382570**, 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 “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRO CENTRAL DE REACCIÓN QUÍMICA EMPLEANDO UNA PILA DE COMBUSTIBLE ALIMENTADA POR HIDRÓGENO Y OXÍGENO**” 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, 24 de febrero de 2017

f) _____

Autor: Robert Piedra Pineda

Cédula: 0705382570

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR

Yo, **CECILIA CATALINA GRÜNAUER ESPINOZA** directora del proyecto de Titulación denominado **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRO CENTRAL DE REACCIÓN QUÍMICA EMPLEANDO UNA PILA DE COMBUSTIBLE ALIMENTADA POR HIDRÓGENO Y OXÍGENO”** realizado por los estudiantes **LEONARDO NOBOA SAAVEDRA** y **ROBERT PIEDRA PINEDA** certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, 24 de febrero de 2017

f).....

Ing. Cecilia Catalina Grünauer Espinoza Msc.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo mi amor y cariño a mi familia: Rossy, Leandro y Luigi, por su esfuerzo y sacrificio, por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más; y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor.

A mis amados padres y hermanas, Vicente, María, Diana y Belén, quienes con sus palabras de aliento nunca me dejaron decaer, para que siga adelante y siempre sea perseverante a conseguir mis ideales.

Leonardo Noboa Saavedra

AGRADECIMIENTOS

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

A mi esposa Rossy, a mis hijos Leandro y Luigi, que siempre ha estado brindándome su comprensión, cariño y amor.

A mis padres, Vicente y María que estuvieron aconsejándome para ser de mí una mejor persona; a mis hermanas, Diana y Belén, por sus palabras y su compañía, por ser parte de una familia unida.

A todos mis compañeros de trabajo, el Ing. Milton Guzmán, Eduardo Cevallos, Hugo Robins, Ing. Raúl Intriago, quienes sin esperar nada a cambio estuvieron apoyándome.

A la tutora, Ing. Cecilia Grünauer, quien brindo su desinteresada orientación y guía en la elaboración del presente trabajo.

Leonardo Noboa Saavedra

DEDICATORIA

Dedicado especialmente a mi familia: Libio, Bélgica, Pablo, Jhonny, Vanesa, Eliza y Mateo por su tiempo, paciencia y apoyo que tuvieron conmigo en este largo camino animándome a seguir adelante y ser mejor cada día.

Robert Piedra Pineda

AGRADECIMIENTOS

A Dios sobre todas las cosas por estar conmigo en cada reto que he enfrentado en mi vida.

A mis Padres: Libio Piedra & Bélgica Pineda, y hermanos: Vanessa, Jhonny y Pablo, por darme la confianza para seguir adelante, por su infinito amor, cariño y palabras de motivación para lograr cada meta.

Pero este largo camino empezó con el apoyo de dos grandes personas: Amparo Gómez y Luis Salazar, quienes me apoyaron de manera desinteresada a dar mis primeros pasos en la carrera, durante el desarrollo fui creciendo como profesional y tuve ayuda de muchas personas entre las cuales agradezco principalmente a José y Fredy Quezada por compartirme su experiencia y conocimientos,

A la Familia Jiménez Vera por su acogida y aprecio durante todos estos años y compartir lindos momentos.

Una persona que ha estado conmigo desde antes de que llegara a este mundo Mi Padrino José Muñoz quien siempre ha estado conmigo a pesar de la distancia, que con su humor siempre me mostro el lado alegre de la vida a pesar de las adversidades.

A la tutora, Ing. Cecilia Grünauer, por su ayuda y tiempo que nos dedicó para la elaboración del presente trabajo.

A la Ing. Diana Noboa por su ayuda desinteresada, paciencia y tiempo para desarrollar el presente trabajo, este tipo de cosas nunca se olvidan en la vida.

A mi gato Pile por compartirme su amor, vivir lindos momentos y estar a mi lado en momentos soledad, siempre estará en mis recuerdos.

Robert Piedra Pineda

RESUMEN

Tema: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICRO CENTRAL DE REACCIÓN QUÍMICA EMPLEANDO UNA PILA DE COMBUSTIBLE ALIMENTADA POR HIDRÓGENO Y OXÍGENO

Autores: Leonardo V. Noboa S., Robert G. Piedra P.

Director de Tesis: Ing. Cecilia Grünauer Msc.

Palabras Claves: Pila de combustible, Celdas, Hidrógeno, Micro Central, Electrólisis

La celda de combustible es un dispositivo electroquímico capaz de transformar la energía química en energía eléctrica a través de reacciones químicas. Es considerada como tecnología limpia puesto que emplea, como materia prima, al hidrógeno para producir corriente eléctrica, calor y como desecho agua pura. Este proyecto describe la construcción de un prototipo de una central eléctrica empleando como generador, una celda de combustible tipo PEM, la que es alimentada de hidrógeno y oxígeno. Para el abastecimiento continuo de hidrógeno se necesitó un electrolizador que realice la descomposición electroquímica del agua el cual, se utilizó una disolución de hidróxido de potasio al 2,2 Molar. Las variables analizadas fueron: el caudal de hidrógeno como variable de entrada a la celda y las de salida: la corriente, el voltaje y la potencia. Los resultados fueron comparados con los resultados del fabricante de los equipos dando como resultado una eficiencia de generación del 94%.

ABSTRACT

Topic: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A MICRO CENTRAL
CHEMICAL REACTION USING A BATTERY OF HYDROGEN AND OXYGEN
FUEL

Authors: Leonardo V. Noboa S., Robert G. Piedra P.

Thesis Director: Cecilia Grünauer Msc.

Keywords: Fuel Cell, Cells, Hydrogen, Micro Central, Electrolysis

The fuel cell is an electrochemical device capable of transforming chemical energy into electrical energy through chemical reactions. It is considered as clean technology since it uses, as raw material, the hydrogen to produce electric current, heat and as waste pure water. This project describes the construction of a prototype of a power plant using as a generator, a PEM type fuel cell, which is fed by hydrogen and oxygen. For the continuous supply of hydrogen, an electrolyzer was needed to perform the electrochemical decomposition of the water, which was used a 2.2 molar solution of potassium hydroxide. The variables analyzed were: the hydrogen flow as input variable to the cell and the output variables: current, voltage and power. The results were compared with the results of the equipment manufacturer, resulting in a generation efficiency of 94%.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.

| | |
|--|-------|
| PORTADA..... | i |
| CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN..... | iii |
| CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN..... | iv |
| CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR..... | vi |
| DEDICATORIA | vii |
| AGRADECIMIENTOS | viii |
| RESUMEN..... | xi |
| ABSTRACT..... | xii |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | xiii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xvi |
| ÍNDICE DE TABLAS | xviii |
| ÍNDICE DE ECUACIONES | xix |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | xx |
| ABREVIATURAS..... | xxi |
| SIMBOLOGÍA..... | xxii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1 | 2 |
| 1. EL PROBLEMA | 2 |
| 1.1 Descripción del Problema | 2 |
| 1.2 Importancia y Alcances..... | 2 |
| 1.3 Delimitación..... | 3 |

| | |
|--|----|
| 1.4 Objetivos | 3 |
| 1.4.1 Objetivo General | 3 |
| 1.4.2 Objetivo Especifico | 3 |
| CAPÍTULO 2 | 4 |
| 2.MARCO TEÓRICO | 4 |
| 2.1 Centrales Eléctricas | 4 |
| 2.2 Celda de Combustible | 5 |
| 2.3 Funcionamiento General de la Celda de Combustible..... | 6 |
| 2.3.1 Componentes de una Celda de Combustible..... | 7 |
| 2.3.2 Clasificación de las Celdas de Combustible | 8 |
| 2.4 Celda de Combustible Tipo PEM | 10 |
| 2.5 Materia Prima..... | 12 |
| 2.5.1 Oxígeno (O) | 12 |
| 2.5.2 Hidrógeno (H) | 12 |
| 2.6 Electrólisis..... | 15 |
| 2.7 Electrolitos | 17 |
| 2.8 La Conductividad (K) | 19 |
| CAPÍTULO 3 | 22 |
| 3.MATERIALES Y MÉTODOS | 22 |
| 3.1 El Diseño..... | 22 |
| 3.1.1 Purificación del agua..... | 22 |
| 3.1.2 Producción de Hidrógeno..... | 25 |
| 3.1.3 Generación de Energía Eléctrica..... | 27 |
| 3.1.4 Aplicación de la Energía Eléctrica..... | 30 |
| 3.1.5 Cálculos Estequiométricos de la Micro Central..... | 32 |
| 3.2 Implementación..... | 37 |

| | |
|--|----|
| 3.2.1 Estructura | 37 |
| 3.2.2 Montaje del Tablero | 39 |
| 3.2.3 Equipos y Materiales..... | 42 |
| 3.2.4 Conexiones Eléctricas | 47 |
| 3.3 Generación Eléctrica | 49 |
| 3.4 Evaluación de la Micro Central de Reacción Química | 52 |
| 3.4.1 Análisis de Generación de la Micro Central | 52 |
| 3.4.2 Conductancia..... | 53 |
| 3.4.3 Eficiencia Energética | 54 |
| 3.4.4 Generación Total..... | 54 |
| CAPÍTULO 4..... | 55 |
| 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS..... | 55 |
| 4.1 Resultados Obtenidos..... | 55 |
| 4.2 Repotenciación de la Micro Central de Reacción Química | 63 |
| CONCLUSIONES | 71 |
| RECOMENDACIONES | 72 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 73 |
| ANEXOS | 77 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1: Consumo de Energía Primaria Mundial del 2015 | 5 |
| Figura 2: Pila de Combustible de Electrolito de Polímero..... | 6 |
| Figura 3: Componentes de una Pila de Combustible | 7 |
| Figura 4: Esquema Celda de Combustible tipo PEM | 8 |
| Figura 5: Esquema Celda Alcalina..... | 9 |
| Figura 6 Esquema Pila tipo PAFC [18] | 9 |
| Figura 7: Esquema Celda tipo MCFC..... | 10 |
| Figura 8: Operación de una Celda de Combustible PEM | 11 |
| Figura 9: Propiedades Atómicas del Hidrógeno | 13 |
| Figura 10: Métodos de Producción de Hidrógeno | 13 |
| Figura 11: Electrólisis del Agua..... | 16 |
| Figura 12: Electrolito | 17 |
| Figura 13 Diagrama de Procesos de la Micro Central | 22 |
| Figura 14: Sistema de Tratamiento de Agua..... | 23 |
| Figura 15: Tanques de Pre-Mezcla y Mezcla..... | 24 |
| Figura 16: Generador de Hidrógeno | 26 |
| Figura 17: Barra de Alimentación..... | 31 |
| Figura 18: Diseño de la Estructura del Tablero | 37 |
| Figura 19: Construcción de la Estructura..... | 38 |
| Figura 20: Diseño de la lámina frontal..... | 40 |
| Figura 21: Colocación de vinil y perforación de la plancha | 40 |
| Figura 22: Verificación de las perforaciones | 41 |
| Figura 23: Pintado de la Plancha..... | 41 |
| Figura 24: Colocación del Vinil..... | 42 |
| Figura 25: Pila de combustible tipo PEM de 100w | 44 |
| Figura 26: Controlador de la Pila de Combustible..... | 44 |
| Figura 27: Diagrama de conexiones de la Pila de Combustible..... | 45 |
| Figura 28: Electroválvula para Control de Sobre Presiones de Gas Hidrógeno | 46 |
| Figura 29: Válvula Manual Regulador de Presión de Gas Hidrógeno..... | 47 |
| Figura 30: Conexiones Eléctricas sin Carga | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 31: Conexiones Eléctricas Con Carga | 48 |
| Figura 32: Procedimiento de Filtrado del agua | 49 |
| Figura 33: Balanza para Solución Electrolítica..... | 50 |
| Figura 34: Reservorio de Mezcla | 50 |
| Figura 35: Generación de Energía Eléctrica | 51 |
| Figura 36: Diagrama de Flujo del Proceso de Generación de energía Eléctrica..... | 51 |
| Figura 37: Esquema Gráfico del Proceso de Purificación | 53 |
| Figura 38: Etapas de Funcionamiento de la Micro Central de Reacción Química | 55 |
| Figura 39: Parte Frontal Micro Central | 56 |
| Figura 40: Parte Posterior Micro Central | 56 |
| Figura 41: Diagrama de Flujo de Proceso de Generación de energía eléctrica. | 57 |
| Figura 42: Consumo ml/h versus Corriente | 60 |
| Figura 43: Consumo ml/h versus Corriente | 61 |
| Figura 44: Conexiones de los equipos en el Software | 66 |
| Figura 45: Costo Total se la Repotenciación | 66 |
| Figura 46: Simulación del Funcionamiento Anual de la Pila de Combustible | 67 |
| Figura 47: Simulación del Funcionamiento Anuales de la Pila de Combustible..... | 67 |
| Figura 48: Funcionamiento Anual de la Pila de Combustible | 68 |
| Figura 49: Simulación del Funcionamiento Anual del Electrolizador..... | 68 |
| Figura 50: Funcionamiento Anual del Electrolizador..... | 69 |
| Figura 51: Simulación del Funcionamiento Anual del Banco de Baterías | 69 |
| Figura 52: Funcionamiento Anual del Banco de Baterías | 70 |
| Figura 53: Comportamiento del Tanque de Almacenamiento de Hidrógeno | 70 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1: Clasificación de Centrales Según su Potencia | 4 |
| Tabla 2: Clasificación de Centrales Según su Materia Prima | 4 |
| Tabla 3: Propiedades Atómicas del Oxígeno | 12 |
| Tabla 4: Equipos de Purificación de Agua..... | 25 |
| Tabla 5: Especificaciones Técnicas del Generador de Hidrógeno | 27 |
| Tabla 6: Equipos de la Producción de Hidrógeno..... | 28 |
| Tabla 7: Especificaciones Técnicas de la Pila tipo PEM [34] | 29 |
| Tabla 8: Generación de Energía Eléctrica..... | 30 |
| Tabla 9: Equipos de la Aplicación de la Energía Eléctrica..... | 32 |
| Tabla 10: Datos del Generador de Hidrógeno..... | 35 |
| Tabla 11: Herramientas y Equipos Utilizados en la Implementación Estructural. | 38 |
| Tabla 12: Lista de Equipos que Conforman el Modulo | 43 |
| Tabla 13: Especificaciones Técnicas del Generador de Hidrógeno..... | 47 |
| Tabla 14: Análisis de Generación de la Micro Central | 59 |
| Tabla 15: Consumo de Solución Electrolítica versus Tiempo | 60 |
| Tabla 16: Registro de Datos Conductividad. | 61 |
| Tabla 17: Balance Energético de la Micro Central | 62 |
| Tabla 18: Registro de datos de Generación Total de la Micro Central de Reacción Química..... | 63 |
| Tabla 19: Equipos de la Micro Central de Reacción Química para repotenciar | 64 |
| Tabla 20: Comparación de Equipos de la Micro Central de Reacción Química repotenciada | 65 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | Pág. |
|---|-------------|
| Ecuación 1 Reacción Anódica | 11 |
| Ecuación 2 Reacción Catódica..... | 11 |
| Ecuación 3: Electrolisis del Agua | 16 |
| Ecuación 4: Proceso en el Ánodo..... | 16 |
| Ecuación 5: Proceso en el Cátodo..... | 16 |
| Ecuación 6 Reacción del Ánodo y el Cátodo..... | 16 |
| Ecuación 7 Sal Común | 17 |
| Ecuación 8: Reacción del Cátodo | 18 |
| Ecuación 9: Reacción del Ánodo | 18 |
| Ecuación 10: Conductividad | 19 |
| Ecuación 11: Ecuación Global de la Electrólisis del Agua..... | 32 |
| Ecuación 12: Ecuación de la Producción de Hidrógeno | 33 |
| Ecuación 13: Ecuación de Conversión de Masa a Volumen del Hidrógeno..... | 33 |
| Ecuación 14: Ecuación de la Producción de Oxígeno | 34 |
| Ecuación 15: Ecuación de Conversión de Masa a Volumen del Oxígeno..... | 34 |
| Ecuación 16: Ecuación de Flujo Volumétrico | 35 |
| Ecuación 17: Ecuación de Concentraciones Químicas | 35 |
| Ecuación 18: Ecuación de Moles de Solute..... | 35 |
| Ecuación 19: Ecuación de Volumen de la Solución | 36 |
| Ecuación 20: Ecuación de la Solución..... | 36 |
| Ecuación 21: Ecuación de Concentración del Tanque de Pre-Mezcla..... | 36 |
| Ecuación 22: Ecuación de Concentración del Tanque de Mezcla Electrotécnica | 36 |
| Ecuación 23: Δ del Consumo de la Solución Electrolítica (ml/h) vs la Corriente | 59 |
| Ecuación 24: Δ del Consumo de la Solución Electrolítica (ml/h) vs el Tiempo..... | 61 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| ANEXO 1: Partes y características de la celda de combustible..... | 72 |
| ANEXO 2: Costo real de la micro central de reacción química | 77 |
| ANEXO 3: Micro central de reacción química repotenciada..... | 78 |
| ANEXO 4: Diagrama de conexiones eléctricas de la micro central | 79 |

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 | Pilas Alcalinas |
| PACF | Pilas de Ácido Fosfórico |
| MCFC | Pilas de Carbonatos Fundidos |
| SOFC | Pilas 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 ⁺ | Hidrógeno Protonado (catión) |
| 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 |
| Izq | Izquierda |
| H | Hora |
| Seg | Segundo |
| Min | Minuto |

INTRODUCCIÓN

En julio del 2016, el Ecuador firma el acuerdo de Paris que reemplazó al protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), “El cual busca un mundo con energía limpia a partir de la implementación efectiva de estrategias firmes para la reducción de emisiones globales de gases de efecto invernadero” [1].

Este proyecto tiene como finalidad reafirmar el compromiso adquirido a través de la incursión en el estudio de las energías renovables y amigables con el ambiente como son las celdas de combustible en combinación con tecnología del hidrógeno, juntas proveen de energía limpia con rendimientos altos, cero emisiones de dióxido de carbono y como residuo agua pura.

A nivel nacional, no existe este tipo de proyectos implementados, sin embargo, se puede citar tres ejemplos a nivel mundial: California, USA, Empresa Energy Generation en 2007 instala Planta de 1MW llamada Northridge; en Canadá, la empresa Ballard en el 2012 instala Planta de 1MW para Toyota Headquarters Campus y en Korea del Sur, se instaló la Planta de 59MW in Hwasung City, en el 2014, con 21 celdas de 2.8MW instaladas por la empresa FuelCell Energy of Danbury.

Por tanto, se considera de gran importancia para el país, desarrollar e invertir en este tipo de proyectos para contribuir con la Matriz Energética y cumplir con el Objetivo once del Plan Nacional del Buen Vivir que manifiesta: “Asegurar la soberanía y eficiencia de los sectores estratégicos para la transformación industrial y tecnológica”; dentro de sus políticas y lineamiento, busca “Aprovechar el potencial energético basado en fuentes renovables, principalmente de la hidroenergía, en el marco del derecho constitucional al acceso al agua y de la conservación del caudal ecológico”, “Cuantificar el potencial de recursos de energías renovable para generación eléctrica” y “Fortalecer la investigación científica en los ámbitos energéticos, de industrias básicas y de generación y uso sustentable de energía renovable, para la industria, los hogares, el transporte y la producción”; buscando cumplir con las metas proyectadas, tales como: “ Duplicar la capacidad instalada de energías renovables” y “Aumentar la capacidad instalada para generación eléctrica a 8569MW. [2]

CAPÍTULO 1

1. EL PROBLEMA

1.1 Descripción del Problema

En la actualidad las fuentes principales de combustible que se emplean para la generación de electricidad son de origen fósil como: el petróleo, el gas natural y el carbón, cuya combustión produce emisiones de dióxido de carbono (CO_2), el cual es uno de los principales gases contribuyentes del efecto invernadero y la contaminación al medio ambiente.

En julio del 2016, el Ecuador firma el acuerdo de Paris que reemplazó al Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), “El cual busca un mundo con energía limpia a partir de la implementación efectiva de estrategias firmes para la reducción de emisiones globales de gases de efecto invernadero” [1]

Por esto se presenta una evaluación de la eficiencia energética de las celdas de combustible a base de Hidrógeno, considerada como tecnología limpia por su escasa producción de (CO_2) durante la producción de energía eléctrica.

1.2 Importancia y Alcances

El modelo energético que se ha utilizado en los últimos años está fundamentado en los combustibles fósiles, los cuales presentan serios problemas de insostenibilidad, baja eficiencia y gran producción de emisiones contaminantes, razones por las cuales resulta indudable la necesidad de investigar nuevas alternativas energéticas.

Las celdas de combustible y la generación del hidrógeno constituirán soluciones a la inestabilidad y mejoramiento de la producción energética. Estas permiten la transformación directa de la energía química en energía eléctrica a través de una membrana de intercambio de protones.

Sus ventajas más importantes son:

- Fácil instalación
- Bajas emisiones de contaminantes (CO₂)
- Bajos costos de mantenimiento
- Amplios intervalos de potencia

1.3 Delimitación

El proyecto se realizó en el tiempo estimado de octubre del 2015 hasta diciembre del 2016 utilizando herramientas de diseño como el programa AutoCAD® para delinear el Tablero de la Micro Central el cual será construido en un taller mecánico ubicado en el sector de la Prosperina, para luego realizar su finalización en la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Generar energía eléctrica mediante el diseño e implementación de una micro central empleando una Pila de Combustible tipo PEM (Membrana de Intercambio Protónico), abastecida por hidrógeno y oxígeno; para obtener energía limpia con cero contaminaciones de dióxido de carbono.

1.4.2 Objetivo Especifico

- Diseñar e Implementar una Micro Central empleando una Pila de Combustible tipo PEM con una potencia instalada de 100 w, abastecida por Hidrógeno y Oxígeno.
- Generar Energía Eléctrica a través de la Reacción Química originada en la Pila de Combustible.
- Dimensionar técnicas de los componentes de la Micro Central.
- Analizar los resultados experimentales en función de uso de la Micro Central.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Centrales Eléctricas

Una central generadora de energía eléctrica es aquella que tiene como función de “transformar alguna clase de energía (química, cinética, térmica, etc.) en energía eléctrica”. [3] La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) clasifica el tipo de central según: la potencia generada (ver Tabla 1) y según su materia prima (ver Tabla 2).

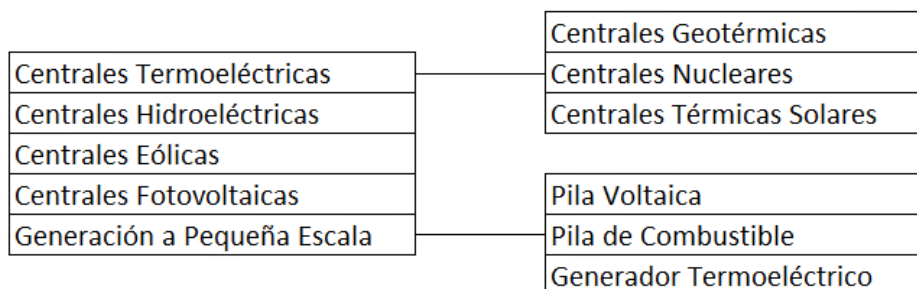
Tabla 1: Clasificación de Centrales Según su Potencia

| POTENCIA EN (KW) | TIPO |
|------------------|-----------------|
| 0-50 | MICRO CENTRAL |
| 50-500 | MINI CENTRAL |
| 500-5000 | PEQUEÑA CENTRAL |

Fuente: [3]

Las centrales eléctricas generalmente se ubican en las cercanías de las fuentes de energías primarias, como por ejemplo las “centrales hidroeléctricas cercanas a los ríos para aprovechar la energía potencial del agua, también pueden ubicarse próximas a las zonas con gran consumo energético como las grandes ciudades o industrial con gran demanda”. [4]

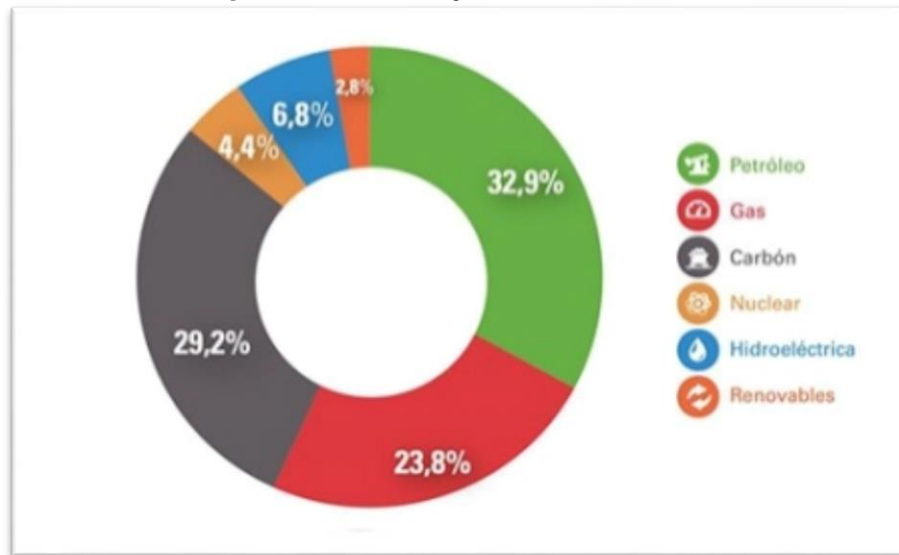
Tabla 2: Clasificación de Centrales Según su Materia Prima



Fuente: [3]

Según la Agencia Internacional de Energía (AIE) el consumo de energía primaria para la producción de energía eléctrica a nivel mundial en el año 2015, tiene como dominante a “los combustibles fósiles con un 85,9%, principalmente el petróleo y el gas, mientras tanto que energías renovables como la hidroeléctrica representó un 6,8%” como lo podemos ver en la Figura 1. [5]

Figura 1: Consumo de Energía Primaria Mundial del 2015



Fuente: [5]

2.2 Celda de Combustible

La Celda de combustible o también conocida como pila de combustible es un “dispositivo electroquímico capaz de producir energía eléctrica a partir de reacciones químicas” [6].

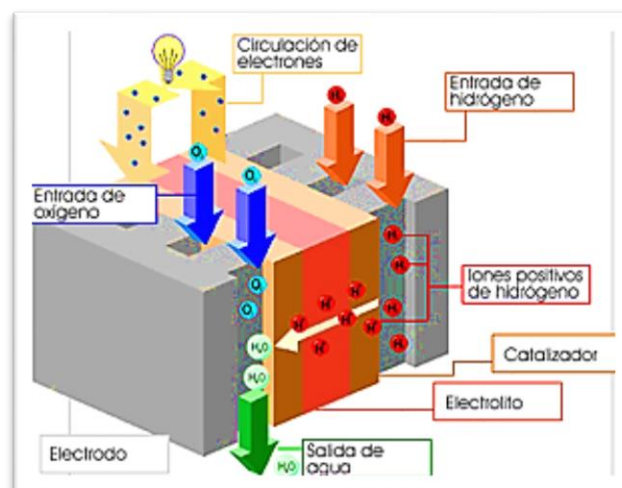
Su principal ventaja son las bajas emisiones de gases de efecto invernadero como es el CO₂ en comparación con otros métodos de generación. Las celdas tienen una alta eficiencia energética las cuales vienen dadas en el “intervalo de 40– 50% de energía eléctrica y entre un 80–85% de la energía total, considerando el aprovechamiento del calor liberado” [7]. Siendo capaz de generar calor a una “temperatura por debajo de los 100°C”. [8]. Además, las celdas poseen “un amplio espectro de potencias las cuales van desde algunos cuantos vatios hasta el megavatio (MW)” [9].

Los principales retos que presenta esta tecnología (para el avance de la pila) es la disminución del costo y el incremento de la eficiencia, “Los materiales de los electrodos que catalizan las reacciones de oxidación de hidrógeno y de reducción de oxígeno son los materiales de mayor coste entre los elementos que componen la celda” [10]; los cuales tienen en su composición partículas de platino y otros metales nobles, la “Escasez del platino en la naturaleza hace que el coste de este material supere incluso al del oro” [10]; por lo tanto, la reducción del coste de los materiales que integran los electrodos es un paso importante para facilitar la comercialización y uso de este tipo de dispositivos.

2.3 Funcionamiento General de la Celda de Combustible

Una celda de combustible está formada por dos electrodos separados por un electrolito, en el ánodo se ioniza el hidrógeno perdiendo un electrón el cual atraviesa un circuito y genera energía eléctrica. Por otro lado, el hidrógeno llega al otro electrodo pasando por el electrolito y se combina con el oxígeno del aire (O_2) lo que genera como residuo H_2O (agua). “Las reacciones electroquímicas tienen lugar en los electrodos para producir una corriente eléctrica a través del electrolito, mientras conducen una corriente eléctrica complementaria que realiza trabajo sobre la carga. [11].

Figura 2: Pila de Combustible de Electrolito de Polímero

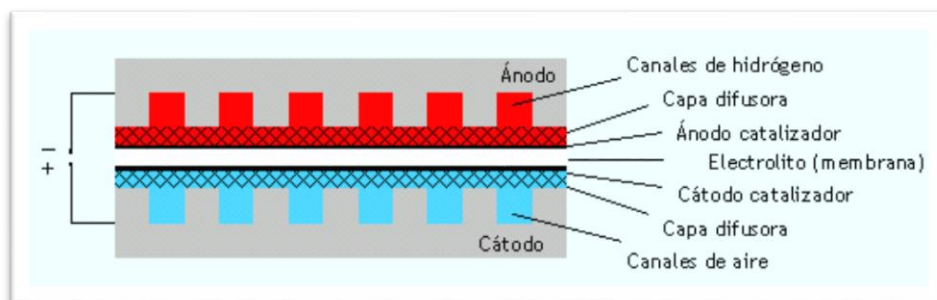


Fuente: [12]

2.3.1 Componentes de una Celda de Combustible

Una pila de combustible tiene una composición simple, debido a que consta de pocas partes, pero las más importantes son los electrodos y el electrolito. “Además, es necesario que contenga placas con canales de flujo para distribuir los reactantes homogéneamente por toda el área de la celda.” [13], En la siguiente Figura 3 se muestra los componentes de una celda de combustible de un electrolito polimérico.

Figura 3: Componentes de una Pila de Combustible



Fuente: [13]

Los Canales de flujo en conjunto con las placas bipolares tiene la misión de asegurar la distribución del combustible y del oxidante por toda el área de la pila. Las placas están compuestas de “grafito de alta pureza. Este se considera un excelente material, sin embargo, los costos de proceso y fabricación son altos.” [14]

Las capas difusoras se usan en pilas de baja temperatura y “están formadas por materiales porosos buenos conductores de la electricidad, de forma que distribuyan los gases uniformemente sobre las capas catalíticas” [15], lo que favorece a la extracción del agua de la capa catalítica catódica y sirven de conexión eléctrica entre las capas y las placas bipolares. El electrolito tiene tres funciones fundamentales dentro de este proceso que consiste “en ser conductor iónico, aislante electrónico y separador de los reactantes anódicos y catódicos” [13]. Los electrodos son una placa de metal que “compuesta por el ánodo, en el momento que llega los electrones de la celda ocurre la oxidación, mientras que el cátodo es el electrodo al cual llegan los electrones para reaccionar con el oxidante, y producir la reducción” [16]. La composición de dos electrodos y una membrana se la denomina conjunto electrodos/membrana o también

conocida como MEA (Ensamblaje de Electrodo Membrana), el catalizador abundantemente utilizado es el platino, que a veces es mezclado con otros metales.

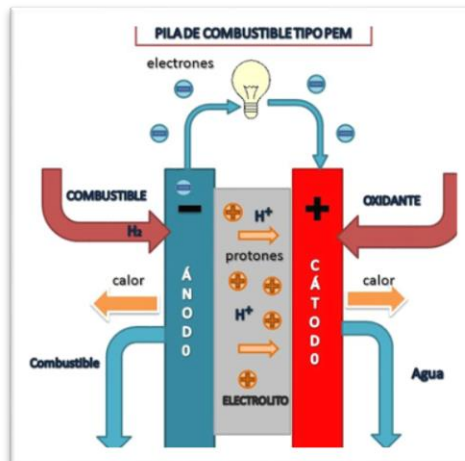
2.3.2 Clasificación de las Celdas de Combustible

“Las celdas o pilas de combustible se clasifican por el tipo de electrolito que utilizan, lo que determina la temperatura de operación” [10]. También pueden estar clasificadas, según su capacidad de potencia, temperatura, rendimiento.

- Celda de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)
- Celda Alcalinas (AFC)
- Celda de Ácido Fosfórico (PACF)
- Celda de Carbonatos Fundidos (MCFC)
- Celda de Óxidos Sólidos (SOFC)

Las Celda de Membrana de Intercambio Protónico (PEM), “Usan como electrolito un polímero sólido y electrodos porosos de carbono que contienen platino como catalizador” [17]. Necesita hidrógeno y oxígeno como combustible, además de que trabajan a bajas temperaturas. En la Figura 4 podemos observar el esquema de la misma.

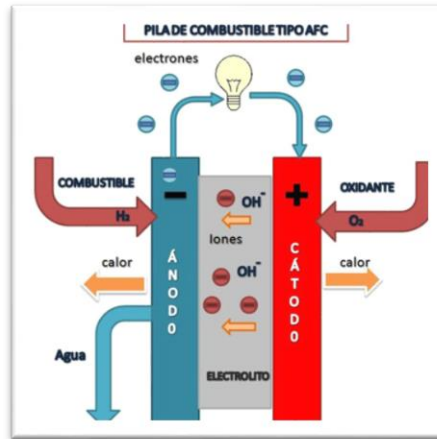
Figura 4: Esquema Celda de Combustible tipo PEM



Fuente: [1]

Las Celda Alcalinas (AFC), “emplean, un electrolito alcalino como es el hidróxido de potasio o una membrana alcalina.” [18], Este tipo de celda son empleadas como fuentes de energía portátil. En la Figura 5 se observa la celda AFC.

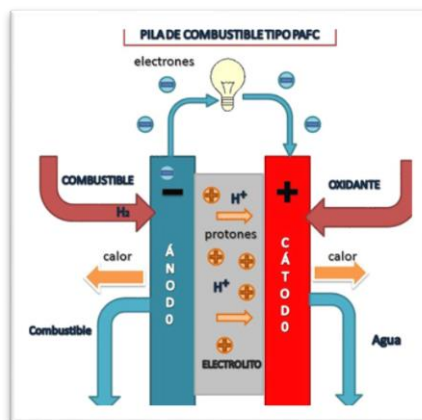
Figura 5: Esquema Celda Alcalina



Fuente: [18]

Las celdas tipo PACF a base de ácido fosfórico, al contrario de las celdas Alcalinas éstas son accesibles comercialmente y se encuentran distribuidas en “sistemas de generación estacionaria. Dentro de estos sistemas podemos ver hospitales, residencias particulares, hoteles, aeropuertos, etc.” [19], en la Figura 6 podemos observar el esquema de la celda PACF.

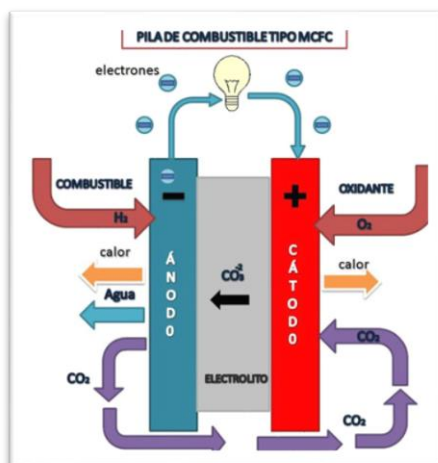
Figura 6 Esquema Pila tipo PAFC [18]



Fuente: [18]

Las celdas tipo MCFC tienen características muy similares al tipo PEM, “Sin embargo, las pilas de metanol, usan metanol directamente sobre el ánodo, lo que elimina la necesidad de que el combustible pase por un reformador” [18]. En la Figura 7 podemos observar el esquema de la celda tipo MCFC.

Figura 7: Esquema Celda tipo MCFC

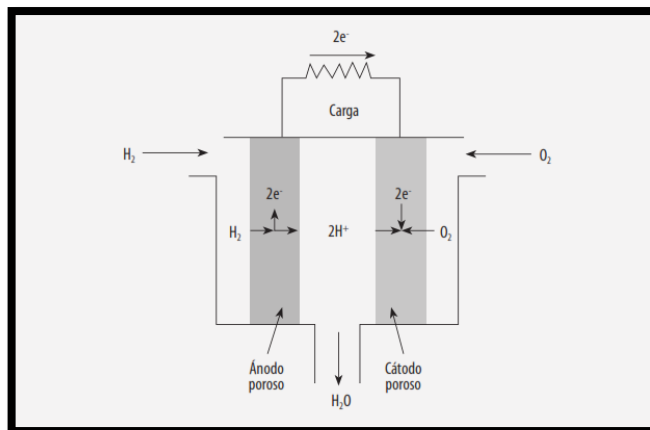


Fuente: [17]

2.4 Celda de Combustible Tipo PEM

La generación de energía eléctrica viene dada por el ingreso del hidrógeno a la pila de combustible del tipo de membrana intercambiado de protones, es un dispositivo electroquímico en donde el flujo continuo del combustible y de un oxidante sufren una reacción química controlada lo cual tiene lugar como resultado suministrar directamente corriente eléctrica continua. El mínimo impacto ambiental y la alta eficiencia que tiene el proceso electroquímico lo convierten en una mejor opción ante los procesos térmicos o mecánicos, en términos generales la eficiencia energética de dicha pila es alrededor del 50 % y puede llegar a valores que superan el 85% en cogeneración. [20]

Figura 8: Operación de una Celda de Combustible PEM



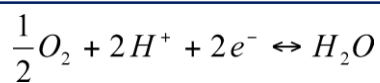
Fuente: [6]

La reacción química que presenta la celda se da en los electrodos de la misma, cada uno con su reacción respectiva llamada semi-reacción. En el ánodo (+), se produce la oxidación o pérdida de electrones y en el cátodo (-) se produce reducción o ganancia de electrones. Producto de la reacción anódica (Ecuación 1) se producen electrones, que por medio de un circuito externo (carga) son suministrados al cátodo, lo cual tiene lugar a la reacción catódica (Ecuación 2).



Ecuación 1 Reacción Anódica

Fuente: [6]



Ecuación 2 Reacción Catódica

Fuente: [6]

“Aunque una celda de combustible real no se acerca a esta eficiencia ideal, es mucho más eficiente que cualquier planta de energía eléctrica que quema un combustible.”
[21]

2.5 Materia Prima

2.5.1 Oxígeno (O)

El oxígeno es un elemento químico de aspecto incoloro y pertenece al grupo de los no metales. [22] El número atómico del oxígeno es 8. El símbolo químico del oxígeno es O. El punto de fusión del oxígeno es de 50,35 grados Kelvin o de -221,8 grados Celsius o grados centígrados. “El punto de ebullición del oxígeno es de 90,18 grados Kelvin o de -181,97 grados Celsius o grados centígrados.” [23]

Tabla 3: Propiedades Atómicas del Oxígeno

| OXÍGENO | |
|---------------------------|--|
| Símbolo Químico | O |
| Número Atómico | 8 |
| Grupo | 16 |
| Período | 2 |
| Aspecto | incoloro |
| Bloque | p |
| Densidad | 1.429 kg/m ³ |
| Masa Atómica | 15.9994 u |
| Radio Atómico | 60 (48) pm (Radio de Bohr) |
| Radio Covalente | 73 pm |
| Radio De Van Der Waals | 152 pm |
| Configuración Electrónica | 1s22s22p4 |
| Estados De Oxidación | -2, -1 (neutro) |
| Estructura Cristalina | cúbica |
| Estado | gaseoso |
| Punta De Fusión | 50.35 K |
| Punto De Ebullición | 90.18 K |
| Calor De Fusión | 0.22259 kJ/mol |
| Volumen Molar | 17,36x10 ⁻³ m ³ /mol |
| Electronegatividad | 3,44 |
| Calor Específico | 920 J/(K·kg) |
| Conductividad Térmica | 0,02674 W/(K·m) |

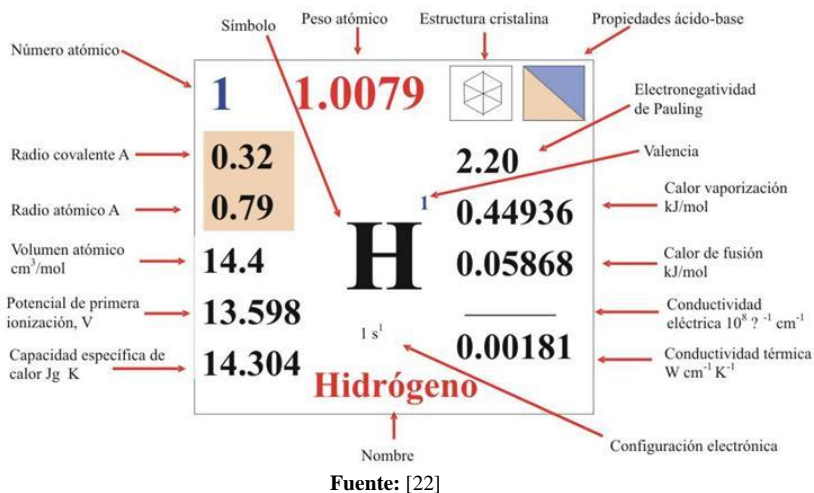
Fuente: [23]

2.5.2 Hidrógeno (H)

El Hidrógeno se lo encuentra de forma natural combinado con otros elementos como por ejemplo, el agua que existe en abundancia en nuestro medio. Se lo conoce como “aire inflamable” por sus características explosivas, y debido a que

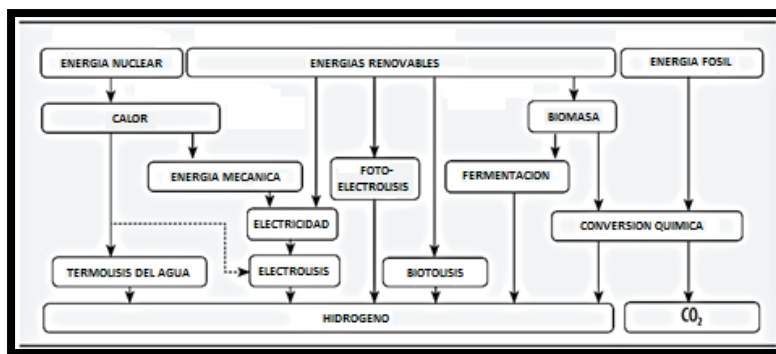
es capaz de quemar con una concentración del 4% o más en el aire. También explota por ignición automáticamente cuando llega a temperaturas de 560 °C.

Figura 9: Propiedades Atómicas del Hidrógeno



Tiene una “masa atómica de 1,00794, es el más ligero entre todos los elementos de la tabla periódica, es incoloro, inodoro, no metálico e insoluble en agua” [8].

Figura 10: Métodos de Producción de Hidrógeno



Fuente: [9]

El hidrógeno se lo obtiene mediante la aplicación de procesos químicos:

La Electrólisis

Es un proceso que consiste en la descomposición del agua a través de la utilización de la aplicación de la corriente eléctrica. Este proceso industrial tiene ventajas, pues es fácilmente adaptable ya sea para grandes o pequeñas cantidades de gas,

logrando un hidrógeno de gran pureza, de poder combinarse y relacionarse de manera óptima con las energías renovables con el fin de producir H₂. [24]. Su desventaja su alto costo y consumo energético.

El Reformado

Consiste en la reacción de los hidrocarburos con la presencia de calor y vapor de agua. Dicho método permite producir grandes cantidades de hidrógeno con un bajo costo, partiendo del gas natural, metano (CH₄) [25]. La desventaja de éste método es, que a pequeña escala no es muy rentable ni comercial. El hidrógeno producido suele contener impurezas, siendo en ciertas ocasiones necesaria la limpieza posterior, o la realización de reacciones secundarias, con el fin de intentar purificar el producto de hidrógeno. [20] Se suele relacionar fácilmente con la fijación del CO₂, o almacenamientos de carbono.

Gasificación

Se obtiene a partir de hidrocarburos pesados y la biomasa, además del hidrógeno, gases para reformado a partir de las reacciones del vapor de agua y el oxígeno. Este método es muy adecuado cuando se trata de hidrocarburos a gran escala, pudiendo ser usados el carbón, los combustibles sólidos, y líquidos. El hidrógeno obtenido por gasificación, presenta semejanzas con otros derivados sintéticos de la biomasa, produciendo competencia entre ellos. La gasificación de la biomasa es aún hoy en día objeto de estudio, y posee implicaciones y limitaciones, pues necesita grandes extensiones de terreno.

Ciclos termoquímicos

Este proceso utiliza el calor de bajo costo producido de la alta temperatura que procede de la energía nuclear o también de la energía solar concentrada. Es un proceso bastante utilizable y atractivo cuando se habla de gran escala, al tener bajo coste económico, y no emitiendo gases de carácter invernadero, puede ser usado en la industria pesada o incluso en el transporte. Existen distintos proyectos de colaboraciones internacionales para investigar y desarrollar este método. Hoy en día aún falta mayor investigación sin fines comerciales.

Producción biológica

Las bacterias, y las algas, producen hidrógeno de manera natural y directa, cuando se encuentran en determinadas condiciones. Este proceso durante los últimos años ha sido muy estudiado debido a su gran potencial, pero hay que decir que es un proceso bastante lento de obtención del hidrógeno, además se necesitan grandes superficies, sin mencionar que la gran mayoría de los organismos apropiados para éste método, no se han encontrado todavía, aunque es un proceso en pleno estudio y desarrollo.

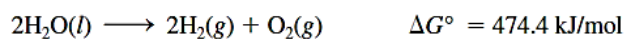
2.6 Electrólisis

Es una reacción no espontánea que consiste en separar los elementos de un compuesto utilizando la electricidad. El proceso consiste en aplicar corriente eléctrica a electrodos conectados a una fuente de alimentación eléctrica que se encuentran sumergidos en una disolución electrolítica, “En donde el polo positivo que se encuentra conectado al electrodo, es el ánodo y el opuesto se lo conoce como cátodo”. [26]

“Los iones negativos son atraídos al electrodo positivo (ánodo), teniendo en cuenta que cada electrodo atrae a iones de carga opuesta” [27]. Por lo tanto, los iones positivos son atraídos y se desplazan al electrodo negativo (cátodo). Todo este proceso se lo conoce como una reacción de oxidación-reducción.

El agua (H_2O), por medio de la electrólisis, se puede dissociar en sus elementos de hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). “Se utiliza la energía eléctrica para inducir una reacción química no espontánea.” [28]. Dicho proceso se lo realiza con un dispositivo el cual es conocido como celda electrolítica.

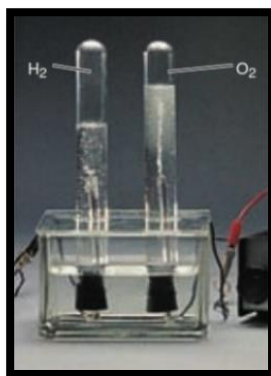
El agua pura no es conductor eléctrico, pero por su composición de electrolitos, sales minerales, iones, ácidos, se vuelve una sustancia conductora. La electrólisis del agua se debe tener en cuenta que el agua pura no tiene suficientes iones para que pueden ser conductores de una buena cantidad de corriente eléctrica, que el agua pura a $25^\circ C$ solo tiene $1 \times 10^{-7} M$ de iones H^+ y $1 \times 10^{-7} M$ de iones OH^-). Teniendo una disolución de H_2SO_4 $0.1 M$ tiene una reacción rápida debido a que tiene una gran cantidad de iones Cationes H^+ , aniones (SO_4^-) que al disociarse actúan como conductor eléctrico, inmediatamente comienzan a aparecer burbujas de gas hidrógeno en los electrodos, “La electrólisis de una mol de agua, produce una mol de gas hidrógeno y media mol de gas oxígeno en sus formas normales diatómicas” [29].



Ecuación 3: Electrolisis del Agua

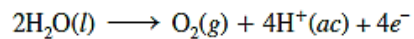
Fuente: [28]

Figura 11: Electrólisis del Agua



Fuente: [28]

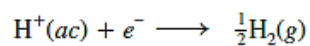
El proceso que se lleva a cabo en el ánodo es:



Ecuación 4: Proceso en el Ánodo

Fuente: [28]

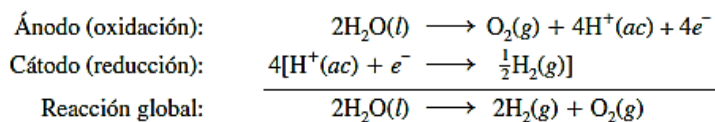
Mientras tanto que en el cátodo obtenemos:



Ecuación 5: Proceso en el Cátodo

Fuente: [28]

Por lo tanto, la reacción de electrólisis, que encierra al ánodo y al cátodo está dada por:



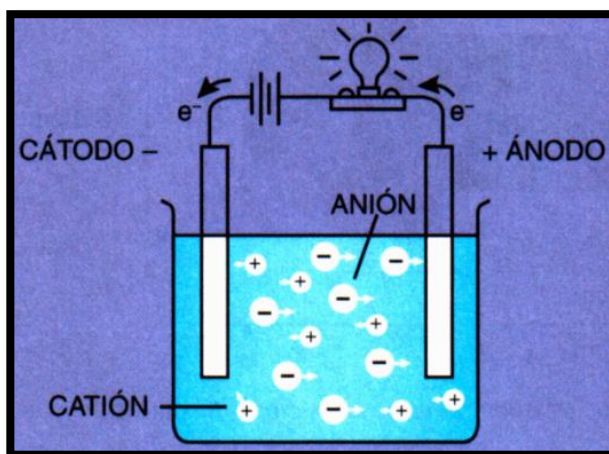
Ecuación 6 Reacción del Ánodo y el Cátodo

Fuente: [28]

2.7 Electrolitos

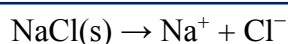
Un electrolito es cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que se comporte como un conductor eléctrico. Debido a que generalmente se encuentran iones en una solución, los electrolitos también son conocidos como soluciones iónicas, pero también son posibles electrolitos fundidos y los electrolitos sólidos.

Figura 12: Electrolito



Fuente: [30]

Comúnmente, los electrolitos existen como disoluciones de ácidos, bases o sales. Más aún, algunos gases pueden comportarse como electrolitos bajo condiciones de alta temperatura o baja presión. Las soluciones de electrolitos pueden resultar de la disolución de algunos polímeros biológicos (por ejemplo, ADN, polipéptidos) o sintéticos (por ejemplo, poliestirensulfonato, en cuyo caso se denominan polielectrolito) y contienen múltiples centros cargados. Las soluciones de electrolitos se forman normalmente cuando una sal se coloca en un solvente tal como el agua, y los componentes individuales se disocian debido a las interacciones entre las moléculas del solvente y el soluto, en un proceso denominado solvatación. Por ejemplo, cuando la sal común, NaCl se coloca en agua, sucede la siguiente reacción:



Ecuación 7 Sal Común

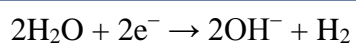
Fuente: [31]

También es posible que las sustancias reaccionen con el agua cuando se le agrega a ella, produciendo iones. Por ejemplo, el dióxido de carbono reacciona con agua para producir una solución que contiene iones hidronio, bicarbonato y carbonato. En términos simples, el electrolito es un material que se disuelve completa o parcialmente en agua para producir una solución que conduce una corriente eléctrica.

Las sales fundidas también pueden ser electrolitos. Por ejemplo, cuando el cloruro de sodio se funde a (801°C), el líquido conduce la electricidad. Si un electrolito en solución posee una alta proporción del soluto se disocia para formar iones libres, se dice que el electrolito es fuerte; si la mayoría del soluto no se disocia, el electrolito es débil. Las propiedades de los electrolitos pueden ser explotadas usando la electrólisis para extraer los elementos químicos constituyentes.

Cuando se coloca un electrodo en un electrolito y se aplica un voltaje, el electrolito conducirá electricidad. Los electrones solos normalmente no pueden pasar a través del electrolito; en vez de ello, una reacción química sucede en el cátodo, consumiendo los electrones del cátodo, y otra reacción ocurre en el ánodo, produciendo electrones para ser capturados por el ánodo. Como resultado, una nube de carga negativa se desarrolla en el electrolito alrededor del cátodo, y una carga positiva se desarrolla alrededor del ánodo. Los iones en el electrolito se mueven para neutralizar estas cargas para que las reacciones puedan continuar y los electrones puedan seguir fluyendo.

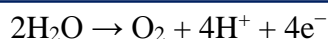
Por ejemplo, en una solución de sal ordinaria (cloruro de sodio, NaCl) en agua, la reacción en el cátodo será:



Ecuación 8: Reacción del Cátodo

Fuente: [31]

Y la reacción en el ánodo es:



Ecuación 9: Reacción del Ánodo

Fuente: [31]

Los iones sodio Na^+ positivamente cargados reaccionarán hacia el cátodo, neutralizando la carga negativa del OH^- ahí presente, y los iones cloruro Cl^-

reaccionarán hacia el ánodo neutralizando la carga positiva del H^+ de ahí. Sin los iones provenientes del electrolito, las cargas alrededor de los electrodos harían más lento el flujo continuo de electrones; la difusión de H^+ y OH^- a través del agua hacia el otro electrodo llevaría más tiempo que el movimiento de los iones de sodio más prevalentes.

En otros sistemas, las reacciones de los electrodos pueden involucrar a los metales de los electrodos, así como a los iones del electrolito. Los conductores electrolíticos pueden ser utilizados en dispositivos electrónicos donde la reacción química en la interface metal/electrolito produce efectos útiles.

2.8 La Conductividad (K)

La Conductividad (K), es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transmitir una corriente eléctrica y es igual al recíproco de la resistividad de la solución.

Dicha capacidad depende de la presencia de iones; de su concentración, movilidad, valencia, y de la temperatura ambiental. Las soluciones de la mayoría de los compuestos inorgánicos (ej. aniones de cloruro, nitrato, sulfato y fosfato) son relativamente buenos conductores. Por el contrario, moléculas de compuestos orgánicos que no se disocian en soluciones acuosas (ej. aceites, fenoles, alcoholes y azúcares) son pobres conductores de corriente eléctrica. La conductancia (G), recíproco de resistencia (R) de una solución se mide utilizando dos electrodos químicamente inertes y fijos espacialmente. La conductancia de una solución es directamente proporcional al área superficial del electrodo A, (cm^2), e inversamente proporcional a distancia entre los electrodos L, (cm).

$$G = k \frac{A}{L}$$

Ecuación 10: Conductancia

Fuente: [28]

La constante de proporcionalidad, k (conductividad) es una propiedad característica de la solución localizada entre dos electrodos.

Las unidades de k son $1/\text{ohm}\cdot\text{cm}$ ó mho/cm . La conductividad se reporta generalmente en micromhos/cm ($\mu\text{mho}/\text{cm}$). En el Sistema Internacional de Unidades (SI), el recíproco del ohm es el siemens (S) y la conductividad, se reportan en milisiemens/metro (mS/m).

Se utilizan las siguientes expresiones de conversión para cambiar de un sistema de medidas al otro:

$$1 \text{ mS/m} = 10 \mu\text{mhos/cm}$$

$$1 \mu\text{S/cm} = 1 \mu\text{mhos/cm}$$

$$0.1 \text{ mS/m} = 1 \mu\text{mhos/cm}$$

Para convertir $\mu\text{mhos}/\text{cm}$ a mS/m divide por 10, el agua destilada en el laboratorio tiene una conductividad en el rango de: 0.5 a $3\mu\text{mhos}/\text{cm}$, cuando se mide la conductividad de una muestra de agua, ésta aumenta poco después de exponerse al aire y luego de entrar en contacto con el envase utilizado para tomar la muestra.

La conductividad puede relacionarse a:

- La pureza química del agua, (mientras más pura es el agua, menor es la concentración de electrolitos en el agua y por ende, mayor es la resistencia del medio a la transmisión de una corriente eléctrica).
- La cantidad de sólidos disueltos en una solución y a la eficiencia de procesos de tratamiento de agua.
- La concentración de sales en una salmuera o salar.
- La concentración de sólidos disueltos (mg/L), multiplicando la conductividad ($\mu\text{homs}/\text{cm}$) por un factor empírico.

La Conductividad del agua potable en los Estados Unidos oscila entre 50 y 1500 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$. La conductividad de aguas usadas de origen doméstico puede tener valores muy cerca a los valores que presentan las fuentes de aguas locales. No obstante, algunas descargas industriales tienen valores de conductividad alrededor de 10,000 μmhos . La determinación de la conductividad se realiza midiendo la resistencia eléctrica en un área de la solución definida por el diseño de la sonda ("probe"). Se aplica un voltaje entre los dos electrodos que integran la sonda y que están inmersos

en la solución. La caída en voltaje causada por la resistencia de la solución es utilizada para calcular la conductividad por centímetro. El flujo de electrones entre los electrodos en una solución de electrolitos varía con la temperatura de la solución. A mayor temperatura mayor es el flujo entre los electrodos y viceversa. Se ha sugerido el uso de un factor de compensación de 0.2 (2%) por cada aumento en temperatura de un 1°C. [32]

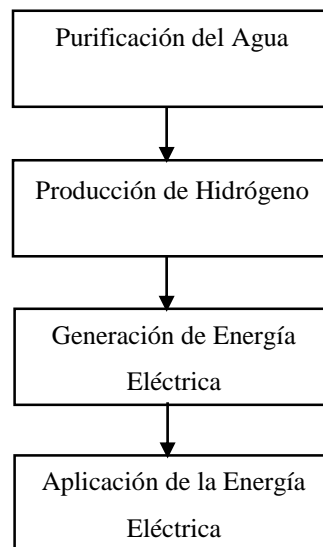
CAPÍTULO 3

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 El Diseño

Para el diseño de la Micro Central se efectuó el análisis documental para la selección de procesos, los equipos y las características más óptimas a ser utilizadas. Para lo cual se planteó un diagrama de procesos que esquematiza las etapas principales de la Micro Central para su construcción. Véase en Figura 13.

Figura 13 Diagrama de Procesos de la Micro Central



Fuente: Los Autores

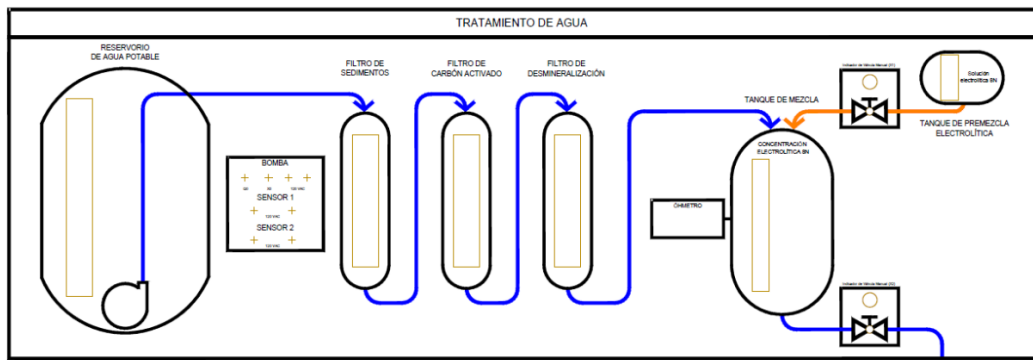
Tal como lo indica la Figura 12 el diseño de la Micro Central, consta de cuatro etapas básicas las cuales son descritas a continuación:

3.1.1 Purificación del agua

El objetivo de este sistema de filtrado es reducir el material particulado, sedimentos, iones y minerales que se encuentran inmersos en el agua, los cuales causarán interacciones químicas y bajas conductividades al preparar la solución electrolítica conductora.

La secuencia del funcionamiento de la Micro Central, se detalla el sistema del tratamiento del agua como se lo muestra en la Figura 14.

Figura 14: Sistema de Tratamiento de Agua



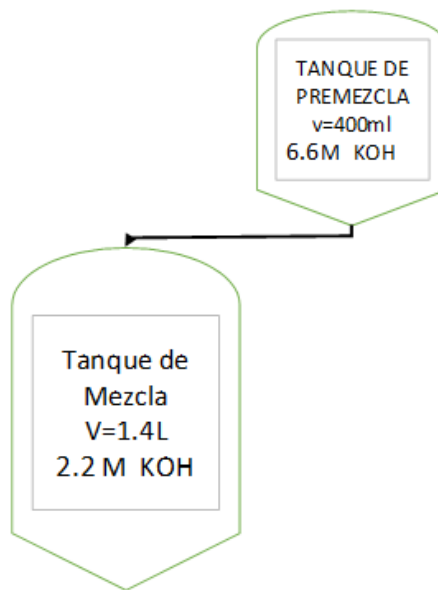
Fuente: Los Autores

El proceso empieza en el tanque de reservorio de agua, con capacidad volumétrica de 8 litros, contiene una bomba sumergible impulsando el agua a través de los filtros hasta llegar al tanque de mezcla. Esta bomba tiene una capacidad de 30W y alimentada a 120 Vac.

Los filtros por los cuales el agua debe pasar, son de cartuchos descartables y están colocados en este orden: sedimentos, carbón activado y desmineralización, para poder purificar y reducir los minerales que el agua presenta antes de llegar al tanque de mezcla. Este último se llena hasta alcanzar un volumen máximo de 1 litro, para conjugarse con una solución electrolítica concentrada, la cual ha sido previamente mezclada en el tanque de pre-mezcla a una concentración de 6,6 molar, en las proporciones de mezcla son 180 g de KOH y 400 ml de agua destilada, alcanzando una concentración final de 2,2M en el tanque de mezcla electrolítica. El fabricante del generador de hidrógeno, recomienda estas concentraciones de mezcla para la preparación de la sustancia electrolítica y la cantidad de agua complementaria, para lograr el óptimo funcionamiento del generador y producción gas hidrógeno (H₂). [33]

El tanque de pre-mezcla electrolítica, tiene una capacidad de 500 ml, su función es almacenar 400 ml de agua (H₂O) y 180 g de KOH alcanzando una concentración de 6,6M; esta solución es vertida en el tanque de mezcla, donde luego se completará con 1 litro de agua hasta llegar a un volumen de 1400 ml de mezcla electrolítica.

Figura 15: Tanques de Pre-Mezcla y Mezcla



Fuente: Los Autores

En la Tabla 4 podemos encontrar la descripción de cada uno de los materiales y equipos que formaron parte de la etapa de purificación de agua, así como también se detalla el dato más relevante del fabricante y la justificación para la selección de cada uno.

Tabla 4: Equipos de Purificación de Agua

| Equipo | Cantidad | Capacidad | Dimensión De Tubería | Función | Tipo | Riesgo |
|-----------------------------|----------|-----------|----------------------|---|--|-----------------------------|
| Reservorio De Agua Potable | 1 | 8000 ml | 1/2 " | Almacenar agua potable | Construida con Vidrio | Romperse los vidrios |
| Bomba | 1 | 32 w | 1/2 " | Bombear agua, Reservorio de Agua Potable hasta el tanque de Mezcla | Mini bomba sumergible | Corto circuito |
| Sensores | 1 | 15 w | N/A | Sensar los niveles de agua del Reservorio de agua potable indicados por medio de una luz piloto verde encendida | Contactores y electrodos | Corto circuito |
| Filtro De Sedimentos | 1 | 1000 ml | 1/2 " | Actuar como pantalla para remover solo partículas de sedimentos | Compuesto por un cartucho de polipropileno o algodón | No representa ningún riesgo |
| Filtro De Carbón Activado | 1 | 1000 ml | 1/2 " | Capacidad de absorción de impurezas del agua | Compuesto por un cartucho de carbón activo altamente cristalino | No representa ningún riesgo |
| Filtro De Desmineralización | 1 | 1000 ml | 1/2 " | Elimina los sólidos disueltos en el agua | Compuesto por un cartucho de resina mixta para la desmineralización del agua | No representa ningún riesgo |

Fuente: Los Autores

3.1.2 Producción de Hidrógeno

El objetivo de esta etapa es aplicar el método de electrólisis para separar la molécula de agua en sus elementos constituyentes, utilizando la corriente eléctrica aplicada a electrodos conectados a una fuente de alimentación eléctrica, que se encuentran sumergidos en la disolución electrolítica antes preparada.

Este compuesto electrolítico que está en el tanque de mezcla, ingresa al generador de hidrógeno, cuando se apertura la válvula de paso, valvula2, que se encuentra antes del generador, dejando caer por gravedad toda la solución

electrolítica al tanque del generador, a partir de este punto se enciende el generador y empieza la producción del hidrógeno.

Según datos del fabricante, el generador de hidrógeno tiene una capacidad volumétrica máxima de producción de 300ml/min H₂ con una pureza del 99.99%, y presión de salida de 0.4MPa [33]. Ver tabla 5.

Figura 16: Generador de Hidrógeno



Fuente: Los Autores

El generador es capaz de funcionar en diferentes condiciones climáticas de temperaturas entre 0 – 40°C y una humedad menor al 85 %. Los parámetros más importantes a ser considerados para el diseño son: el flujo, la presión de salida, la temperatura de trabajo, seleccionando finalmente el modelo HYH-300, este modelo ajusta las necesidades técnicas de la Celda de Combustible seleccionada.

Tabla 5: Especificaciones Técnicas del Generador de Hidrógeno

| MODELO | HYH-300 |
|------------------------|--|
| Pureza del Hidrógeno | 99.9% (contenido relativo de O) |
| 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 |

Fuente: [33]

En la Tabla 6 se encontrará la descripción de cada uno de los materiales y equipos que formaran parte de la Etapa de Producción de Hidrógeno, así como también se detalla el dato más relevante del fabricante y la justificación para la selección de cada uno.

3.1.3 Generación de Energía Eléctrica

El objetivo de esta etapa es generar energía eléctrica mediante la producción del H₂. Para continuar con esta etapa es necesario considerar las características técnicas de la Celda de Combustible tipo PEM, descrita en la Tabla 7.

La energía generada por la celda de combustible tipo PEM es en Corriente Directa (DC).

Tabla 6: Equipos de la Producción de Hidrógeno

| Equipo / Material | Capacidad | Cantidad | Dimensión de tubería | Función | Tipo | Riesgos |
|-------------------------------|------------|------------------|----------------------|---|--|--|
| Tanque de Pre mezcla | 500 ml | 400 ml | 1/2" | Contener la solución de 400 ml de agua destilada y 180 g de KOH para mezcla a través de la apertura de la válvula X1 | Construido de vidrio | Romperse los vidrios, debido a su concentración de KOH, puede ocasionar daños permanentes, incluso la muerte |
| Agua destilada | N/A | 400 ml | 1/2" | Agua libre de iones e impurezas mediante destilación | Agua destilada | No representa ningún riesgo |
| KOH | N/A | 180 g | N/A | Su disolución en agua es altamente exotérmica, hacen solución adecuada para la producción de gas hidrógeno con una pureza del 99,999% | Compuesto químico inorgánico de color blanco | Es peligroso, puede causar daños permanentes, incluso la muerte |
| Tanque de mezcla | 3000 ml | 1400 ml | 1/2" | Almacenar 1400 ml de agua y 180 g de KOH para ser vertidos en el generador de hidrógeno | Construido de vidrio | Romperse los vidrios, debido a su concentración de KOH, puede ocasionar daños permanentes, incluso la muerte |
| Agua purificada | N/A | 1000 ml | 1/2" | El resultado de pasar por los 3 filtros de purificación, que llega al tanque de mezcla | Agua pura | No representa ningún riesgo |
| Óhmetro | 2000 k ohm | 850 - 1200 k ohm | N/A | Medir los ohmios del tanque de mezcla | Multímetro digital | No representa ningún riesgo |
| Tanque generador de hidrógeno | 1600 ml | 1400 ml | 3mm | Genera hidrógeno mediante la electrólisis a un flujo de 300 ml/min con una pureza del 99,999% | Electrodos de acero inoxidable | La fuga del gas puede inflamarse espontáneamente solo con el 4% del mismo |

Fuente: Los Autores

Tabla 7: Especificaciones Técnicas de la Pila tipo PEM [34]

| | |
|---|--|
| 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 H₂ | 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 temperatura | 65 °C |
| Fuente de alimentación externa** | 13 V(±1V), 5A |

* El caudal puede cambiar con la potencia de salida

** La electrónica del sistema necesita fuente de alimentación externa

Fuente: [34]

De acuerdo en lo indicado en la Etapa de Generación de Hidrógeno, la salida del flujo de H₂, será regulado por una válvula manual, válvula 3 para controlar la sobre presión. En esta etapa la pila necesita un flujo de gas hidrógeno de 1,3L/min de acuerdo al dato de placa del fabricante.

En el proyecto se colocó un generador de 300 ml/min el cual representa más del 40% del flujo de H₂ requerido en la celda de combustible, ésta se ve afectada cuando se comienza a colocar cargas que superen el 20% de la producción de energía, para compensar esto se debe colocar en paralelo la batería de 12VDC; como la celda de combustible genera 18 VDC sin carga, es importante conectar una resistencia fija a la salida del mismo, que regule el voltaje a 12 VDC y no se produzca un sobre voltaje.

En la Tabla 8 se encuentra la descripción de cada uno de los materiales y equipos que formaran parte de la etapa generación de energía eléctrica, así como también se detalla el dato más relevante del fabricante y la justificación para la selección de cada uno.

Tabla 8: Generación de Energía Eléctrica.

| Equipo / Material | Capacidad | Cant. | Dimensión De Tubería | Función | Tipo | Riesgos |
|--------------------------------|-------------------|-------|----------------------|---|--------------------------------------|---|
| Celda de Combustible | 100 W | 1 | 3mm | Genera energía eléctrica, produciendo una reacción química en la cual se liberar electrones | Membrana intercambiadora de protones | Electrocutarse, Fuga de gas hidrógeno, puede inflamarse |
| Batería | 4Ah | 1 | N/A | Ayudar al sistema de generación de la pila de combustible | Batería convencional | Electrocutarse, cortocircuito |
| Inversor | 12Vdc / 120 Vac | 1 | N/A | Convertir de 12Vdc a 120Vac | Inversor y transformador | Electrocutarse, cortocircuito |
| Medidores de energía eléctrica | 150 Vdc - 150 Vac | 4 | N/A | Medir la energía eléctrica, por cada sección destinada | Medidor analógico y digital | Electrocutarse, cortocircuito |

Fuente: Los Autores

3.1.4 Aplicación de la Energía Eléctrica

El objetivo de esta etapa es consumir la energía eléctrica generada por la celda tipo PEM, esta etapa se encuentra dividida en dos secciones: Barra de AC y Barra de DC.

Finalizada la etapa de Generación de la Energía Eléctrica, la celda produce energía en DC, según el fabricante debe producir 100 W, se procede a conectar la batería de 4Ah al inversor, el cual convertirá los 12 VDC a 120 VAC y se podrá conectar cargas inferiores a 0,6 A, tales como focos, cargadores de

celulares en la barra de alimentación en AC, etc. Los valores de voltaje y corriente producidos por el inversor se mostrarán en el medidor digital que se encuentra en dicha sección de la micro central.

La batería de 4Ah sirve como respaldo, también ayuda a proteger a la celda cualquier exceso de carga que se llegue a conectar.

Cabe destacar que se colocó una sección de 5 VDC para cargar teléfonos celulares, en la Figura 17 se muestra la sección de la barra de alimentación del módulo.

Figura 17: Barra de Alimentación



Fuente: Los Autores

En la Tabla 9 podemos encontrar la descripción de cada uno de los materiales y equipos que formaran parte de la etapa aplicación de la energía eléctrica, así como también se detalla el dato más relevante del fabricante y la justificación para la selección de cada uno.

Tabla 9: Equipos de la Aplicación de la Energía Eléctrica.

| Equipo / Material | Capacidad | Cantidad | Función | Selección | Riesgos | Resultado |
|--------------------------|-----------|------------|---|---|---|--|
| Barra de alimentación DC | 12 VDC | 3 borneras | Conectar cargas de 12 VDC de 0 - 6 A | Es práctico y conveniente para el sistema | Cortocircuito y electrocutarse | En las pruebas realizadas se obtuvieron resultados positivos |
| Barra de alimentación AC | 120 VAC | 3 borneras | Alimentar cargas de 120 VAC hasta 0,6 A | Es practico y conveniente para el sistema | Cortocircuito y electrocutarse | En las pruebas realizadas se obtuvieron resultados positivos |
| Toma corriente | 120 VAC | 1 unidad | Alimentar cargas de 120 VAC hasta 0,6 A | Por ser convencional, el frecuente y fácil de conectar con casi cualquier tipo de carga | Cortocircuito y electrocutarse | En las pruebas realizadas se obtuvieron resultados positivos |
| USB | 5 VDC | 4 unidades | Conectar cargas de 5 VDC, como, por ejemplo: cargas un teléfono celular | Es el más adecuado para cumplir con ese tipo de funciones | Cortocircuito y electrocutarse | En las pruebas realizadas se obtuvieron resultados positivos |
| Resistencia variable | 0 - 8 Amp | 1 unidad | Comprobar el correcto funcionamiento de la micro central colocando cargas que pongan a prueba su funcionamiento , para determinar su eficiencia | Se eligió una resistencia variable como carga colocándola a la salida de la pila de combustible para comprobar el rendimiento de la celda | Riesgo de fuga de gas hidrógeno, electrocutarse y cortocircuito | Obteniendo como resultado una eficiencia del 93% |

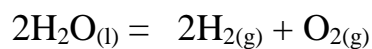
Fuente: Los Autores

3.1.5 Cálculos Estequiométricos de la Micro Central

Cálculos de la Producción de Hidrógeno y Oxígeno

Cálculo de la producción de hidrógeno gaseoso y oxígeno gaseoso producido en el generador de hidrógeno mediante el procedo de la electrólisis del agua.

Empleando la ecuación global del electrólisis del agua.



Ecuación 11: Ecuación Global de la Electrólisis del Agua

Fuente: [28]

Cálculos Estequiométricos:

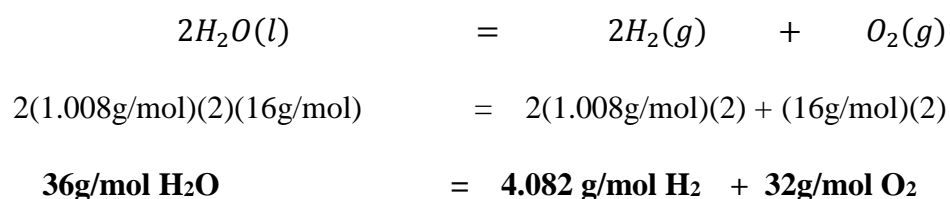
Datos:

Volumen de Agua= 1400cm³

Densidad del Agua= 1g/cm³

Masa del O= 16g/mol

Masa del H= 1.008g/mol



Producción de hidrógeno

$$1400g H_2O \times \frac{4.032 \frac{g}{mol} H_2}{36 \frac{g}{mol} H_2O} = 156.8 g H_2 = 0.1568Kg H_2$$

Ecuación 12: Ecuación de la Producción de Hidrógeno

Conversión de masa a volumen

Aplicando Ley de los gases ideales PV=NRT

Presión (P) =1 atm

Volumen (V)= ? (L)

Número de moles (N)= 156.8g H₂ x (1mol/2g H₂) = 78.4 moles H₂

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

Temperatura absoluta (T)= 25°C +273 K= 298K

$$Volumen (L) = \frac{78.4mol H_2 \times 0.082 \frac{atm \times L}{mol \times K} \times (25^\circ C + 273K)}{1 atm} = 1915.8L = 1.9m^3 H_2$$

Ecuación 13: Ecuación de Conversión de Masa a Volumen del Hidrógeno

Producción de oxígeno

$$1400g H_2O \times \frac{32 \frac{g}{mol} O_2}{36 \frac{g}{mol} H_2O} = 1244.44 g O_2 = 1.244Kg O_2$$

Ecuación 14: Ecuación de la Producción de Oxígeno

Conversión de masa a volumen

Aplicando Ley de los gases ideales PV=NRT

Presión (P) =1 atm

Volumen (V)= ? (L)

Número de moles (N)= 1244.4g O₂ x (1mol/32g O₂) = 38.89 moles O₂

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

Temperatura absoluta (T)= 25°C +273 K= 298K

$$Volumen (L) = \frac{38.89mol O_2 \times 0.082 \frac{atm \times L}{mol \times K} \times (25^\circ C + 273K)}{1 atm} = 950.31L = 0.95m^3 O_2$$

Ecuación 15: Ecuación de Conversión de Masa a Volumen del Oxígeno

Resultados: producción de hidrógeno (1.9m³) es el doble que la producción de oxígeno (0.95m³).

Cálculo de flujo de hidrógeno

Aplicando la Ley de Boyle a Temperatura constante

$$P1 \times V1 = P2 \times V2$$

Tabla 10: Datos del Generador de Hidrógeno

| Datos del Generador de Hidrógeno | | |
|----------------------------------|---------|--------|
| Unidades de medida | Entrada | Salida |
| Presión (Mpa) | 0,4 | *0,05 |
| Flujo Volumétrico (ml/min) | 350 | |

*Presión media obtenida de datos experimentales, ver Tabla17

Fuente: Los Autores

$$\text{Flujo volumetrico de entrada de Pila PEM} = \frac{0.4\text{MPa} \times 350 \text{ ml/min}}{0.05\text{MPa}} = 2800\text{ml/ min } H_2$$

Ecuación 16: Ecuación de Flujo Volumétrico

Fuente: Los Autores

Cálculo de las concentraciones química de mezcla empleadas

Unidad Química de concentración Molaridad (M)

Ecuación 17: Ecuación de Concentraciones Químicas

$$\text{Molaridad (M)} = \frac{\text{Soluta (moles)}}{\text{Solución (L)}}$$

Fuente: [28]

Datos:

Masa del Soluta: 180 g KOH

Masa Molar KOH: 56.1056 g/mol

Volumen del Solvente: 400 ml H₂O

Densidad del KOH: 2.12g/ml

Moles de soluto

Ecuación 18: Ecuación de Moles de Soluta

$$\text{Moles KOH} = 180\text{g KOH} \times \frac{1 \text{ mol KOH}}{56.1056 \text{ g KOH}} = 3.21 \text{ moles de KOH}$$

Fuente: Los Autores

Volumen de la solución

Ecuación 19: Ecuación de Volumen de la Solución

$$\text{Volumen del Soluta (L)} = \frac{\text{masa (g)}}{\text{densidad } \left(\frac{\text{g}}{\text{ml}}\right)} = \frac{180 \text{ g KOH}}{2.12 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = 84.90 \text{ ml KOH}$$

Ecuación 20: Ecuación de la Solución

$$\text{Soluta (L)} + \text{Solvente (L)} = \text{Solución}$$
$$84.90 \text{ ml KOH} + 400 \text{ ml H}_2\text{O} = 484.9 \text{ ml} = \mathbf{0.485 \text{ L Solución KOH}}$$

Concentración del tanque de pre-mezcla

Ecuación 21: Ecuación de Concentración del Tanque de Pre-Mezcla

$$\text{Molaridad (M)} = \frac{3.21 \text{ Moles de KOH}}{0.485 \text{ L}} = 6.6 \text{ M de KOH}$$

Concentración del tanque de mezcla electrolítica

Ecuación 22: Ecuación de Concentración del Tanque de Mezcla Electrolítica

$$\text{Molaridad (M)} = \frac{3.21 \text{ Moles de KOH}}{1.485 \text{ L}} = 2.2 \text{ M de KOH}$$

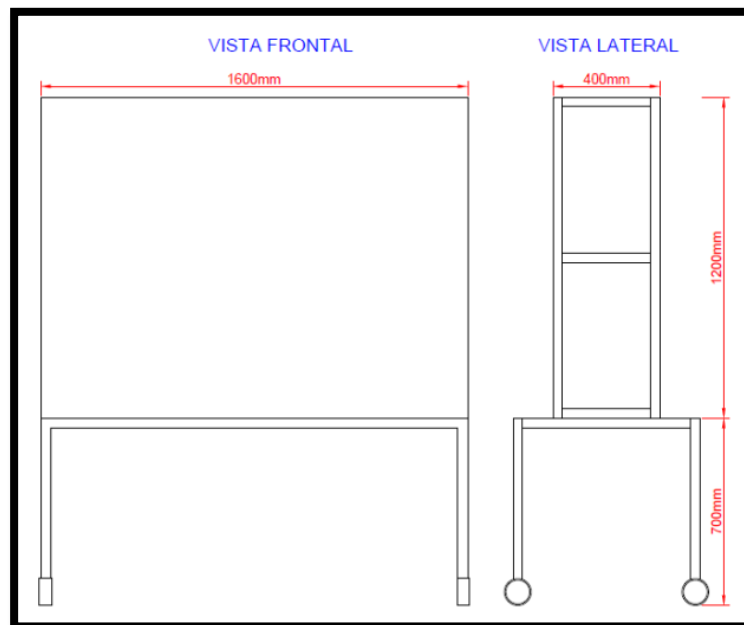
3.2 Implementación

3.2.1 Estructura

La construcción del tablero de la Micro Central de Reacción Química, está basada en el modelo estándar sugerido por la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil (UPSG).

Para el diseño del tablero se consideraron las medidas reales de los equipos y materiales eléctricos, con estos datos se elaboraron los planos en el software AutoCAD® que simularon las etapas de la Micro Central. En la Figura 18 se muestra la vista frontal y vista lateral de las medidas del tablero.

Figura 18: Diseño de la Estructura del Tablero



Fuente: Los Autores

Para la elaboración del marco del tablero se realizó trabajo mecánico, una vez definido el plano con sus medidas exactas y con la lista de materiales seleccionados, se procede a marcar y cortar tanto la tubería como la plancha de acero; se realiza el ensamblaje de la tubería mediante el proceso de soldadura; donde finalmente se pinta la estructura metálica que forma el marco del tablero que representa la micro central.

Entre las herramientas y equipos utilizados se pueden mencionar los siguientes:

Tabla 11: Herramientas y Equipos Utilizados en la Implementación Estructura.

| Herramientas y Equipos Utilizados | | | |
|--|--------------------------------|-----------------|---------------|
| Ítem | Descripción | Cantidad | Unidad |
| 1 | Reglas | 3 | Unidades |
| 2 | Escuadras | 3 | Unidades |
| 3 | Calibre o pie de rey | 2 | Unidades |
| 4 | Arco de sierra | 4 | Unidades |
| 5 | Grupo eléctrico de soldadura | 1 | Unidad |
| 6 | Martillo | 2 | Unidades |
| 7 | Taladra | 2 | Unidades |
| 8 | Amoladora | 1 | Unidad |
| 9 | Cizalla | 1 | Unidad |
| 10 | Destornilladores | 6 | Unidades |
| 11 | Roscado, brocas | 1 | Global |
| 12 | Tonillos | 24 | Unidades |
| 13 | Pernos, tuercas, anillos plano | 52 | Unidades |
| 14 | Compresor | 1 | Global |

Fuente: Los Autores

En la Figura 19, se puede observar que se utilizaron tubos cuadrado de acero negro de 1" ½, se realizaron cortes a las medidas de 160 cm x 120 cm, en el rectángulo donde se coloca la plancha que tiene las mismas medidas, para soldar los tubos se utilizó una soldadora industrial con palos de soldadura número 6011.

Figura 19: Construcción de la Estructura



Fuente: Los Autores

Para el diseño de la lámina de la estructura del tablero también se elaboró un diseño en tamaño real utilizando el programa AutoCAD®, el cual fue impreso en un vinil transparente de las mismas dimensiones de la plancha y se utilizó para ser colocado como lamina frontal, donde se efectuaron las conexiones eléctricas e identificaron los equipos que se muestran para la simulación.

La estructura de la Micro Central de Reacción Química muestra las siguientes partes:

1. Tratamiento de agua
2. Generador de hidrógeno
3. Generación de energía eléctrica de 100W
4. Barra de alimentación
5. Inversor
6. Batería back up
7. Energía eléctrica para sistemas auxiliares

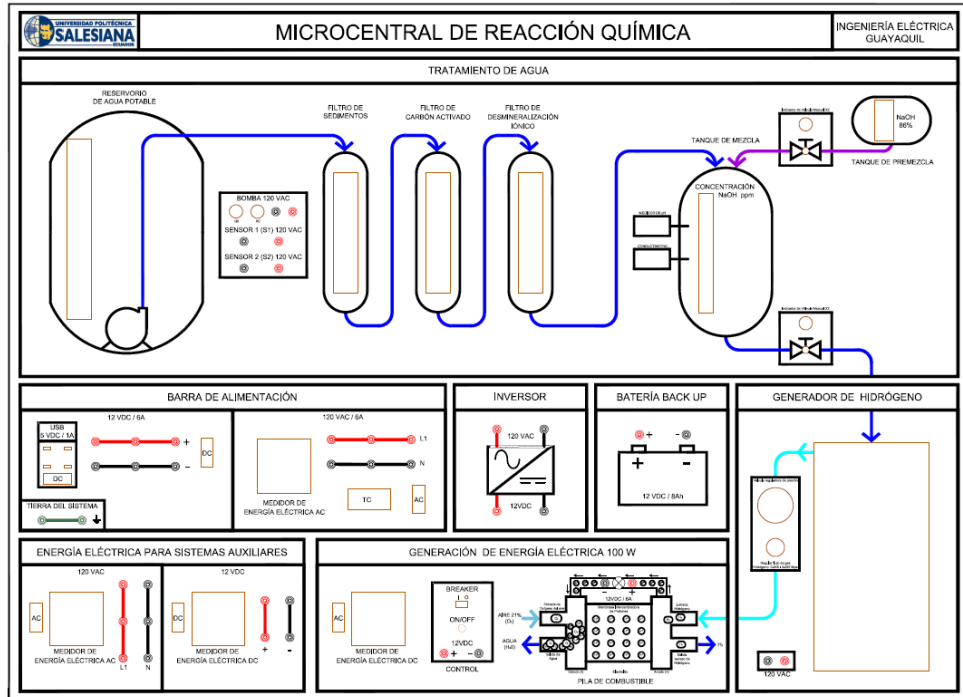
En la Figura 19, podemos observar el diseño de la lámina frontal de la Micro Central de Reacción Química, que será instalada en el tablero.

Una vez que se aprobó el diseño final, se procedió a la impresión del vinil transparente (Figura 20) para colocarlo en el tablero y de esta manera realizar la perforación del mismo para la colocación de los equipos.

3.2.2 Montaje del Tablero

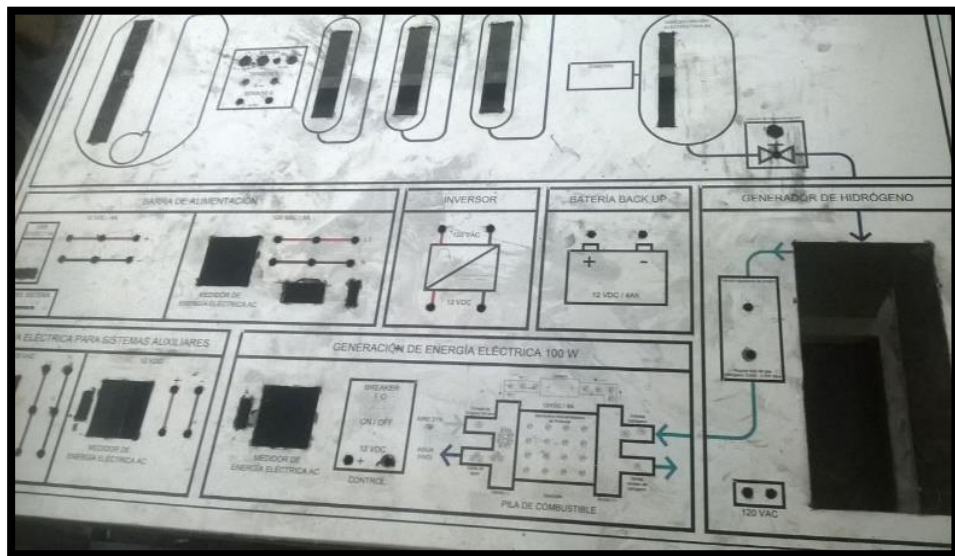
Para realizar el montaje de la plancha de acero de 3mm sobre el marco de la estructura del tablero, primero se sueldan ambas estructuras; luego se realizó una impresión del diseño de la lámina frontal en vinil para colocarlo sobre la plancha de acero, la cual servirá como guía para realizar las perforaciones que delimitarán el montaje de los equipos y las conexiones eléctricas. En la Figura 22 podemos observar el proceso de la colocación del vinil y la perforación de la plancha, así como también la toma real de la plancha de acero con sus perforaciones. Cabe resaltar que una vez terminado este proceso se procedió a pintar el tablero con pintura Rall código 1610, como se puede ver en la Figura 23.

Figura 20: Diseño de la lámina frontal



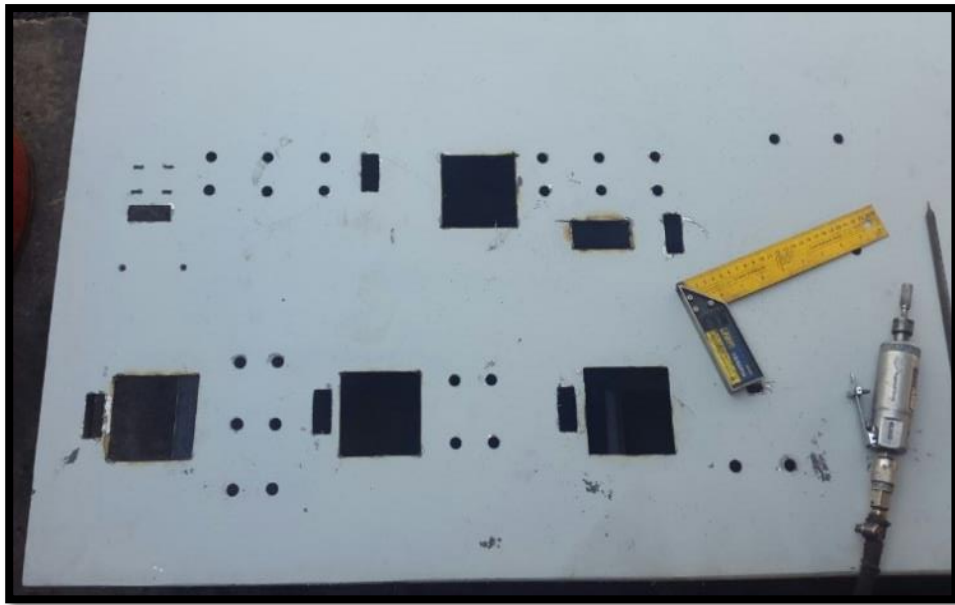
Fuente: Los Autores

Figura 21: Colocación de vinil y perforación de la placa



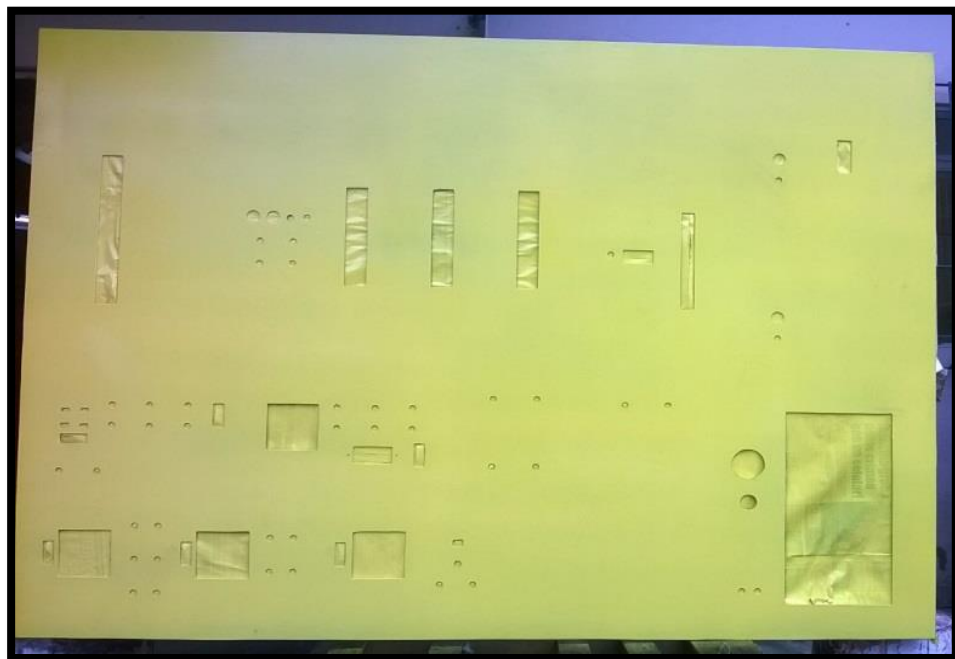
Fuente: Los Autores

Figura 22: Verificación de las perforaciones



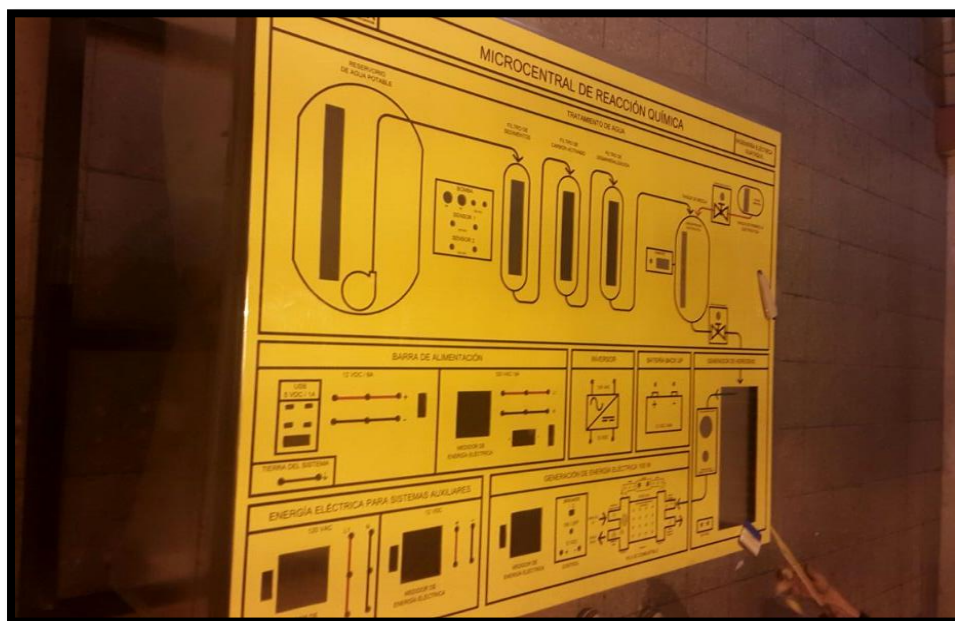
Fuente: Los Autores

Figura 23: Pintado de la Plancha



Fuente: Los Autores

Figura 24: Colocación del Vinil



Fuente: Los Autores

Finalmente, en la Figura 24 se puede observar que se instaló el vinil aprobado de la Micro Central.

3.2.3 Equipos y Materiales

En la Tabla 12 se describe los equipos y materiales a colocarse en la Micro Central definiendo cada una de sus cantidades.

Se detallan las especificaciones técnicas de los equipos más relevantes de este proyecto:

La celda de combustible tipo PEM de 100 w de potencia instalada fue adquirida en los Estados de Unidos de Norteamérica, tuvo un costo aproximado de \$1.300,00 dólares y el proceso de envío duró aproximadamente 5 meses. Los datos de placa del fabricante se detallaron en la Tabla 8 descrita en el Capítulo 3, inciso 3.13, en la Figura 25, podemos ver el modelo de la Pila H-100 y la serie FCS-C100, la cual fue importada de la empresa Horizon Fuel Cell Technologies ubicada en Estados Unidos.

Tabla 12: Lista de Equipos que Conforman el Modulo

| Ítem | Descripción de los equipos a colocarse en el Micro Central | Cantidad |
|-------------|---|-----------------|
| 1 | Reservorio de agua de 10 litros | 1 |
| 2 | Reservorio de agua de 3 litros | 1 |
| 3 | Reservorio de agua de 0,5 litros | 1 |
| 4 | Luz piloto verde | 3 |
| 5 | Selector de dos vías | 1 |
| 6 | Borneras jack banana | 50 |
| 7 | Filtro de sedimentos | 1 |
| 8 | Filtro de carbón activado | 1 |
| 9 | Filtro de desmineralización | 1 |
| 10 | Óhmetro | 1 |
| 11 | Válvulas | 2 |
| 12 | Generador de hidrógeno | 1 |
| 13 | Válvula reguladora (manual) | 1 |
| 14 | Batería 4 ah | 1 |
| 15 | Inversor 12 vdc - 120 vac | 1 |
| 16 | Pila de combustible tipo PEM | 1 |
| 17 | Control de pila | 1 |
| 18 | Medidor de energía digital | 1 |
| 19 | Medidor de energía analógico | 3 |
| 20 | Toma corriente 120 vac | 1 |
| 21 | Breaker | 6 |
| 22 | Usb | 4 |
| 23 | Inversor de 120 vac - 12 vdc | 1 |
| 24 | Transformador de corriente (medición) | 1 |
| 25 | Bomba sumergible para agua | 1 |

Fuente: Los Autores

Figura 25: Pila de combustible tipo PEM de 100w



Fuente: Los Autores

Para el correcto funcionamiento y protección de la pila de combustible de sobrepresiones y sobre corrientes, el equipo trae consigo un controlador (Figura 26), que se encarga de controlar la electroválvula para evitar sobre presiones del gas hidrógeno que vienen desde el generador de hidrógeno.

Figura 26: Controlador de la Pila de Combustible

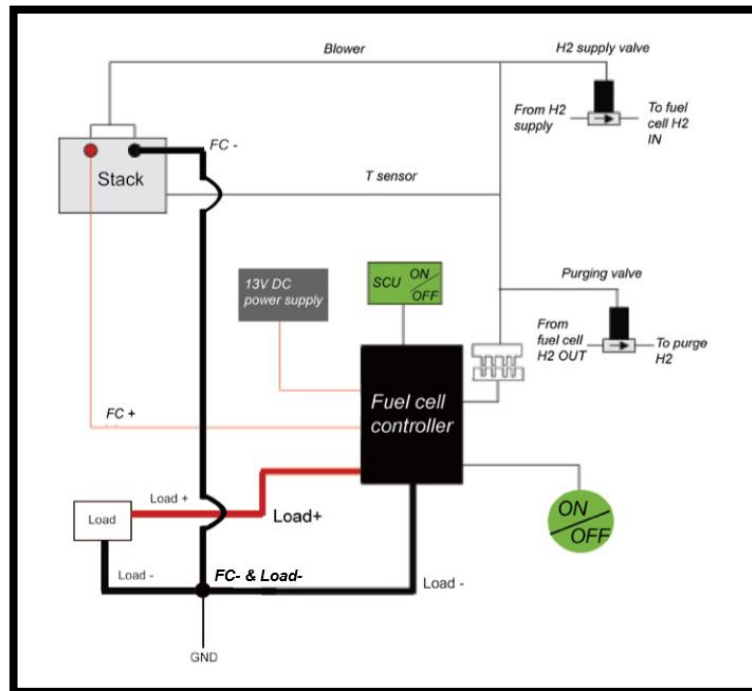


Fuente: Los Autores

Las especificaciones técnicas del controlador de la celda de combustible se encuentran en la Tabla 8, detalladas en las especificaciones técnicas de la celda de combustible.

El diagrama de conexiones se encuentra en la Figura 27, desde donde podemos explicar su funcionamiento.

Figura 27: Diagrama de conexiones de la Pila de Combustible



Fuente: [34]

El sistema de generación comienza desde la entrada del gas por la electroválvula y continúa hasta las membranas de las celdas, todo este proceso es vigilado por el controlador pre programado que tiene otros elementos como la purga, ventilador y protección contra sobrecorrientes.

La celda está compuesta de células similares a placas con canales de aire para permitir el flujo de aire a través de la membrana, la membrana facilita el flujo de hidrógeno creando la liberación de los electrones. Las placas separadoras eléctricamente, conductoras entre cada par de células permiten el flujo de electrones, obteniendo energía eléctrica a la salida de la pila para su correcto funcionamiento; es importante recalcar las funciones que cumplen el controlador y la electroválvula.

El controlador tiene como función prioritaria verificar todo el sistema, el cual viene pre programado para supervisar la temperatura de la pila por medio del ventilador, la entrada de hidrógeno, la purga y protección de la pila.

Para encenderlo o apagarlo se debe mantener pulsado el switch durante 2 segundos, el controlador tiene alarma sonora con las siguientes interpretaciones:

1. Protección de sobre corrientes, 12 A establecidos por el controlador
2. Protección de la pila de altas temperaturas, es decir cuando la pila se encuentre funcionando a $>65^{\circ}\text{C}$
3. Protección de la célula de combustible de baja tensión, es decir, la tensión media por célula es $<0,5\text{ V}$

Nota: Si se produce una de las situaciones anteriores, la pila desconectará la carga y emitirá una alarma, debemos reducir la demanda de la carga en la pila de combustible. El sistema volverá a conectar la carga cada 10 segundos. Si la situación provoca que la desconexión inicial sea la misma, el sistema desconectará de nuevo la carga.

La electroválvula es la entrada del gas hidrógeno hacia la pila desde el generador, se enciende en conjunto con el controlador, su función principal es supervisar las sobrepresiones del gas que ingresen a la membrana, si esto no se diera la presión del gas afectaría directamente la vida útil, incluso podría causar daño total de la misma, por tal motivo la electroválvula cuenta con una purga la cual tiene la función de purgar el agua y el gas redundante, y solo permite que ingrese la cantidad ideal a las membranas con una presión de 0,045 – 0,055 Mpa, cuando el controlador se apaga, la electroválvula queda en la posición de apagado para prevenir fugas de hidrógeno.

Debido a que la sobrepresión del gas hidrógeno afecta a la vida útil de las celdas, ésta deber ser controlada con una electroválvula como se muestra en la Figura 28.

Figura 28: Electroválvula para Control de Sobre Presiones de Gas Hidrógeno



Fuente: Los Autores

Posteriormente se añadió al sistema una válvula manual (Figura 29) para el control de la presión del gas hidrógeno que sale del generador de hidrógeno. Las especificaciones técnicas del hidrógeno se detallan en la Tabla 13.

Figura 29: Válvula Manual Regulador de Presión de Gas Hidrógeno



Fuente: Los Autores

Tabla 13: Especificaciones Técnicas del Generador de Hidrógeno

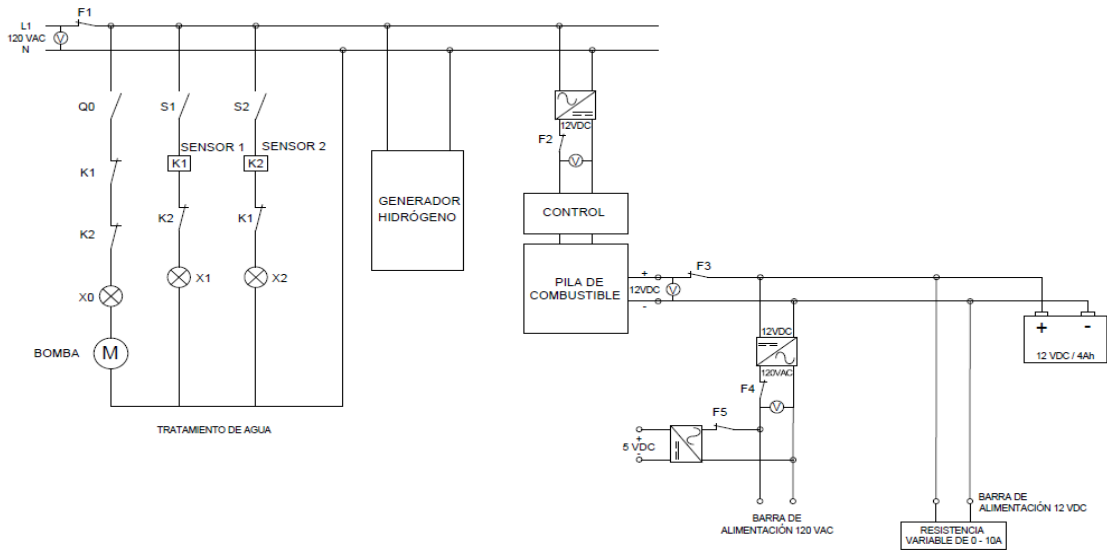
| | |
|-------------------------------|--|
| Modelo | HYH-300 |
| Pureza de Hidrógeno | 99,999%' |
| Flujo de salida | 0 - 300 ml/min |
| Presión de Salida | 0,4 Mpa |
| Condiciones de trabajo | 120 Vac / 60HZ |
| Condición Ambiental | Temperatura 0 -40° C |
| | Humedad relativa <85% |
| | Sin polvo ni gases corrosivos |
| Potencia Máxima | 300 w |
| Tamaño | 360×190×380mm (Alto×Ancho×Profundida) |
| Peso | 12 kg |

Fuente: Los Autores

3.2.4 Conexiones Eléctricas

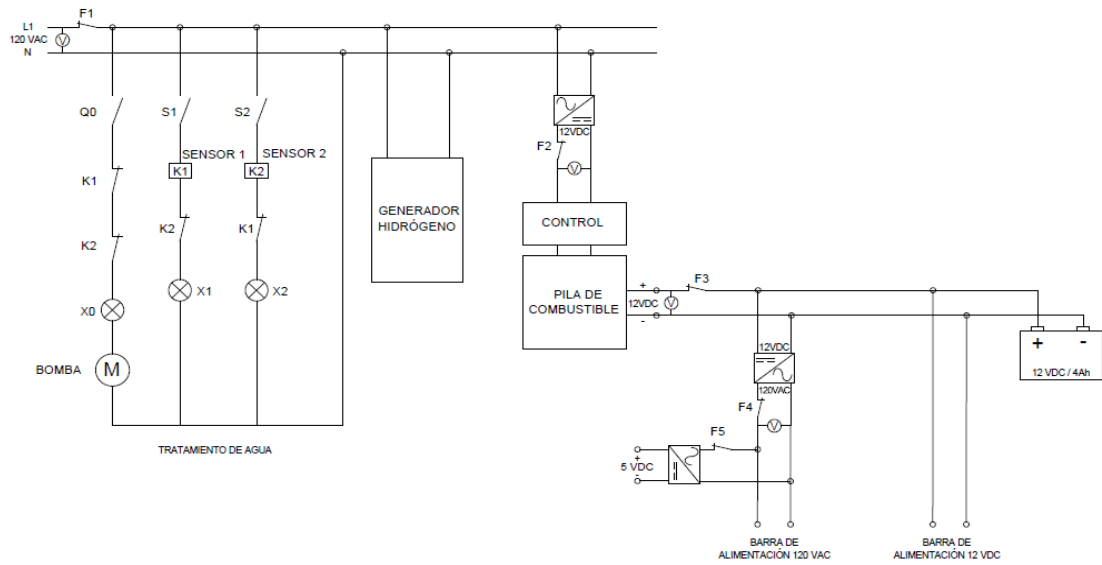
Las conexiones eléctricas instaladas en el tablero fueron realizadas una vez terminado el montaje de todos los equipos. El diagrama de conexiones eléctricas se muestra a continuación en la Figura 30 y en la Figura 31 podemos observar el diagrama de conexiones con carga.

Figura 30: Conexiones Eléctricas sin Carga



Fuente: Los Autores

Figura 31: Conexiones Eléctricas Con Carga



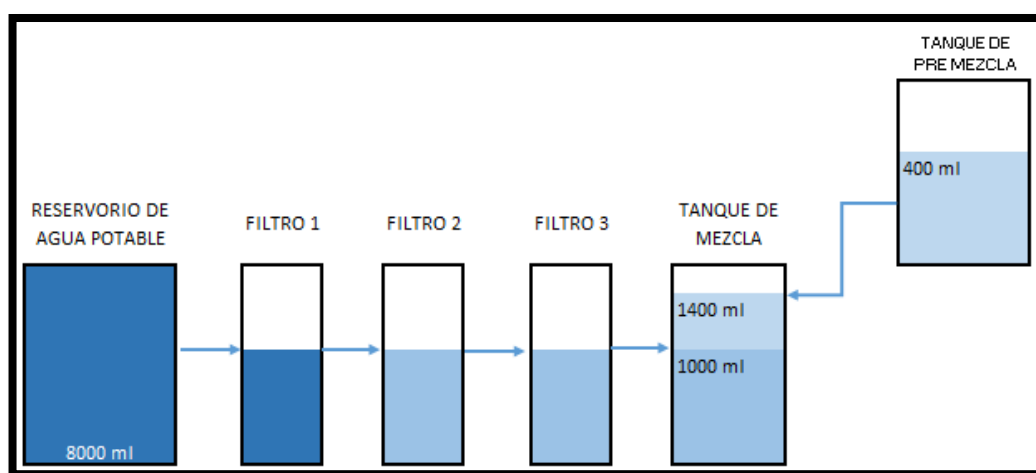
Fuente: Los Autores

Este trabajo se lo realizó en 20 horas repartidas en 10 días laborables, de acuerdo a la disponibilidad del Laboratorio de Industriales de la Universidad Politécnica Salesiana.

3.3 Generación Eléctrica

Para la generación de energía eléctrica la celda de combustible tipo PEM de 100 w de potencia instalada, necesita ser alimentada por gas hidrógeno y oxígeno, se utiliza el generador de gas hidrógeno de 300 ml/min, además necesita agua destilada para obtener dicha agua se ingresan de 6000 ml de agua potable en el reservorio de agua principal de 8000 ml como se muestra en la Figura 32.

Figura 32: Procedimiento de Filtrado del agua



Fuente: Los Autores

El agua pasa por los 3 filtros: el de sedimentos, carbón activado y desmineralización (Figura 32) para dejarla preparada al momento de ingresar al tanque de mezcla en donde se necesita 1000 ml de agua, en cada filtro se pierde alrededor de 500 ml de agua.

En el tanque de pre-mezcla se ingresará la solución de 400 ml de agua destilada con 180 g de KOH, se adquirió una balanza para verter la solución adecuada como lo muestra en la Figura 33.

Figura 33: Balanza para Solución Electrolytica



Fuente: Los Autores

Una vez obtenida esta mezcla, se la verterá en el reservorio de mezcla obteniendo la solución electrolítica de 1400 ml de agua con 180 g de KOH, estos porcentajes de ingredientes para el generador de hidrógeno lo indican en el manual que fue proporcionado por el fabricante (Anexo 1), una vez vertida la solución en el equipo, se encuentra listo para producir gas hidrógeno con un flujo de 300 ml/min, ver Figura 34.

Figura 34: Reservorio de Mezcla



Fuente: Los Autores

Luego que la mezcla este en el generador se procede a alimentar el mismo con 120 Vac para empezar a generar gas hidrógeno, una vez que los medidores de presión comiencen a subir, se enciende el control de la pila de combustible (Figura 35) el cual comenzará a generar energía eléctrica.

Figura 35: Generación de Energía Eléctrica

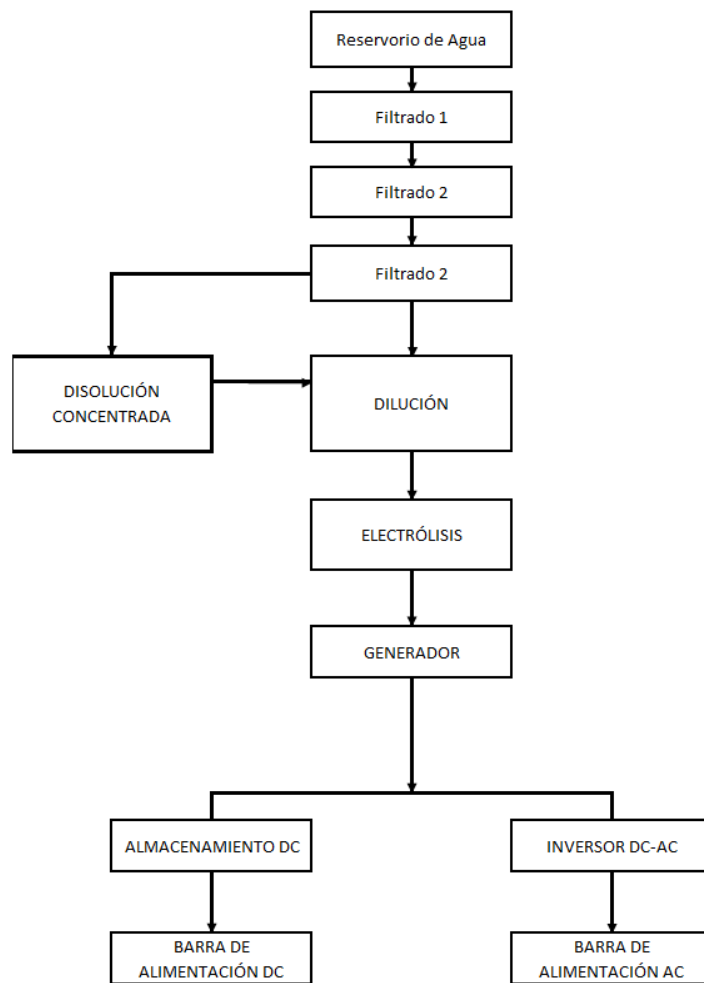


Fuente: Los Autores

Todo este proceso se muestra en la Figura 36, que detalla el Diagrama de Flujo del Proceso de Generación de Energía Eléctrica.

Figura 36: Diagrama de Flujo del Proceso de Generación de energía Eléctrica

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA



Fuente: Los Autores

3.4 Evaluación de la Micro Central de Reacción Química

Una vez realizado el diseño, la implementación y la puesta en marcha del tablero, se determinaron las siguientes pruebas para establecer si la construcción de la micro central alcanza los niveles óptimos de operación y funcionamiento, así como también la eficiencia y viabilidad de la micro central.

Antes de empezar a realizar prácticas en el Modulo se debe inspeccionar el mismo realizando las siguientes actividades:

- Revisar y verificar todas las conexiones del Tablero.
- Verificar que las válvulas manuales se encuentren cerradas (las válvulas se encuentran cerradas cuando se giran en el sentido de las manecillas del reloj y se abre cuando se giran en contra de las manecillas del reloj).
- Verificar que el modulo no contenga humedad.
- Verificar que ningún recipiente, reservorio y filtro contenga agua o ninguna otra sustancia que afecte al proceso.
- Revisar que el generador de hidrógeno no contenga agua o ninguna sustancia en su reservorio.
- Verificar que todos los breakers, interruptores y selector se encuentren en posición abierta ósea en OFF.
- Verificar que todos los equipos se encuentren en buen estado y en posición.

Descripción de las Pruebas realizadas:

3.4.1 Análisis de Generación de la Micro Central

El objetivo del análisis de generación de la micro central es establecer las condiciones de operación de la celda de combustible; utilizando los datos de placa establecido por el fabricante; así como también se verificará la eficiencia de su funcionamiento.

Consideraciones:

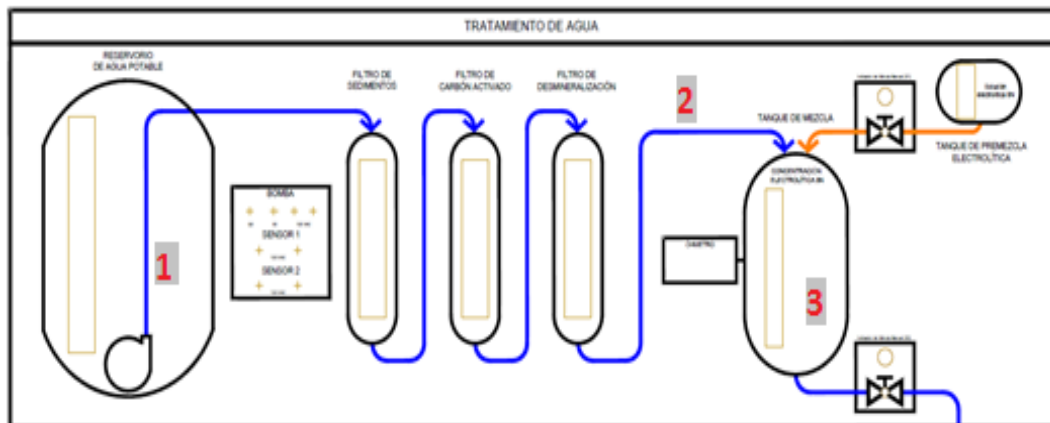
- El dato de placa del ingreso del H₂ de la celda de combustible es de 0,45-0,55bar (0,045-0,055Mpa).
- Resistencia variable hasta 110 Ω.
- 640ml de solución electrolítica para el inicio de la toma de datos.
- Tiempo de cada toma de datos: 30 minutos.

- Variables de entrada de la celda de combustible: presión de entrada (Mpa), Δ de consumo de la solución electrolítica (ml), Δ de consumo de la solución electrolítica (ml/h), consumo de la solución electrolítica (ml)
- Variable de salida de la celda de combustible: flujo del generador de hidrógeno (ml/min), resistencia, voltaje, corriente, potencia, temperatura ($^{\circ}$ C) y temperatura de la solución electrolítica ($^{\circ}$ C).

Para poder realizar esta prueba se realizaron las conexiones según el Anexo 4 conectando como carga la resistencia variable, a la Celda de Combustible, luego de esto se realizan 8 tomas estableciendo varias regulaciones.

3.4.2 Conductancia

Figura 37: Esquema Gráfico del Proceso de Purificación



Fuente: Los Autores

Para el análisis de conductividad se han tomado las etapas más importantes del tratamiento de agua, definiendo como etapas principales las siguientes:

1. Reservorio de agua, donde se encuentra almacenados 8000 ml de agua potable en el reservorio principal, indicado con el número 1 en la Figura 37.
2. Agua pos filtrada, se encuentra referencia con el número 2 en Figura 37, es el resultado después de haber pasado por los 3 filtros de purificación de agua.

3. Solución electrolítica, está referenciado con el número 3 en la Figura 37, donde se encuentran almacenados 1400 ml de solución electrolítica lista para ser ingresada en el generador de hidrógeno.

3.4.3 Eficiencia Energética

El objetivo del análisis de la Eficiencia Energética es comprobar que la micro central de reacción química utiliza eficientemente la energía generada vs la energía consumida.

Consideraciones:

- Datos de placa del fabricante de la potencia de consumo de los equipos que intervienen en la micro central.
- Datos de placa del fabricante de la potencia generada por la celda de combustible.

3.4.4 Generación Total

El objetivo de esta prueba es comprobar cuanta potencia (w) se generó durante el consumo total de la solución, es decir durante la etapa de producción de hidrógeno y consumo de la celda de combustible.

Consideraciones:

- El tiempo de funcionamiento de la micro central
- El consumo de la solución electrolítica.
- Óptimas condiciones de funcionamiento de la micro central.

CAPÍTULO 4

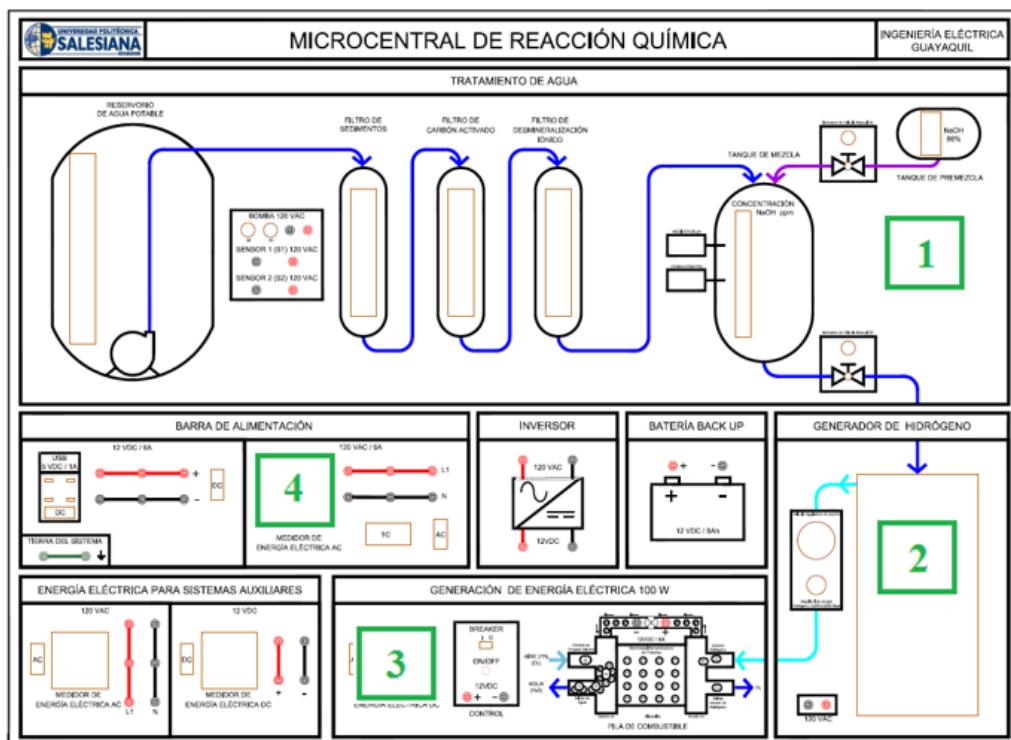
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Resultados Obtenidos

Los resultados obtenidos en el Diseño y la Implementación de la micro central se resumen en las etapas que la comprenden, tales como:

1. Purificación del Agua
2. Producción de Hidrógeno
3. Generación de Energía Eléctrica
4. Aplicación de la Energía Eléctrica

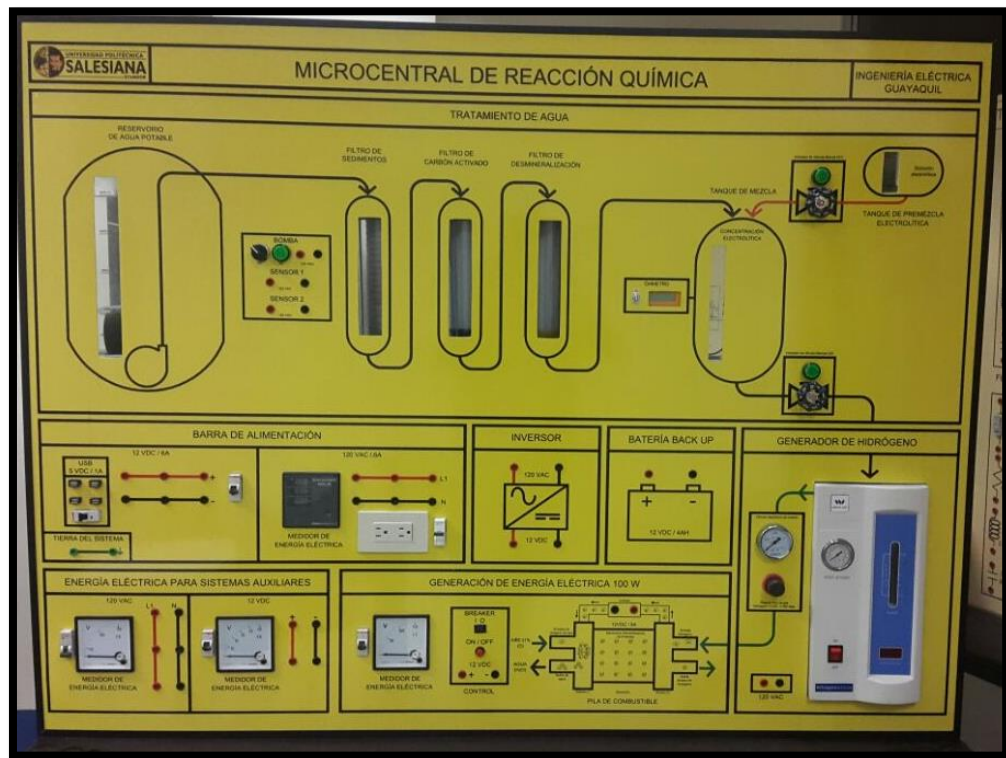
Figura 38: Etapas de Funcionamiento de la Micro Central de Reacción Química



Fuente: Los Autores

De esta manera, se detalla en la Figura 39 y 40, los componentes y diagramado en el Tablero que representa la Micro Central de Reacción Química, en su parte frontal.

Figura 39: Parte Frontal Micro Central



Fuente: Los Autores

Figura 40: Parte Posterior Micro Central

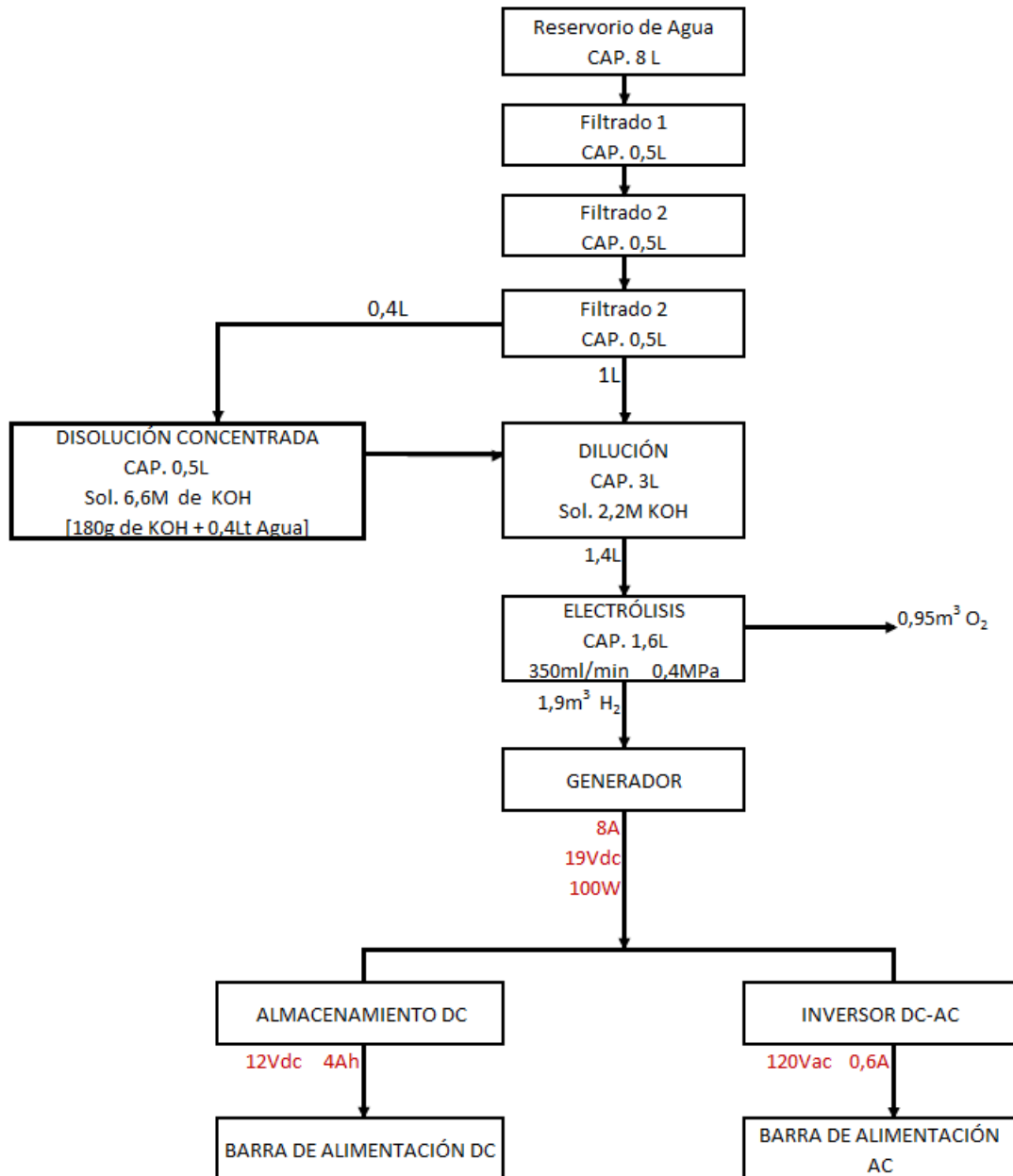


Fuente: Los Autores

Los resultados obtenidos en la generación de energía eléctrica, se encuentran determinados por el siguiente diagrama de procesos, mostrados en la Figura 41:

Figura 41: Diagrama de Flujo de Proceso de Generación de energía eléctrica.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA



Fuente: Los Autores

Se utilizaron 640 ml de solución y una resistencia de 110 ohm (4,2 A), fue necesario considerar corrientes desde 0,4 A, aumentando 0,2 A cada 30 minutos, hasta llegar a 1,8 A, como se muestra en la Tabla 14.

La resistencia variable fue conectada directamente a la salida de la celda, para observar su comportamiento y el consumo de la solución que se encuentra en el generador de hidrógeno, mediante la electrólisis es convertida en gas hidrógeno que necesita la celda para generar electricidad.

Una vez que comenzó la prueba, el consumo de solución electrolítica fue de 5 ml (635 ml), luego de colocar la primera carga de 0,4 A durante 30 minutos; el consumo aumentó a 12 ml (628 ml) representando un consumo de 8 ml, luego de una hora de generación con 0,6 A; el consumo se incrementa a 20 ml (620 ml) en 90 minutos de generación, en esta etapa se obtuvo un consumo de 8 ml igual a la prueba anterior.

En 210 minutos de generación se consume un total del 60 ml de solución electrolítica, quedando disponible 580 ml de solución electrolítica, lo cual nos indica que la micro central tiene un promedio de consumo de 10 ml en cada 30 minutos de funcionamiento, considerando corriente inferiores a 1,8 A.

Al realizar la proyección del tiempo de consumo de la solución electrolítica los 580ml restantes se consumirán en 2016 minutos bajo las condiciones establecidas.

Si la corriente supera 1,8 A, el generador de hidrógeno no podrá satisfacer la demanda, debido a que la celda de combustible consumiría mayor flujo de gas hidrógeno que el generador no puede entregar, esto se debe que el recorrido de la tubería que transporta el gas hidrógeno desde el generador a la pila es mayor a 20 cm, por lo cual se pierde presión y porque el generador es de 300 ml/min y no de 1300 ml/min como lo recomienda el fabricante, no pudo ser adquirido por su elevado costo.

Tabla 14: Análisis de Generación de la Micro Central

| ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE LA MICRO CENTRAL | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---|-----------------|-------------|---------------|-------------|--------------------------------------|---|
| Entrada de la Celda | | | | Salida de la Celda | | | | | | |
| ΔCONSUMO Solución Electrolytica (ml/h) | ΔCONSUMO Solución Electrolytica (ml) | Consumo Solución Electrolytica (ml) | Presión de entrada (Mpa) Regulador | Flujo del Generador de Hidrógeno (ml/min) | Resistencia (Ω) | Voltios (V) | Corriente (A) | Potencia(W) | Temperatura Pila de Combustible (°C) | Temperatura Solución Electrolytica (°C) |
| | | | | | | | 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 640 | 0,045 - 0,055 | 50 - 350 | 43,75 | 17,5 | 0,4 | 7,0 | 25 | 35 |
| 10 | 5 | 635 | 0,045 - 0,056 | 130 - 350 | 27,67 | 16,6 | 0,6 | 10,0 | 27 | 42 |
| 14 | 7 | 628 | 0,015 - 0,05 | 350 | 20,00 | 16,0 | 0,8 | 12,8 | 29 | 43 |
| 16 | 8 | 620 | 0,01 - 0,05 | 350 | 15,70 | 15,7 | 1,0 | 15,7 | 30 | 43 |
| 20 | 10 | 610 | 0,01 - 0,04 | 350 | 12,92 | 15,5 | 1,2 | 18,6 | 30 | 43 |
| 20 | 10 | 600 | 0,00 - 0,03 | 350 | 11,00 | 15,4 | 1,4 | 21,6 | 32 | 44 |
| 20 | 10 | 590 | 0,00 - 0,03 | 350 | 9,56 | 15,3 | 1,6 | 24,5 | 33 | 45 |
| 20 | 10 | 580 | 0,00 - 0,02 | 350 | 8,50 | 15,3 | 1,8 | 27,5 | 33 | 45 |

Fuente: Los Autores

En la Figura 42 se muestra el comportamiento de la curva del Δ del consumo de la solución electrolytica (ml/h) vs la corriente, identifica claramente que a partir de una corriente de 1,2A el consumo se vuelve constante. Con estos datos obtenemos la ecuación que describe el comportamiento del consumo.

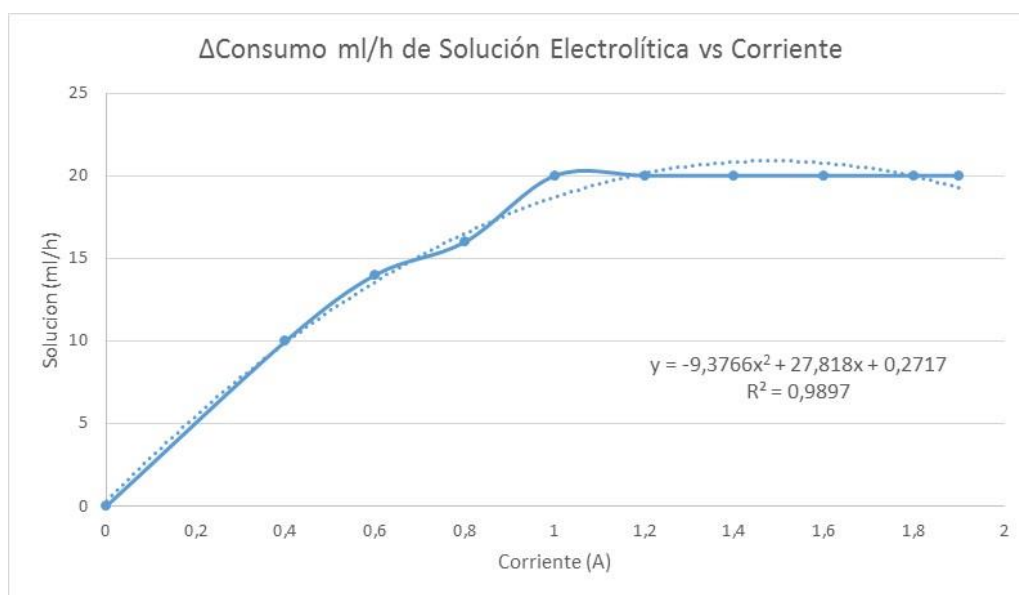
$$y = -9,3766x^2 + 27,818x + 0,2717$$

$$R^2 = 0,9897$$

Ecuación 23: Δ del Consumo de la Solución Electrolytica (ml/h) vs la Corriente

Fuente: Los Autores

Figura 42: Consumo ml/h versus Corriente



Fuente: Los Autores

En la tabla describen los datos del consumo de la solución electrolítica versus el tiempo tomados de la tabla anterior.

Tabla 155: Consumo de Solución Electrolítica versus Tiempo

| Consumo Solución Electrolítica (ml) | Tiempo (min) |
|-------------------------------------|--------------|
| 640 | 0 |
| 635 | 30 |
| 628 | 60 |
| 620 | 90 |
| 610 | 120 |
| 600 | 150 |
| 590 | 180 |
| 580 | 210 |

Fuente: Los Autores

En la Figura 43 nos muestra finalmente el comportamiento del consumo de la solución electrolítica versus el tiempo, podemos observar que 640 ml de solución electrolítica, consideramos un tiempo inicial (0) y al tener 580 ml llegamos a un tiempo de 210 minutos, con estos datos obtenemos la ecuación que describe el comportamiento del consumo.

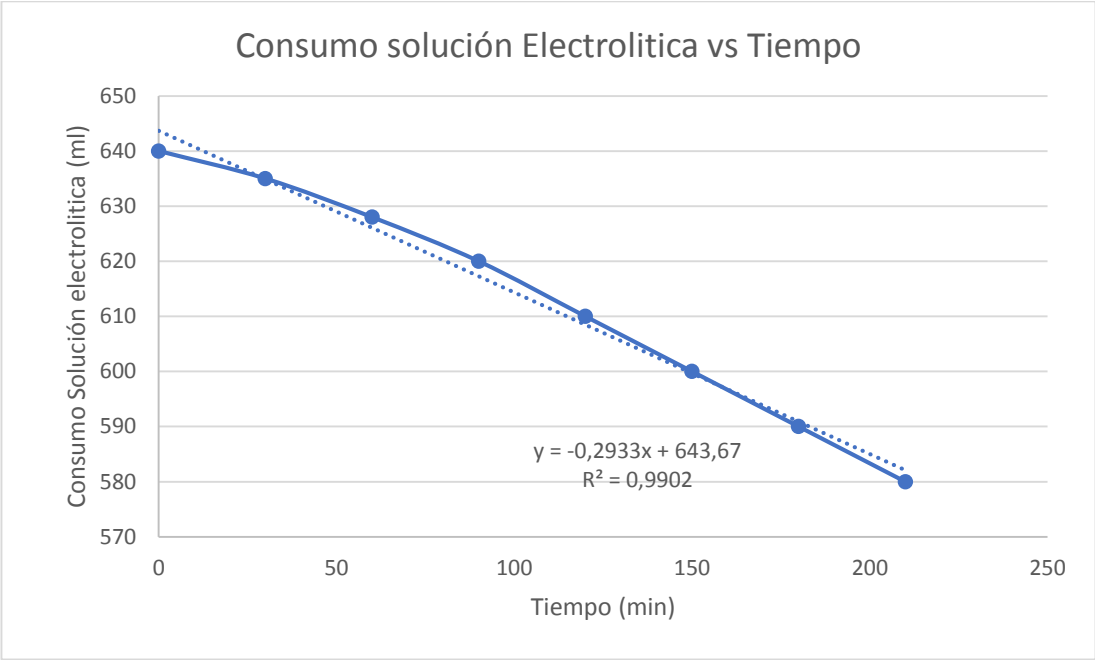
$$y = -0,2833x + 643,07$$

$$R^2 = 0,9879$$

Ecuación 24: Δ del Consumo de la Solución Electrolítica (ml/h) vs el Tiempo

Fuente: Autores

Figura 43: Consumo ml/h versus Corriente



Fuente: Los Autores

La Conductividad se establece de acuerdo a la Tabla 16, mientras más pura es el agua, menor es la concentración de electrolitos en el agua y por ende, mayor es la resistencia del medio a la transmisión de una corriente eléctrica.

Tabla 166: Registro de Datos Conductividad.

| ETAPA: Contiene Mineral | | CONCENTRACIÓN ppm | CONDUCTIVIDAD μS/cm | RESISTENCIA ELÉCTRICA (Ω) | k=L/R*A (ohm/cm) |
|-------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------|------------------|
| 1 | Reservorio de Agua | 381 | 599 | 2484 | 255,02583 |
| 2 | Agua Post filtrado | 72,3 | 113 | 4000 | 158,371041 |
| 3 | Solución Electrolítica | 121210 | 1,89e5 | 1008 | 628,456511 |

Fuente: Los Autores

La pureza química del agua (mientras más pura es el agua, menor es la concentración de electrolitos en el agua y mayor es la resistencia del medio a la transmisión de una corriente eléctrica). Como se observa en la Tabla 20, el reservorio de agua, muestra que el pos filtrado contiene un mayor de resistencia de 4000Ω , luego de haber pasado por los 3 filtros, el agua que se encuentra en el reservorio principal, contiene alrededor de la mitad del agua post filtrado. Mientras tanto el agua que fue mezclada con la solución electrolítica da valores de resistencia y mayor conductividad eléctrica, es decir la solución de electrolitos se vuelve muy conductora.

La eficiencia energética comprende el análisis del levantamiento de potencia consumida por cada equipo de la micro central, vs la potencia de salida de la celda de combustible, ver Tabla 17.

Tabla 177: Balance Energético de la Micro Central

| BALANCE ENERGÉTICO DE LA MICRO CENTRAL | | | | |
|---|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| EQUIPOS | POTENCIA DE CONSUMIDA (W) | PORCENTAJE POTENCIA CONSUMIDA | POTENCIA GENERADA (W) | PORCENTAJE POTENCIA GENERADA |
| Celda de Hidrógeno | | | 100 | 48% |
| Generador de Hidrógeno | 150 | 73% | | |
| Control Celda PEM | 9,6 | 5% | | |
| Bomba de desplazamiento positivo | 32 | 15% | | |
| Varios (Sensores, Mini bomba, contactores) | 15 | 7% | | |

Fuente: Los Autores

Según los datos obtenidos se determina que, bajo las condiciones óptimas de funcionamiento, la micro central de reacción química debe ser repotenciada, debido a que los equipos que la constituyen consumen aproximadamente el doble de la potencia que entrega la pila de combustible.

La generación total de la micro central una vez proyectada la generación del consumo total de la solución, considerando 3,5 horas de funcionamiento continuo de la micro central, se consumió 60ml de solución electrolítica, por tanto, se estima un promedio aproximado de 84 horas de consumo en 1400ml de solución, Ver Tabla 18.

Tabla 188: Registro de datos de Generación Total de la Micro Central de Reacción Química.

| Cantidad de Solución | Consumo Energético | Tiempo de Funcionamiento |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 60 ml | 24,5 Wh | 3,5 h |
| 120 ml | 69,72 Wh | 7 h |
| 180 ml | 134,4 Wh | 10,5 h |
| 240 ml | 219,8 Wh | 14 h |
| 300 ml | 325,5 Wh | 17,5 h |
| 360 ml | 452,76 Wh | 21 h |
| 420 ml | 599,76 Wh | 24,5 h |
| 480 ml | 771,12 Wh | 28 h |
| 540 ml | 866,25 Wh | 31,5 h |
| 600 ml | 962,5 Wh | 35 h |
| 660 ml | 1058,75 Wh | 38,5 h |
| 720 ml | 1155 Wh | 42 h |
| 780 ml | 1251,25 Wh | 45,5 h |
| 840 ml | 1347,5 Wh | 49 h |
| 900 ml | 1443,75 Wh | 52,5 h |
| 960 ml | 1540 Wh | 56 h |
| 1020 ml | 1636,25 Wh | 59,5 h |
| 1080 ml | 1732,5 Wh | 63 h |
| 1140 ml | 1828,75 Wh | 66,5 h |
| 1200 ml | 1925 Wh | 70 h |
| 1260 ml | 2021,25 Wh | 73,5 h |
| 1320 ml | 2117,5 Wh | 77 h |
| 1380 ml | 2213,75 Wh | 80,5 h |
| 1440 ml | 2310 Wh | 84 h |

Fuente: Los Autores

4.2 Repotenciación de la Micro Central de Reacción Química

Considerando que la micro central debe ser repotenciada para obtener un mejor rendimiento se exponen las consideraciones hacer esto posible:

El Proyecto puede ser sustentable, de acuerdo a lo que indica el fabricante, considerando la siguiente tabla comparativa de equipos de la Tabla 19.

Tabla 199: Equipos de la Micro Central de Reacción Química para repotenciar

| Equipos para repotenciar la Micro central | MICRO CENTRAL (ACTUAL) | MICRO CENTRAL REPOTENCIADA (SUSTENTABLE) |
|---|------------------------|--|
| Pila de Combustible tipo PEM | | |
| Potencia | 100 w | 2000 w |
| Voltaje de trabajo | 12 VDC | 28.8 VDC |
| Corriente de trabajo | 8.3 A | 70 A |
| Combustible | Hidrógeno & aire | Hidrógeno & aire |
| Presión de Hidrógeno | 0.45 - 0.55 Bar | 0.45 - 0.55 Bar |
| Pureza de Hidrógeno | ≥ 99.995% | ≥ 99.995% |
| Flujo de entrada de gas Hidrógeno | 1.3 L/min | 26 L/min |
| Compresor | | |
| Potencia | No Existe | 0,5 HP |
| Voltaje de trabajo | | 110 V |
| Tipo | | Pistón |
| Capacidad | | 60 L |

Fuente: Los Autores

Debido a que la demanda actual de la central es superior a la generación eléctrica, como primera opción, se proyecta repotenciarla a una demanda instalada de 2000 w, esto significa que se necesitara un flujo de entrada superior al actual para mantener el mismo generador de hidrógeno se tendrá que añadir un compresor para satisfacer la demanda de gas hidrógeno de la pila, esto no puede ser posible a 1000 w debido a que tendríamos alrededor de un 60% (600 w) de consumo de lo que la micro central puede entregar, pero con la repotenciación propuesta se tendría un consumo alrededor del 35% (de lo que se genera por lo cual se tiene un alto porcentaje (65% es igual a 1300 w) de generación de energía eléctrica para ser aprovechado.

El compresor sirve para almacenar y enviar el flujo de gas hidrógeno necesaria para cubrir la demanda de la celda de combustible y de esta manera aprovecha al máximo el rendimiento de la misma.

La segunda opción para repotenciar la micro central es adquirir un generador de hidrógeno de las mismas características que solicita el fabricante de la pila de combustible de 2000 w para satisfacer su demanda.

Así como también, podemos determinar su eficiencia, de acuerdo a la Tabla 20:

Tabla 200: Comparación de Equipos de la Micro Central de Reacción Química repotenciada

| BALANCE ENERGÉTICO DE LA MICROCENTRAL REPOTENCIADA (SUSTENTABLE) | | | | |
|---|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| EQUIPOS | POTENCIA DE CONSUMIDA (W) | PORCENTAJE POTENCIA CONSUMIDA | POTENCIA GENERADA (W) | PORCENTAJE POTENCIA GENERADA |
| Celda de Hidrógeno | | | 2000 | 100% |
| Generador de Hidrógeno | 150 | 7,5% | | |
| Control Celda PEM | 25 | 1,25% | | |
| Compresor | 410 | 20,5% | | |
| Bomba de desplazamiento positivo | 32 | 1,6% | | |
| Varios (Sensores, Mini bomba, contactores) | 15 | 0,75% | | |

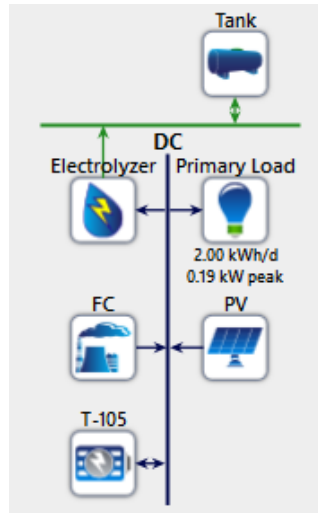
Fuente: Los Autores

Se va a utilizar el mismo generador de hidrógeno y lo que se va a realizar es enviar el gas que será almacenado en el tanque del compresor para ser enviado a la presión y flujo necesario de los nuevos requerimientos.

Al seleccionar la potencia de la pila de combustible, realizando la consulta al fabricante, se recomienda seleccionar una pila de combustible de 2000 w con una disponibilidad mayor al 50% y al observar la Tabla 20, el dato más acertado, sería el de 1700 w, pero al no tener esa disponibilidad al consultar en el mercado, lo óptimo sería colocar una celda de combustible de 2000 w, que presenta una eficiencia de consumo del 32% y una disponibilidad del 68%.

Para comprobar el funcionamiento sustentable del módulo una vez realizada la repotenciación, con el programa Homer Energy se ha efectuado la simulación en donde se ingresa los parámetros descritos, obteniendo su correcto funcionamiento se realizó las conexiones de los equipos como muestra la Figura 44, donde se efectúa la interconexión de la micro central con el sistema eléctrico.

Figura 44: Conexiones de los equipos en el Software

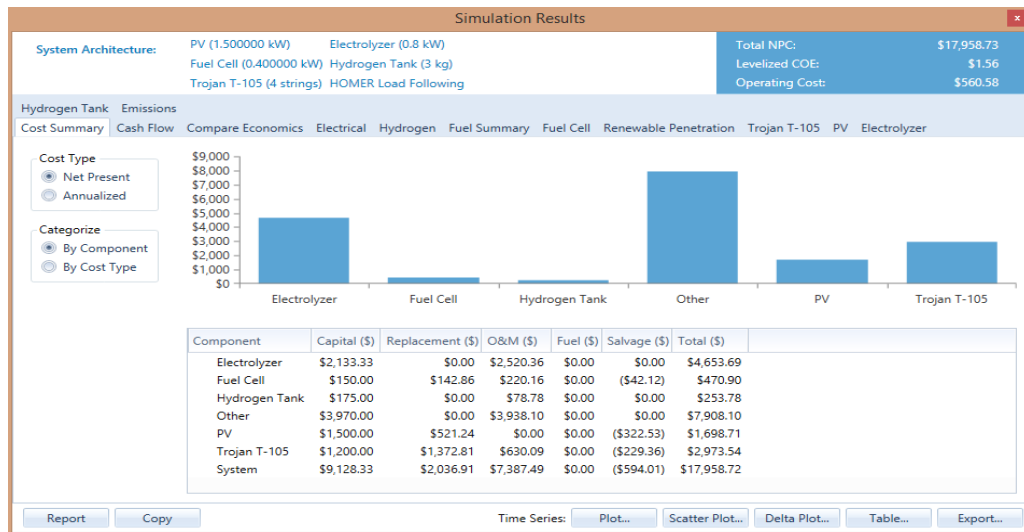


Fuente: [35]

Para la simulación se incrementó un tanque de hidrógeno con una capacidad de 6 kg, se mantuvo el mismo generador de hidrógeno el programa lo identifica como electrolizador, el equipo encargado de alimentar los sistemas auxiliares de la micro central es el panel solar con una capacidad instalada de 4 kw además como respaldo se colocó una batería Trojan de 1 kw.

La simulación da como resultado anual el funcionamiento de la micro central mostrando el comportamiento y costo económico de los equipos durante este proceso, que muestra la Figura 45, las diferentes graficas del funcionamiento de la misma haciéndola viable.

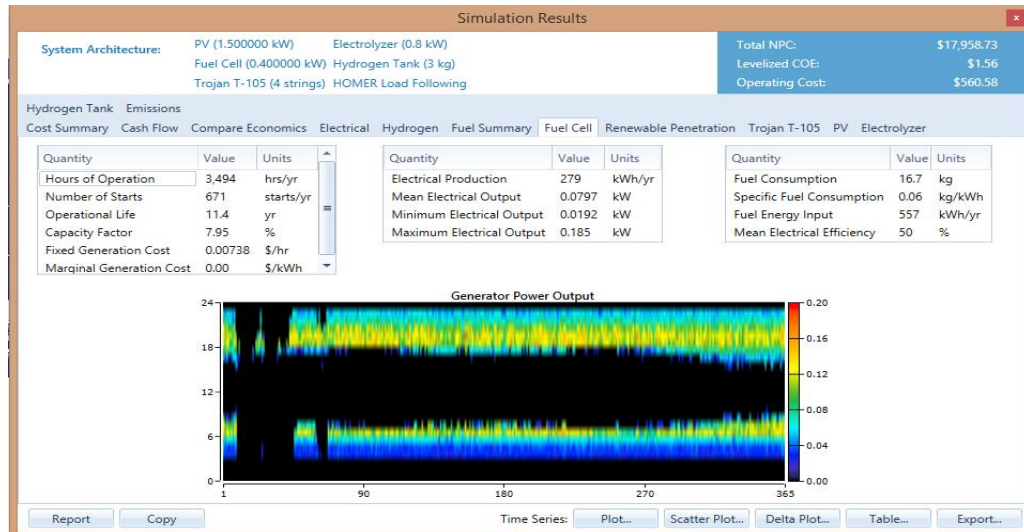
Figura 45: Costo Total se la Repotenciación



Fuente: [35]

Luego de realizar la simulación del funcionamiento de la micro central, también nos muestra el costo total que tendría la repotenciación como lo muestra en la Figura 45 obteniendo un valor total de \$17,958.72 para ser repotenciada y viable.

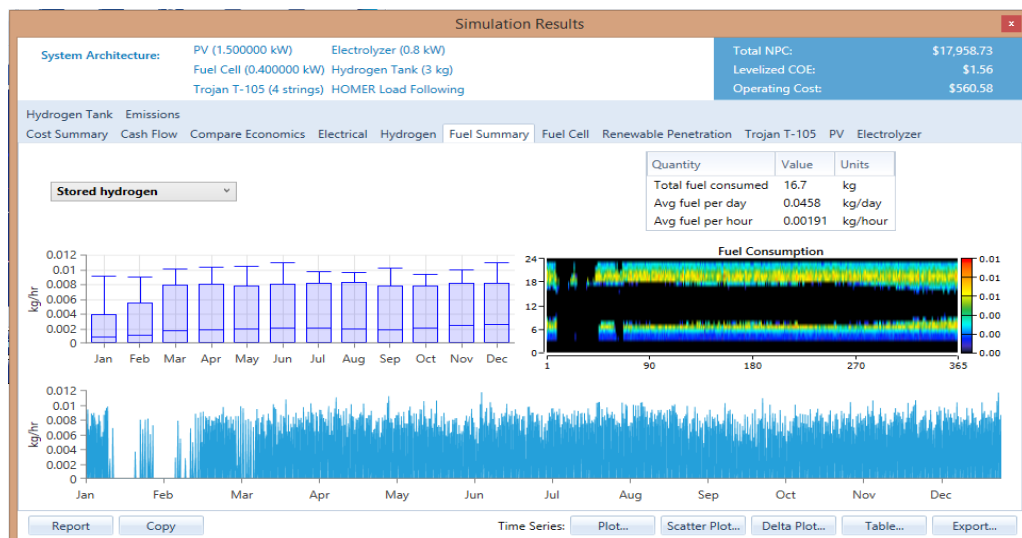
Figura 46: Simulación del Funcionamiento Anual de la Pila de Combustible



Fuente: [35]

Se simuló el funcionamiento anual de la pila de combustible como se ilustra en la Figura 46, presenta una producción anual de 279 kwh/año, con un consumo de 16.7kg representa una eficiencia del 50 %.

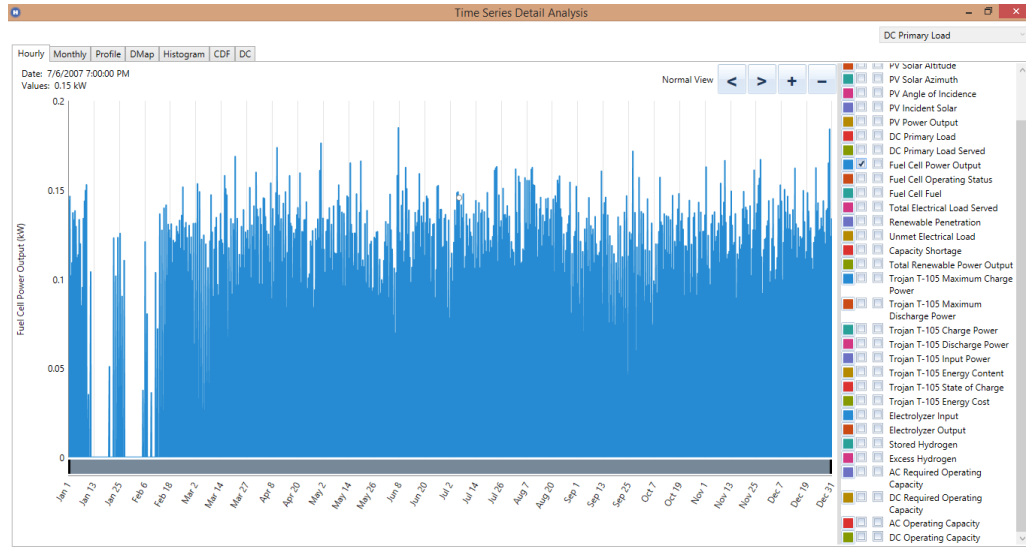
Figura 47: Simulación del Funcionamiento Anuales de la Pila de Combustible



Fuente: [35]

Los resultados obtenidos por el programa Homer Energy de manera anual se muestran en la Figura 47, representa el funcionamiento del mismo mostrando el consumo de combustible (hidrógeno), el programa simula escases para darnos valores reales de cómo sería una situación crítica de la central.

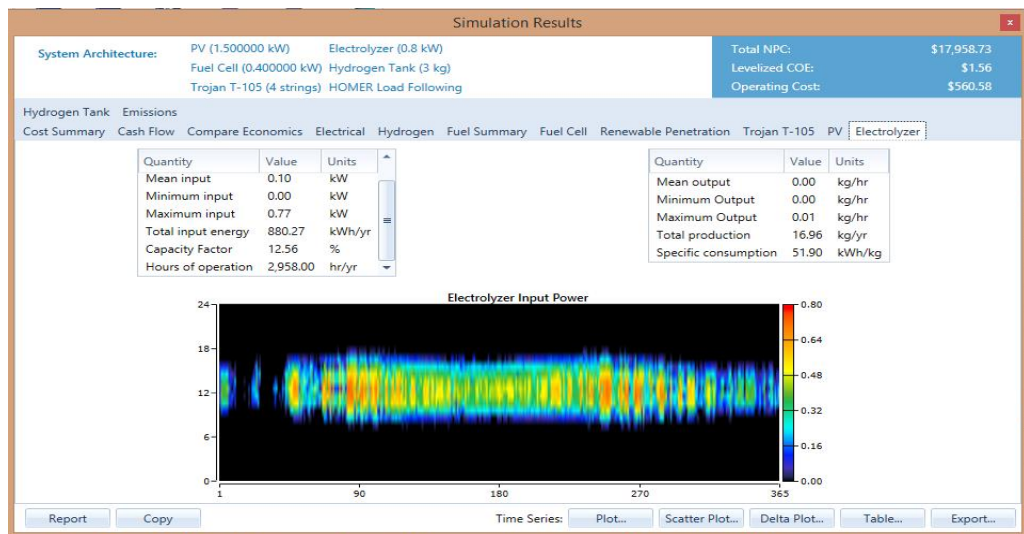
Figura 48: Funcionamiento Anual de la Pila de Combustible



Fuente: [35]

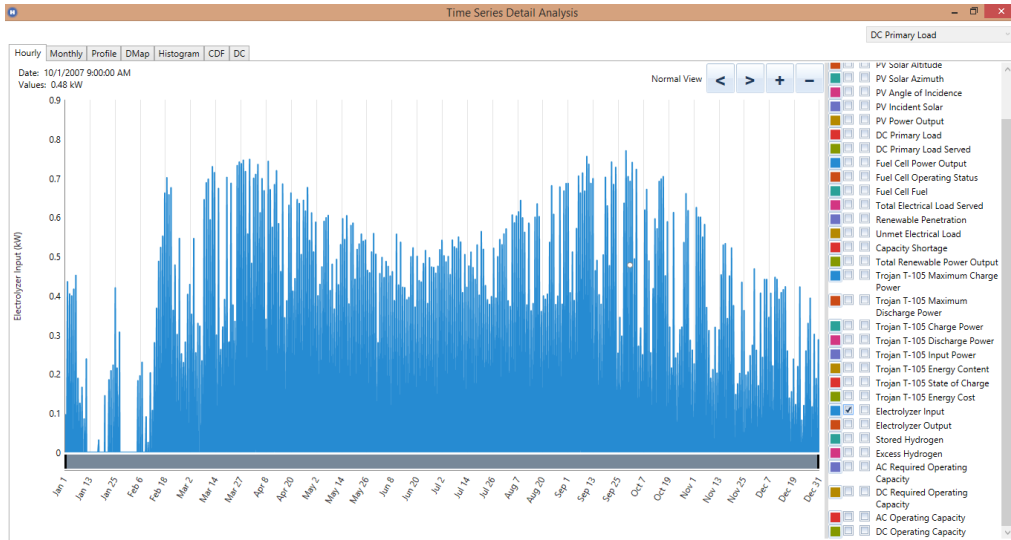
También se analizaron los distintos parámetros de la generación de hidrógeno por medio de la electrólisis obteniendo una producción anual de 16.96 kg con un consumo de 51.90 kwh/kg, ver Figura 48 y 49.

Figura 49: Simulación del Funcionamiento Anual del Electrolizador



Fuente: [35]

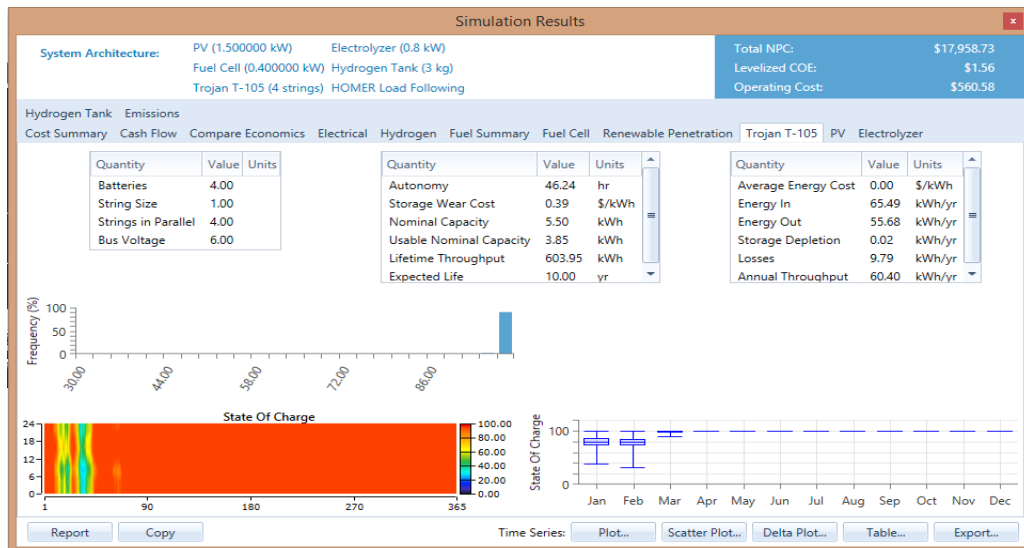
Figura 50: Funcionamiento Anual del Electrolizador



Fuente: [35]

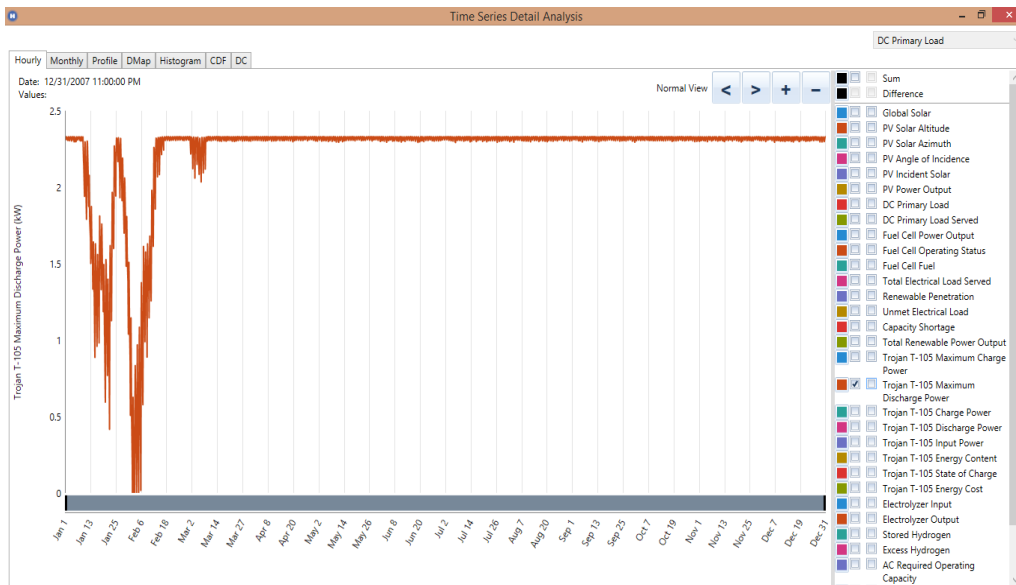
Como respaldo al sistema se colocó un banco de baterías que viene pre instalada en el programa para el funcionamiento del sistema con un tiempo de vida de 603.95 kwh, su más grande aporte dentro del sistema se lo evidenció en las primeras semanas de trabajo del año, en donde las baterías trabajaron hasta un 80 % de su capacidad como lo muestra la gráfica de las Figuras 51 y 52.

Figura 51: Simulación del Funcionamiento Anual del Banco de Baterías



Fuente: [35]

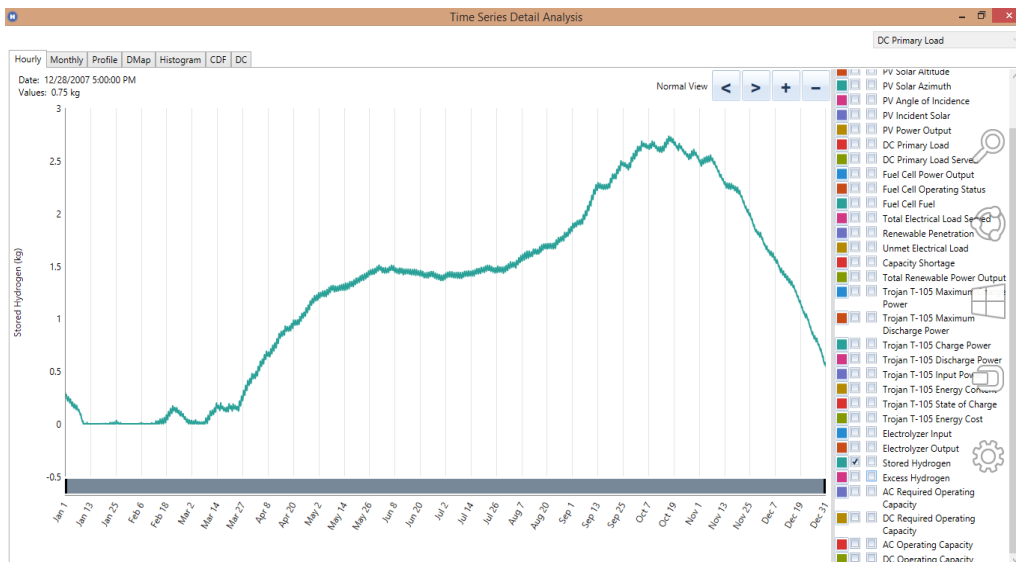
Figura 52: Funcionamiento Anual del Banco de Baterías



Fuente: [35]

Uno de los equipos que deberán ser añadidos en la repotenciación es un tanque de almacenamiento de hidrógeno de 6 kg, empezó almacenar gas hidrógeno después de los primeros cuatro meses del año, tuvo un consumo de hasta casi 3 kg.

Figura 53: Comportamiento del Tanque de Almacenamiento de Hidrógeno



Fuente: [35]

CONCLUSIONES

En el Diseño e Implementación de una Micro Central de Reacción Química, abastecido por Hidrógeno y Oxígeno, podemos concluir que:

- Se diseñó e implementó un prototipo de una micro central de reacción química, la cual necesita 1400 ml de H₂O para generar 27.5 w, con una pureza del 99.999% de manera continua de Hidrógeno.
- La micro central de reacción química puede generar hasta 2310 wh de energía eléctrica, aproximadamente hasta 84 horas de manera continua, con 1400ml de solución electrolítica.
- El generador de hidrógeno y la celda de combustible se consideran los equipos más relevantes al momento de dimensionar y determinar las características de la micro central, debido a que entre los dos equipos consumen el 78% de potencia vs el 48% de la potencia generada en la micro central, por lo que se concluye que la micro central de reacción química debe de ser repotenciada.
- La potencia consumida de la micro central de reacción química fue de 207 w y la producida fue de 100 w, es decir la potencia producida es la mitad de lo consumido, por lo que se determina que el proyecto debe de ser repotenciado; se debe adquirir una pila de combustible de mayor potencia instalada de 2000w.
- Finalmente se comprobó que el modelo de generación de energía eléctrica a base de una celda de combustible como fuente de energía gas hidrógeno y oxígeno, demuestra ser un prototipo sustentable y sostenible energéticamente, siempre que sea implementado a gran escala en un futuro, con una celda de combustible mayor o igual a 2000 w.

RECOMENDACIONES

- Debido a que el consumo de la Micro Central de Reacción Química es superior a la generación de energía eléctrica, es importante que se tenga en cuenta las condiciones para repotenciarla y poder obtener un mejor rendimiento, de esta manera sería un proyecto viable a pequeña escala lo cual incitaría a plantear la proposición de una Mega Central.
- Hacer seguimiento al futuro de las pilas de combustible las cuales prometen mejorar su eficiencia y su costo para poder ser más accesibles al mercado, así como lo hicieron los paneles solares.
- Efectuar estudios, análisis y poner a prueba la aplicación del gas hidrógeno como combustible en motores de combustión para observar su comportamiento, funcionamiento y rendimiento en comparaciones con otros combustibles, identificar las desventajas y ventajas del mismo.
- Se deben realizar más estudios acerca de las energías que pueden ser aprovechadas en nuestro medio, como por ejemplo aprovechar la energía cinética el paso de los vehículos por el puente de la Unidad Nacional colocando un piezoeléctrico para convertirla en energía eléctrica o realizar un estudio para saber la viabilidad de incorporar la energía undimotriz la cual convierte el movimiento de las olas en electricidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. d. Ambiente, «Ecuador suscribe acuerdo de París sobre cambio climático,» Gobierno Nacional de la República del Ecuador, 2016. [En línea]. Available: <http://www.ambiente.gob.ec>.
- [2] Corporación Nacional de Electricidad, «Plan Estratégico Institucional,» INECEL, QUITO, 2015.
- [3] O. L. d. Energia, «OLADE (Organizacion Latinoamericana de Energía),» [En línea]. Available: <http://www.olade.org/>.
- [4] I. A. d. I. Energía, «IAE,» Instituto Argentino de la Energía, [En línea]. Available: <http://web.iae.org.ar/>. [Último acceso: 2016].
- [5] A. I. d. E. (AIE), «International Energy Agency,» 2016. [En línea]. Available: www.iea.org. [Último acceso: 2016].
- [6] Peraza M., Cesar; Gregorio Diaz, Jose; Arteaga, Francisco; Villanueva, Carlos; Gonzalez Longatt, Francisco, Modelacion de una celda de combustible de membrana de intercambio de protones, vol. 2, Carabobo: Ingenieria UC, Vol 15, Num. 3, 2008, p. 184.
- [7] J. F. P. R. N. Nayibe Guerrero Moreno, Energías Renovables Biológicas– Hidrógeno-Pilas de Combustible-II, Centro de investigación de estudios avanzado del Instituto Politécnico Nacional, 2010, p. 309.
- [8] R. S. o. Chemistry, «Energy & Environmental Science,» [En línea]. Available: <http://pubs.rsc.org/>. [Último acceso: 2016].
- [9] Ballard, «Ballard,» Ballard putting fuel cells to work, 17 Octubre 2012. [En línea]. Available: www.ballard.com. [Último acceso: 12 Septiembre 2016].
- [10] K. M. C. J. P. Z. G.Wu, «High Performance Electrocatalysts for Oxygen Reduction Derived from Polyaniline,» *Iron and Cobalt, Science*, p. 332, 28 Abril 2011.
- [11] I. EG&G Technical Services, Fuel Cell Handbook, Seventh Edition ed., West Virginia: National Energy Technology Laboratory, 2004.
- [12] G. D. ARAGON, «Arangon investiga,» 2008. [En línea]. Available: www.aragoninvestiga.org.

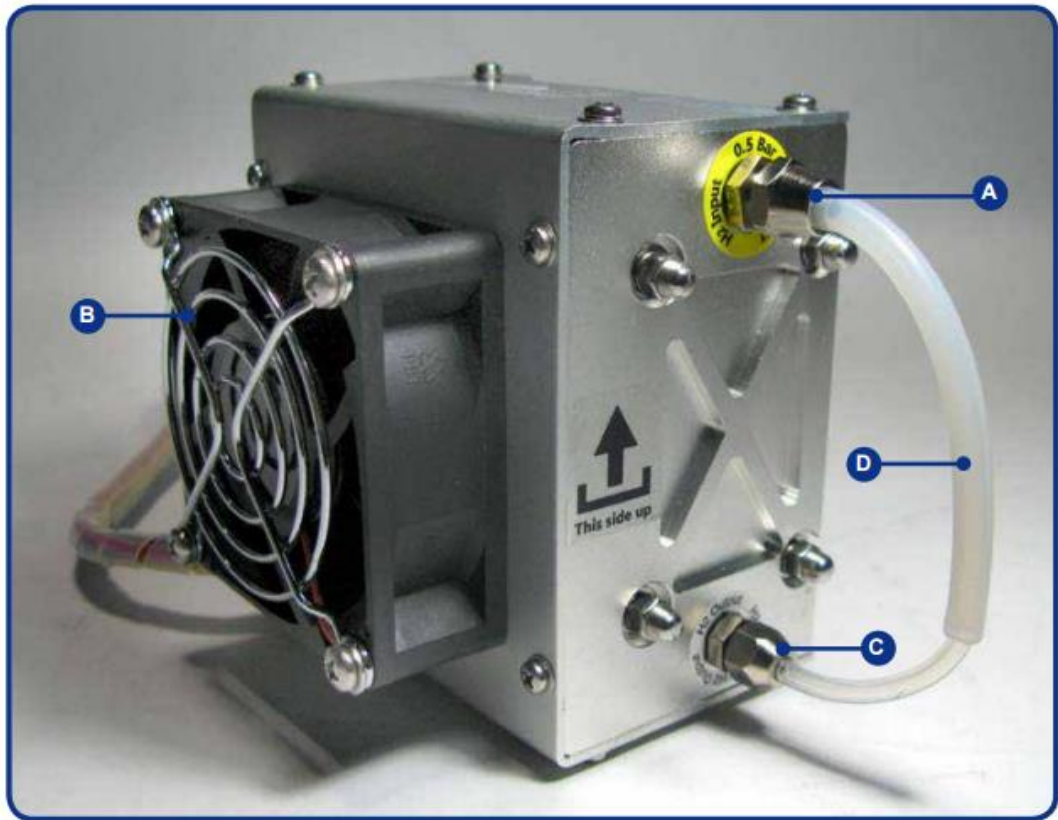
- [13] F. C. N. ANS, «Componente de una pila de combustible,» 2006. [En línea]. Available: http://www.fuelcell.no/principle_components_es.htm. [Último acceso: 24 Noviembre 2016].
- [14] S. Jaramillo, «Diseño y Construcción de las placas bipolares,» Pereira, 2013.
- [15] Félix Barreras; Antonio Lozano, «Hidrógeno, Pila de combustible tipo PEM,» *Energía Sostenible para todos*, vol. 10, p. 19, 2012.
- [16] M. K. H. L. D. Y. C. L. Ni. Meng, «Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant,» de *J. Energy Conversion and Management*, vol. 49, 2008.
- [17] E. Renovables, «Pila de Combustible: tipos,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.energiasrenovablesinfo.com>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [18] ICMA, «Pilas de combustible,» [En línea]. Available: <https://www.unizar.es/icma/divulgacion/pdf/pdfceldascomb.pdf>. [Último acceso: 2016].
- [19] Ecomotriz, «Pilas de Combustible: Tipos, usos y propiedades,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.ecomotriz.com>. [Último acceso: 2016].
- [20] Ciencia y tecnología Co., Ltd. de Wuhan Kangzheng, «Spanish.chemicalsmaterials,» [En línea]. Available: <http://spanish.chemicalsmaterials.com/sale-7513515-high-purity-mining-chemicals-caustic-potash-potassium-hydroxide-flakes-koh.html>.
- [21] M. O. R. Nave, «HyperPhysics,» carl rod nave, [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/electrol.html>. [Último acceso: 18 Diciembre 2016].
- [22] EcuRed, «EcuRed, Conocimiento con todo y para todos,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.ecured.cu/index.php/Oxígeno>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [23] Elementos.org, «Elementos de la tabla periodica,» [En línea]. Available: <http://elementos.org.es>. [Último acceso: 2016].
- [24] M. d. I. L. V. Monroy, «Bioquímica.dogsleep,» Julio 2009. [En línea]. Available: <http://www.bioquimica.dogsleep.net/Teoria/archivos/Unidad23.pdf>. [Último acceso: 9 Septiembre 2016].
- [25] J. L. G. Fierro, «El hidrógeno: metodologías de producción,» Fundación General CSIC, 2010. [En línea]. Available:

- http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [26] Ecuared, «Ecuared,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.ecured.cu>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [27] Romilio Tambutti; Hector Muñoz, Física 2, México: Limusa.
- [28] R. Chang, Química, México D F: Mc Graw Hill, 2010.
- [29] M. Olmo, «Termodinámica,» HyperPhysics. [En línea]. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [30] C. OCCIDENTE, «Corriente eléctrica de los electrolitos,» 29 07 2015. [En línea]. Available: <http://envidadodspace.colombiaaprende.edu.co/handle/4/7457>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [31] Educarchile, «Conductividad en Disoluciones Químicas,» Educarchile, 10 08 2012. [En línea]. Available: <http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?id=215744>.
- [32] M. A. Francisco, Manual de Laboratorios: Ecología de Microorganismos., Puerto Rico: Departamento de biología, Universidad de Puerto Rico, 2002.
- [33] W. Win, «Hydrogen Generator,» Materials Sci & Tech, Beijing.
- [34] H. f. c. Technologies, «H-100 fuel cell stack,» 2013.
- [35] Homer Energy, *Homer Energy*, 2016.
- [36] M. Alegria, Pila de combustible, 1ra edicion ed., Buenos Aires: Gráfica Pinter S. A, 2005.
- [37] F.J. Rodriguez Varela, O. Solorza Feria, E. Hernandez Pachecho, Celdas de combustible, Canada, 2010, p. 241.
- [38] UPV, «Principios electroquímicos,» 2014. [En línea]. Available: www.upv.es. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [39] José Ignacio Linares Hurtado; Beatriz Yolanda Moratilla Soria, El Hidrógeno y la energía, Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI.
- [40] M. d. L. V. Monroy, «Bioquímica,» Julio 2009. [En línea]. Available: <http://www.bioquimica.dogsleep.net/Teoria/archivos/Unidad23.pdf>.

- [41] Sandra M. Rozo Q., Juan E. Tibaquirá G., «Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico,» Scientia et Technica Año XIII, Pereira, 2007.
- [42] C. Europea, «La energía del hidrógeno y las pila de combustible,» Comunidades Europeas, Luxemburgo, 2003.

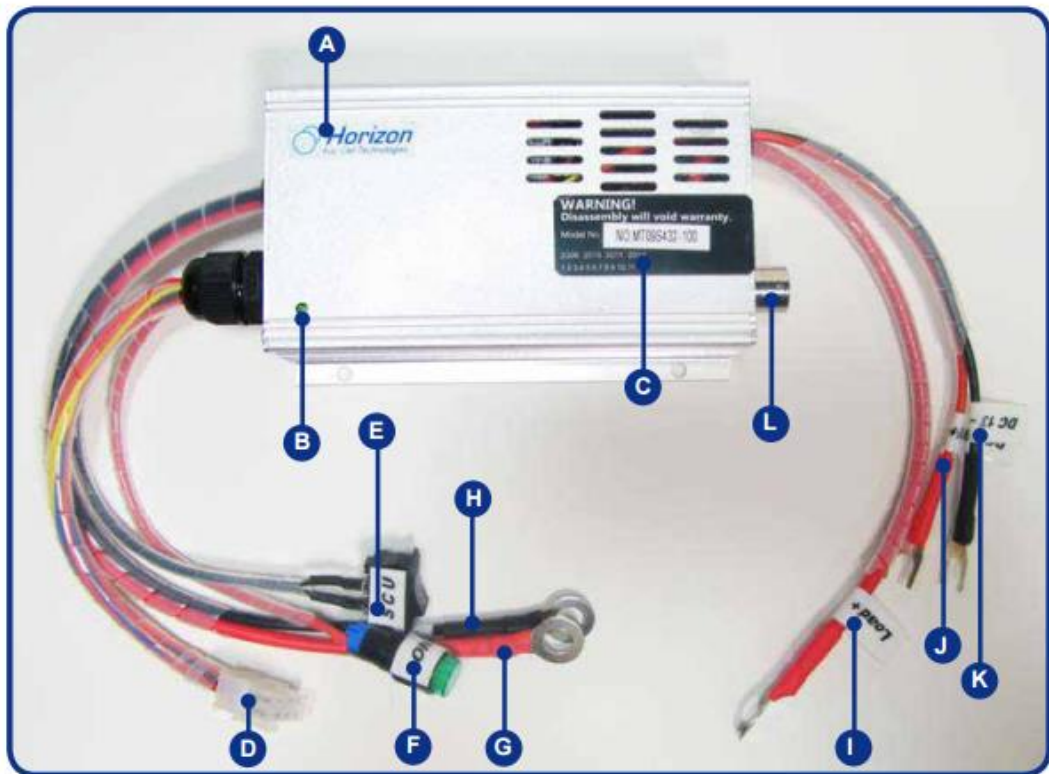
ANEXOS

Anexo1: Partes & Características de la Celda de Combustible

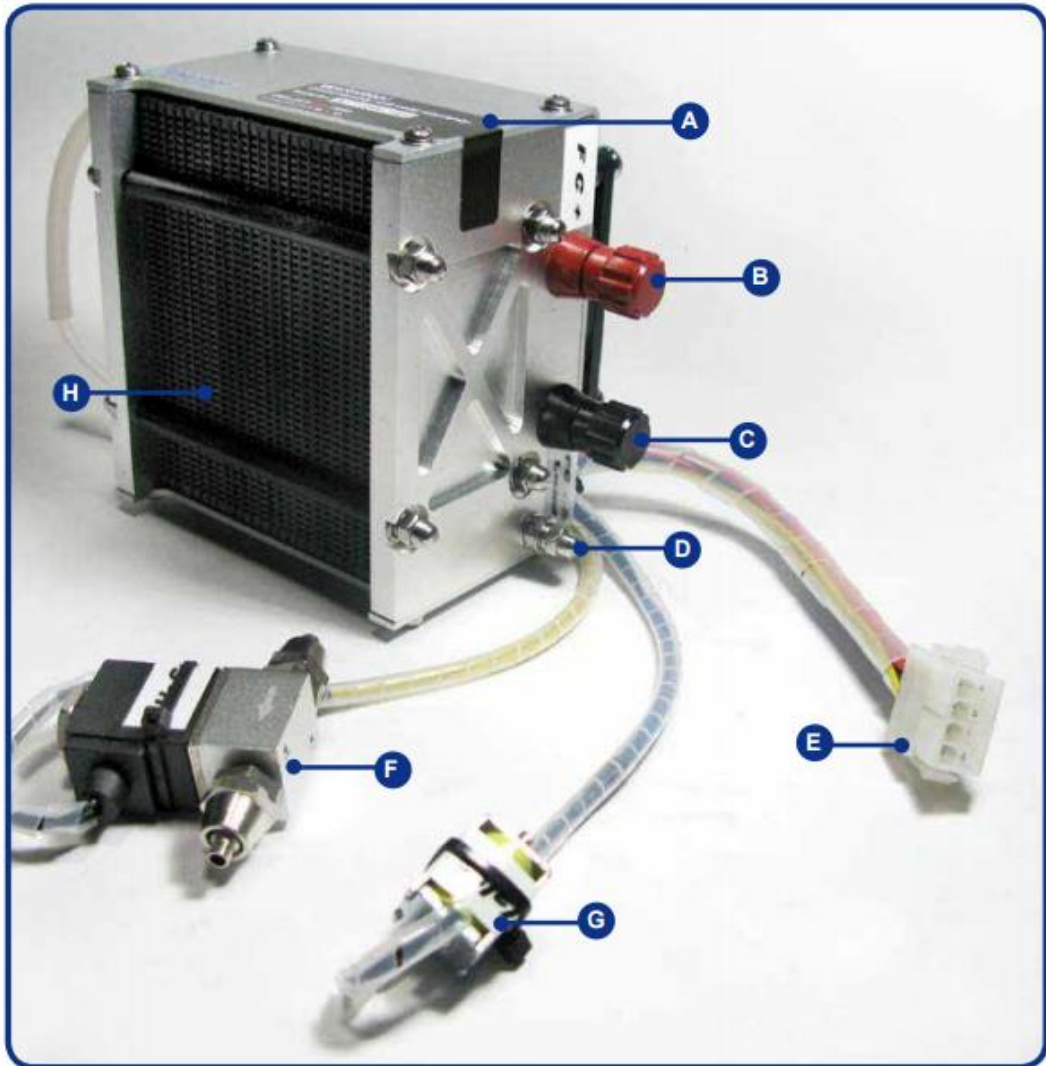


- A: H2 inlet connector**
- B: Blower**
- C: H2 outlet connector**
- D: Silicon tube**

Note: The silicon tube connected between the hydrogen input and hydrogen output is to keep the membrane humidity to maintain the fuel cell stack in best performance. After the stack is finished using, connect the silicon tube between the input and output for keeping the membrane humidity. See FAQ how to maintain the fuel cell stack.



- A: Horizon Logo
- B: LED
- C: Product No.Label
- D: Connect plug
- E: SCU(short circuit units) switch
- F: ON/OFF button
- G: Connect to FC+
- H: Connect to FC-
- I: Connect to Load+
- J: Controller power supply DC 13V+
- K: Controller power supply DC 13V-
- L: LCD connector (optional LCD, not provided)



- A: Warning labels
- B: FC+ connector
- C: FC- & load- connector
- D: Grounding cable connector
- E: Controller multi-connector
- F: H2 supply valve
- G: H2 purge valve
- H: Fuel cell air inlet side

Note: Pictures in the manual are only for reference, takes material object as the standard.

Stack should be placed like this position. Stand on the plastic feet.

The voltage of external power supply is between 12V-14V, the current range is different based on the different stack.

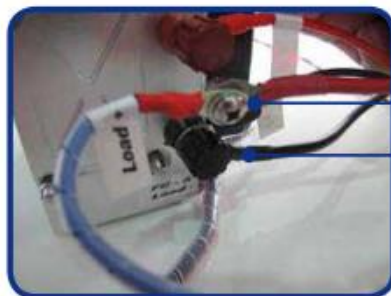


The tube is required to be less than 20cm between stack output and purging valve. The tube connected to the purging valve output is required to be less than 30cm. The inner diameter of the tube is required to be more than 2mm.

Warning: The tube between the hydrogen pressure regulator and the fuel cell gas input is required to be less than 30cm.



The pressure of the hydrogen is between 0.45--0.55Bar.



The load connector, load+, is connected to the "load +" in the controller. The load- is connected to "FC- & Load-" in the stack.

| | |
|----------------------------------|------------------------------|
| Type of fuel cell | PEM |
| Number of cells | 20 |
| Rated Power | 100W |
| Performance | 12V @8.3A |
| H2 Supply valve voltage | 12V |
| Purging valve voltage | 12V |
| Blower voltage | 12V |
| Reactants | Hydrogen and Air |
| External temperature | 5 to 30°C |
| Max. stack temperature | 65°C |
| H2 Pressure | 0.45-0.55bar |
| Hydrogen purity | ≅ 99.995 % dry H2 |
| Humidification | self-humidified |
| Cooling | Air (integrated cooling fan) |
| Stack weight (with fan & casing) | 1290 grams(±50grams) |
| Controller weight | 400 grams(±30grams) |
| Dimension | 11.8cm x 10.4cm x 9.4cm |
| Flow rate at max output* | 1.3 L/min |
| Start up time | ≅ 30S at ambient temperature |
| Efficiency of stack | 40% @ 12V |
| Low voltage shut down | 10V |
| Over current shut down | 12A |
| Over temperature shut down | 65°C |
| External power supply** | 13V (±1V), 5A |

* The flow rate may change with the power output.

** System electronics need external power supply.

*** The Specification is subject to change without notice.

Anexo 2: Costo real de la Micro Central de Reacción Química

| COSTO REAL DEL PROYECTO | | | | |
|---|--------------|-----------|--------------------|--------------------|
| Descripción | cant. | U. | P. Unitario | P. Total |
| Estructura del modulo | 1 | unidad | \$ 150,00 | \$ 150,00 |
| Mesa de modulo y ruedas | 1 | unidad | \$ 90,00 | \$ 90,00 |
| Plancha del modulo | 1 | unidad | \$ 30,00 | \$ 30,00 |
| Pintura | 3 | litros | \$ 25,00 | \$ 75,00 |
| Impresión papel de diseño Tablero | 5 | unidades | \$ 10,00 | \$ 50,00 |
| Vinil transparente | 2 | unidades | \$ 50,00 | \$ 100,00 |
| Pernos | 1 | global | \$ 25,00 | \$ 25,00 |
| Reservorio de agua de 10 litros | 1 | unidad | \$ 25,00 | \$ 25,00 |
| Reservorio de agua de 3 litros | 1 | unidad | \$ 15,00 | \$ 15,00 |
| Reservorio de agua de 0,5 litros | 1 | unidad | \$ 10,00 | \$ 10,00 |
| Luz piloto | 3 | unidades | \$ 1,25 | \$ 3,75 |
| Selector de dos vías | 1 | unidad | \$ 0,85 | \$ 0,85 |
| Borneras jack banana | 50 | unidades | \$ 1,50 | \$ 75,00 |
| Filtro de sedimentos | 1 | unidad | \$ 35,00 | \$ 35,00 |
| Filtro de carbón activado | 1 | unidad | \$ 35,00 | \$ 35,00 |
| Filtro de desmineralización | 1 | unidad | \$ 35,00 | \$ 35,00 |
| Óhmetro | 1 | unidad | \$ 12,00 | \$ 12,00 |
| Válvulas | 2 | unidades | \$ 3,00 | \$ 6,00 |
| Generador de hidrógeno | 1 | unidad | \$ 1.600,00 | \$ 1.600,00 |
| Válvula reguladora (manual) | 1 | unidad | \$ 300,00 | \$ 300,00 |
| Batería 4 Ah | 1 | unidad | \$ 8,00 | \$ 8,00 |
| Inversor 12 VDC - 120 VAC | 1 | unidad | \$ 45,00 | \$ 45,00 |
| Pila de combustible tipo PEM | 1 | unidad | \$ 1.200,00 | \$ 1.200,00 |
| Control de Pila | 1 | unidad | \$ 200,00 | \$ 200,00 |
| Medidor de energía digital | 1 | unidad | \$ 23,00 | \$ 23,00 |
| Medidor de energía analógico | 3 | unidades | \$ 12,00 | \$ 36,00 |
| Toma corriente 120 VAC | 1 | unidad | \$ 3,00 | \$ 3,00 |
| Breaker | 6 | unidades | \$ 10,00 | \$ 60,00 |
| Usb | 4 | unidades | \$ 1,00 | \$ 4,00 |
| Inversor de 120 VAC - 12 VDC | 1 | unidad | \$ 25,00 | \$ 25,00 |
| Transformador de corriente (medición) | 1 | unidad | \$ 6,00 | \$ 6,00 |
| Bomba sumergible para agua | 1 | unidad | \$ 43,00 | \$ 43,00 |
| Manguera transparente 1/2" | 1 | unidad | \$ 5,00 | \$ 5,00 |
| Amarras | 2 | paquete | \$ 3,00 | \$ 6,00 |
| Cable flexible #14 | 1 | global | \$ 50,00 | \$ 50,00 |
| Movilización | 1 | global | \$ 120,00 | \$ 120,00 |
| Terminal de ojo | 120 | unidades | \$ 0,10 | \$ 12,00 |
| Base para terminal | 2 | paquetes | \$ 6,00 | \$ 12,00 |
| Sensor de nivel (electrodos) | 4 | unidades | \$ 33,00 | \$ 132,00 |
| Trámites legales | 1 | global | \$ 400,00 | \$ 400,00 |
| MATERIALES Y EQUIPOS | | | TOTAL | \$ 5.062,60 |
| Instalación, Montaje y Puesta en Operación del Modulo | 1 | global | \$ 1.450,00 | \$ 1.450,00 |
| MANO DE OBRA | | | | \$ 1.450,00 |
| TOTAL | | | | \$ 6.512,60 |

Anexo3: Micro Central de Reacción Química Repotenciada

| COSTO REAL DEL PROYECTO SUSTENTABLE | | | | |
|---|--------------|-----------|--------------------|---------------------|
| Descripción | cant. | U. | P. Unitario | P. Total |
| Estructura del modulo | 1 | unidad | \$ 150,00 | \$ 150,00 |
| Mesa de modulo y ruedas | 1 | unidad | \$ 90,00 | \$ 90,00 |
| Plancha del modulo | 1 | unidad | \$ 30,00 | \$ 30,00 |
| Pintura | 3 | litros | \$ 25,00 | \$ 75,00 |
| Impresión papel de diseño modulo | 5 | unidades | \$ 10,00 | \$ 50,00 |
| Vinil transparente | 2 | unidades | \$ 50,00 | \$ 100,00 |
| Pernos | 1 | global | \$ 25,00 | \$ 25,00 |
| Reservorio de agua de 10 litros | 1 | unidad | \$ 25,00 | \$ 25,00 |
| Reservorio de agua de 3 litros | 1 | unidad | \$ 15,00 | \$ 15,00 |
| Reservorio de agua de 0,5 litros | 1 | unidad | \$ 10,00 | \$ 10,00 |
| Luz piloto | 3 | unidades | \$ 1,25 | \$ 3,75 |
| Selector de dos vías | 1 | unidad | \$ 0,85 | \$ 0,85 |
| Borneras jack banana | 50 | unidades | \$ 1,50 | \$ 75,00 |
| Filtro de sedimentos | 1 | unidad | \$ 35,00 | \$ 35,00 |
| Filtro de carbón activado | 1 | unidad | \$ 35,00 | \$ 35,00 |
| Filtro de desmineralización | 1 | unidad | \$ 35,00 | \$ 35,00 |
| Óhmetro | 1 | unidad | \$ 12,00 | \$ 12,00 |
| Válvulas | 2 | unidades | \$ 3,00 | \$ 6,00 |
| Generador de hidrógeno | 1 | unidad | \$ 1.600,00 | \$ 1.600,00 |
| Compresor | 1 | unidad | \$ 1.300,00 | \$ 1.300,00 |
| Válvula manual reguladora de presión | 1 | unidad | \$ 300,00 | \$ 300,00 |
| Batería 4 Ah | 1 | unidad | \$ 8,00 | \$ 8,00 |
| Inversor 12 VDC - 120 VAC | 1 | unidad | \$ 45,00 | \$ 45,00 |
| Pila de combustible tipo PEM | 1 | unidad | \$ 11.200,00 | \$ 11.200,00 |
| Control de Pila | 1 | unidad | \$ 200,00 | \$ 200,00 |
| Medidor de energía digital | 1 | unidad | \$ 23,00 | \$ 23,00 |
| Medidor de energía analógico | 3 | unidades | \$ 12,00 | \$ 36,00 |
| Toma corriente 120 VAC | 1 | unidad | \$ 3,00 | \$ 3,00 |
| Breaker | 6 | unidades | \$ 10,00 | \$ 60,00 |
| Usb | 4 | unidades | \$ 1,00 | \$ 4,00 |
| Inversor de 120 VAC - 12 VDC | 1 | unidad | \$ 25,00 | \$ 25,00 |
| Transformador de corriente (medición) | 1 | unidad | \$ 6,00 | \$ 6,00 |
| Bomba sumergible para agua | 1 | unidad | \$ 43,00 | \$ 43,00 |
| Manguera transparente 1/2" | 1 | unidad | \$ 5,00 | \$ 5,00 |
| Amarras | 2 | paquete | \$ 3,00 | \$ 6,00 |
| Cable flexible #14 | 1 | global | \$ 50,00 | \$ 50,00 |
| Movilización | 1 | global | \$ 120,00 | \$ 120,00 |
| Terminal de ojo | 120 | unidades | \$ 0,10 | \$ 12,00 |
| Base para terminal | 2 | paquetes | \$ 6,00 | \$ 12,00 |
| Sensor de nivel (electrodos) | 4 | unidades | \$ 33,00 | \$ 132,00 |
| Trámites legales | 1 | global | \$ 400,00 | \$ 400,00 |
| MATERIALES Y EQUIPOS | | | TOTAL | \$ 16.362,60 |
| Instalación, Montaje y Puesta en Operación del Modulo | 1 | global | \$ 1.450,00 | \$ 1.450,00 |
| MANO DE OBRA | | | | \$ 1.450,00 |
| TOTAL | | | | \$ 17.812,60 |

Anexo4: Diagrama de conexiones eléctricas de la Micro Central

