

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**REDISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO  
VERDE PARA USO EN BOMBEO AGRÍCOLA**

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Electrónica y Automatización**

Presentado por:

**Dennys Geovanny Castro Alvarado**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**Año: 2023**

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi madre por su apoyo incondicional siempre y junto a mi hermana ser mi principal motivación para cumplir mis metas y objetivos, a mi abuela, mis tíos, al Sr. Sergio Castillo por ser como un padre para mí, a mis amigos por estar en los buenos y malos momentos, a todos aquellos he mencionado y forman parte de mi vida les dedico este proyecto.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a ESPOL por la experiencia académica, a los profesores que me han compartido sus conocimientos y experiencias, a mi tutor el Msc. Wilton Agila por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto.

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Dennys Geovanny Castro Alvarado y doy mi consentimiento para que la ESPOl realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

---

Autor

## EVALUADORES



.....  
**Ing. Dennys Dick Cortez Alvarez**

.....  
**Ing. Wilton Edixon Agila Gálvez**

## RESUMEN

En Ecuador el precio de los combustibles como la gasolina han aumentado, afectado a la economía del sector vehicular que es el más conocido. Sin embargo, el sector agrícola también se encuentra afectado, debido a los sistemas de riegos que requieren muchas horas de funcionamiento para cumplir con los requerimientos técnicos de los cultivos, por tanto crear un sistema de generación de hidrogeno mediante energías renovables y con un control electrónico, el cual permita al sistema de combustión consumir menos gasolina en un mismo tiempo de trabajo es viable para mejorar la economía del sector agrícola.

Se tomo un modelo de un electrolizador que permite generar hidrogeno de forma simple pero poco óptima, para mejorarlo y de esta forma obtener puntos de máxima eficiencia y utilizarlo con un control digital para que genere hidrogeno según lo requiera el sistema de combustión.

Se mejoro el funcionamiento del electrolizador y además se aplicó un control digital de corriente que permite controlar la cantidad de hidrogeno generado para que trabaje de acuerdo con las características de funcionamiento requeridas, para poder disminuir el uso del combustible en el sistema de combustión en un porcentaje significativo.

La simulación del generador de hidrogeno y pruebas experimentales permitieron obtener resultados favorables dentro del proceso de producción de hidrogeno, mejorando el diseño de un electrolizador para trabajar en puntos de operación específicos permitiendo tener una mayor eficiencia.

**Palabras Clave:** Hidrogeno verde, Control digital, Modelamiento

## **ABSTRACT**

*In Ecuador the price of fuels such as gasoline have increased, affecting the economy of the vehicle sector which is the best known, however, the agricultural sector is also affected, due to irrigation systems that require many hours of operation to meet the technical requirements of crops, creating a hydrogen generation system using renewable energy and with an electronic control, which allows the combustion system to consume less gasoline in the same working time is feasible to improve the economy of the agricultural sector.*

*We took a model of an electrolyze that allows to generate hydrogen in a simple but not optimal way, to improve it and in this way to obtain maximum efficiency points and use it with a digital control to generate hydrogen as required by the combustion system.*

*The design of the electrolyze was improved by applying a digital current control that allows controlling the amount of hydrogen generated to work according to the required operating characteristics, to reduce the use of fuel in the combustion system by a significant percentage.*

*The simulation of the hydrogen generator and experimental tests allowed obtaining favorable results within the hydrogen production process, improving the design of an electrolyze to work in specific operation points allowing to have a higher efficiency.*

*Keywords: Green hydrogen, digital control, Modeling*

# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN .....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
CAPÍTULO 1 .....	12
1.    Introducción .....	12
1.1    Descripción del problema .....	12
1.2    Justificación del problema .....	13
1.3    Objetivos .....	13
1.3.1    Objetivo General .....	13
1.3.2    Objetivo Especifico.....	13
1.4    Marco teórico.....	14
1.4.1    Hidrogeno Verde .....	14
1.4.2    Electrolisis del agua .....	15
1.4.3    Electrodos para electrolisis .....	16
1.4.4    Ley de Faraday de la Electrolisis.....	17
1.4.5    Modelamiento de un electrolizador alcalino.....	17
1.4.6    Uso del hidrogeno como combustible.....	19
1.4.7    Carburador.....	20
1.4.8    Paneles solares .....	21
1.4.9    MATLAB & SIMULINK .....	21



1.4.10	Arduino IDE.....	22
1.4.11	Proteus .....	22
CAPÍTULO 2 .....		24
2.	Metodología.....	24
2.1	Modelamiento y simulación del sistema de energía solar con variación de variables críticas.....	24
2.1.1	Simulación de las curvas de operación del panel solar .....	25
2.1.2	Simulación del sistema de energía solar con un circuito de rectificación. 26	
2.2	Simulación de la ecuación de electrolisis de Faraday.....	28
2.2.1	Simulación de la ecuación de Faraday variando corriente y temperatura 31	
2.2.2	Simulación de la ecuación de Faraday variando área de las placas de los electrodos y temperatura.....	31
2.3	Caracterización del electrolizador.....	33
2.3.1	Funcionamiento y ficha técnica inicial del electrolizador.....	33
2.3.2	Pruebas del electrolizador sin sistema de recirculación de electrolito ...	35
2.3.3	Pruebas aplicando variación de voltaje al electrolizador. ....	35
2.3.4	Prueba para determinar producción de oxihidrógeno .....	36
2.3.5	Método para prueba del electrolizador con sistema de recirculación de electrolito.....	37
2.3.6	Método de medición de temperatura con sensor LM35.....	38
2.3.7	Prueba para variación de flujo con la bomba de recirculación.....	39
2.3.8	Método para calcular producción de hidrogeno y oxígeno.....	40
2.3.9	Prueba del electrolizador con sistema de recirculación y medición de parámetros .....	40
2.4	Rediseño del electrolizador .....	42

2.4.1	Control de corriente y flujo de recirculación.....	44
2.5	Sistema de hidrogeno verde para sistemas de bombeo agrícola.....	48
2.5.1	Dimensionamiento de energía solar necesaria.....	48
2.5.2	Caracterización del sistema de bombeo agrícola .....	49
CAPÍTULO 3 .....		50
3.	Resultados Y ANÁLISIS .....	50
3.1	Simulación del panel solar .....	50
3.1.1	Comportamiento del circuito de rectificación de voltaje del panel solar .	50
3.1.2	Voltaje y corriente del panel solar con variación de temperatura y radiación solar.	51
3.2	Simulación de la electrolisis de Faraday .....	52
3.2.1	Simulación variando corriente y temperatura .....	52
3.2.2	Simulación variando área de las placas y temperatura .....	53
3.3	Prueba del electrolizador sin sistema de recirculación.....	55
3.3.1	Prueba con variación de voltaje .....	55
3.3.2	Prueba de producción de oxihidrógeno .....	56
3.4	Prueba del electrolizador con sistema de recirculación.....	56
3.4.1	Flujo de recirculación versus voltaje de la bomba .....	57
3.4.2	Variación de corriente con respecto a la temperatura .....	57
3.4.3	Flujo de hidrogeno según la potencia consumida.....	58
3.4.4	Corriente en el electrolizador versus flujo de recirculación .....	60
3.4.5	Producción de hidrogeno versus tiempo .....	61
3.5	Control digital .....	61
3.5.1	Control de corriente y flujo de recirculación.....	62
3.5.2	Sensor de temperatura .....	62
3.5.3	Tarjeta electrónica para el control digital .....	63

3.5.4	Análisis de costos del sistema generador de hidrogeno.....	63
3.6	Análisis de la caracterización del sistema de riego.....	64
CAPÍTULO 4 .....		65
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	65
4.1	Conclusiones.....	65
4.2	Recomendaciones.....	66
BIBLIOGRAFÍA .....		67
ANEXOS .....		67

## **ABREVIATURAS**

HHO Oxihidrógeno

Vhho Volumen de Oxihidrogeno

H<sub>2</sub>/W Hidrogeno producido por cantidad de potencia usada.

EES Engineering Equation Solver

PEN Proton Exchange Membrane

## SIMBOLOGÍA

A	Amperios
V	Voltaje
g/cm <sup>3</sup>	Gramos por centímetro cubico
m	Metro
cm <sup>3</sup> /s	Centímetros cúbicos por segundo
g/s	Gramos por segundo
Gl/h	Galones por hora.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ilustración de sistemas generadores de hidrogeno verde. (3 Vectores REGENERATIVE, 2021) .....	15
Figura 1.2 Electrolisis del agua. (Ciencia interectiva y divertida, 2017).....	15
Figura 1.3 Funcionamiento del electrolizador alcalino. (IDEAGREEN, 2021) .....	16
Figura 1.4 Uso del hidrogeno como combustible. (Herlado, 2017).....	19
Figura 1.5 Carburador de gasolina. (Avila, 2021) .....	20
Figura 1.6 Paneles solares térmicos y fotovoltaicos. (SolarPlak, 2020) .....	21
Figura 2.1 Modelo del panel solar en Matlab-Simulink.....	25
Figura 2.2 Pantalla de configuración de parámetros del modelo de panel solar en Simulink.....	26
Figura 2.3 Configuración del bloque Rampa que simula la variación de radiación solar. ....	27
Figura 2.4 Bloques para variar la temperatura de 25°C a 30° en un tiempo de simulación de 1[s].....	27
Figura 2.5 Circuito rectificador de voltaje para panel solar.....	28
Figura 2.6 Diagrama de bloque SCOPE para visualizar variables. ....	28
Figura 2.7 Ingreso de parámetros de funciones de eficiencia de Faraday. ....	30
Figura 2.8 Código para simulación de la ecuación de electrolisis de Faraday variando corriente y temperatura.....	31
Figura 2.9 Código para simulación de la ecuación de electrolisis de Faraday variando el área de los electrodos y temperatura.....	32
Figura 2.10 Foto del electrolizador. ....	33
Figura 2.11 Diagrama del generador de hidrogeno sin sistema de recirculación. ....	35
Figura 2.12 Prueba para determinar cantidad de oxihidrógeno. ....	36
Figura 2.13 Diagrama del generador de hidrogeno con sistema de recirculación. ....	37
Figura 2.14 Código Arduino para medición de temperatura.....	38
Figura 2.15 Acople del sensor de temperatura en el sistema. ....	39
Figura 2.16 Prueba de variación de flujo de la bomba de recirculación. ....	39
Figura 2.17 Foto de las pruebas realizadas. ....	42

Figura 2.18 Control digital del electrolizador. ....	43
Figura 2.19 Diagrama de flujo del funcionamiento del control digital. ....	44
Figura 2.20 Salida PWM filtrada con ciclo de trabajo de 50%. ....	45
Figura 2.21 Amplificador no inversor. ....	46
Figura 2.22 Circuito para control de corriente del electrolizador. ....	47
Figura 2.23 Circuito para control de flujo en la bomba. ....	47
Figura 2.24 Diagrama del funcionamiento del electrolizador en el sistema de bombeo. .....	48
Figura 3.1 Generación de pulsos para el rectificador del panel solar. ....	51
Figura 3.2 Corriente y voltaje del panel solar variando radiación solar y temperatura. .....	51
Figura 3.3 Eficiencia de Faraday vs Temperatura con variación de corriente. ....	52
Figura 3.4 Producción de oxihidrógeno vs Temperatura con variación de corriente. ....	53
Figura 3.5 Eficiencia de Faraday vs Temperatura con variación de área de electrodo. .....	54
Figura 3.6 Producción de oxihidrógeno vs Temperatura con variación de área de electrodo.....	54
Figura 3.7 Corriente vs Voltaje del electrolizador.....	55
Figura 3.8 Volumen de H <sub>2</sub> vs tiempo.....	56
Figura 3.9 Electrolizador en pruebas de funcionamiento. ....	57
Figura 3.10 Flujo de recirculación vs voltaje de la bomba. ....	57
Figura 3.11 Variación de corriente en pruebas del electrolizador.....	58
Figura 3.12 Flujo de H <sub>2</sub> vs potencia. ....	59
Figura 3.13 Corriente del electrolizador vs flujo de recirculación. ....	60
Figura 3.14 Recipiente del electrolito durante la electrolisis.....	61
Figura 3.15 Producción de H <sub>2</sub> vs tiempo en pruebas con recirculación. ....	61
Figura 3.16 Pantalla LCD del control digital. ....	62
Figura 3.17 Tarjeta electrónica de control digital. ....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ficha técnica del panel solar modelo SCL-230P1.....	25
Tabla 2-2 Coeficientes de las funciones de eficiencia de Faraday.....	30
Tabla 2-3 Cantidad de compuestos utilizados para el electrolito 1.....	33
Tabla 2-4 Ficha técnica del electrolizador.....	34
Tabla 2-5 Información de las placas del electrolizador. ....	34
Tabla 2-6 Parámetros de prueba con variación de voltaje. ....	35
Tabla 2-7 Producción de oxihidrógeno prueba sin recirculación. ....	37
Tabla 2-8 Cantidad de compuestos utilizados para el electrolito 2.....	38
Tabla 2-9 Prueba para variación de flujo de recirculación.....	40
Tabla 2-10 Parámetros de las pruebas realizadas.....	41
Tabla 2-11 Comportamiento de la corriente con variaciones de temperatura. ....	41
Tabla 2-12 Producción de oxihidrógeno en las pruebas realizadas. ....	42
Tabla 2-13 Características del transistor TIP33C.....	46
Tabla 2-14 Potencias máxima del sistema.....	49
Tabla 2-15 Prueba de bomba de agua en sistema de riego.....	49
Tabla 3-1 Comparación de eficiencia.....	59
Tabla 3-2 Costo de elementos para el control digital. ....	63
Tabla 3-3 Costo total de implementación.....	64



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador el desarrollo de proyectos que mejoren la economía de un sector y a su vez aporten al medio ambiente cada vez son más notables, tales como producir materiales a partir de los residuos de las frutas, obtener energía mediante procesos químicos, entre muchas otras formas de obtener un tercer proceso que genere un beneficio económico y además disminuir la contaminación ambiental.

La generación de hidrogeno para usarlo como parte del sistema de combustión en vehículos ha tomado fuerza en los últimos años, de tal forma que con un sistema de estos se obtiene un ahorro significativo. Expandir el uso del hidrogeno en otras áreas es el objetivo planteado, el sector agrícola utiliza combustibles en muchos de sus procesos de producción, la maquinaria agrícola es indispensable para la producción dentro del sector agrícola, los sistemas de bombeo son de uso frecuente, por lo cual serán estos quienes entren al proceso de mejora utilizando hidrogeno como parte de su proceso de combustión.

Una de la forma de obtener de hidrogeno es realizando la electrolisis, es un proceso en el cual usando corriente eléctrica y dos electrodos que permitan el paso de electrones entre ambos generen la ruptura de la molécula de agua para separar el hidrogeno y el oxígeno, de forma empírica la generación de hidrogeno se puede lograr con éxito, sin embargo utilizando sistemas de control digital se puede lograr una mayor eficiencia teniendo la posibilidad de controlar parámetros como la corriente que circula entre los electrodos y la temperatura del agua al momento de la electrolisis.

El uso de las energías renovables como fuente de energía para obtener hidrogeno, nos lleva a llamarlo hidrogeno verde, que es la etapa que nos permitirá tener un sistema ecoeficiente, ya que no se utilizaran recursos externos para la energía eléctrica que necesita la electrolisis, que implican un costo económico adicional.

### 1.1 Descripción del problema

El alza del combustible es un proceso que se ha venido dando durante los últimos años de forma continua, los precios de los combustibles han llegado a duplicarse con respecto a años anteriores, los combustibles son pieza fundamental dentro de

la sociedad y la industria, permiten el funcionamiento de los vehículos o incluso sistemas de calderas dentro de una fábrica. Sin embargo, si analizamos fuera del área urbana o industrial, encontramos muchas otras áreas donde el combustible es pieza fundamental, como lo es en el sector agrícola donde se usan sistemas de riego por bobeo con motores a combustión, dentro de los cultivos el sistema de bombeo es importante ya que de esto depende la producción del cultivo y la frecuencia con que se deben realizar los riegos son semanales y por prolongadas horas. Esto implica un alto uso de combustibles que afecta de forma directa a la economía de los agricultores y al medio ambiente, por lo cual ellos han optado por disminuir la frecuencia de los riegos y como consecuencias la producción en los cultivos ha disminuido.

## **1.2 Justificación del problema**

El rediseño de un sistema que permita la generación de hidrogeno mediante el uso de energías renovables, es una de las opciones más viables para la disminución del uso de combustible en un porcentaje significativo o incluso el remplazo total del mismo por el hidrogeno como combustible en caso de motores especiales para sistemas de riego de alto flujo.

Utilizar las energías renovables para contrarrestar temas económicos y de contaminación ambiental es un método positivo y de gran aplicación dentro de los sistemas de combustión, utilizando sistemas de control aplicado podemos lograr la optimización del sistema para generar hidrogeno a tal forma de alcanzar una mayor eficiencia.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema de generación de hidrogeno verde usando energías renovables y reacción electroquímica controlada de forma digital para su implementación en sistemas de bombeo agrícola y disminución de la contaminación.

### **1.3.2 Objetivo Especifico**

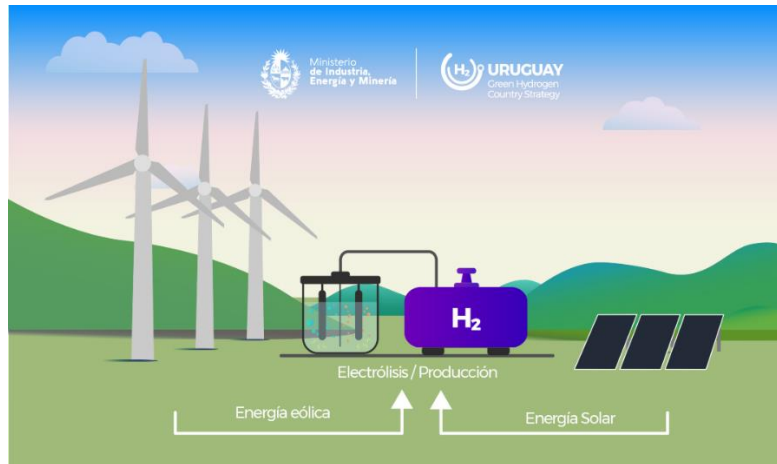
1. Realizar la simulación de la electrolisis de Faraday para la comparación con un electrolizador.

2. Usar un sistema fotovoltaico para alimentación del sistema generador de hidrogeno.
3. Diseñar una tarjeta electrónica para el control digital del generador de hidrogeno.
4. Modelar el generador de hidrogeno para estudiar variables críticas.
5. Analizar cómo se podría realizar la mezcla de gases para optimizar el consumo del combustible.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Hidrogeno Verde**

El hidrógeno renovable, conocido como hidrógeno verde, se obtiene por electrólisis del agua a partir de excedentes de energía renovable. Se trata de un proceso químico que separa los elementos de un compuesto por medio de la electricidad. En otro caso el hidrógeno, cuando se combina con el oxígeno del aire, libera energía química en el proceso, generando vapor de agua como producto de la combustión. Este proceso, conocido como Power-to-Hydrogen o Power-to-Gas, no emite CO<sub>2</sub> y es capaz de transformar el agua en moléculas de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O) usando la electricidad generada por fuentes 100% libres de carbono. Y una de sus mayores potencialidades radica en que puede servir como almacenamiento del excedente de las fuentes renovables, en momentos en que plantas de generación solares o eólicas estén generando por encima de la demanda energética. Teniendo en cuenta el peso creciente de las renovables en el medio energético, el hidrógeno verde aparece como una de las alternativas más ventajosas de cara a almacenar los crecientes excedentes de electricidad. (Gimenez, 2019)

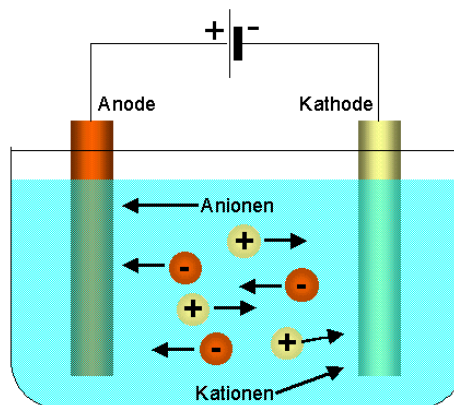


**Figura 1.1 Ilustración de sistemas generadores de hidrógeno verde. (3 Vectores REGENERATIVE, 2021)**

En la Figura 1.1 se muestra de forma descriptiva como se genera el hidrógeno verde con distintas fuentes de energías renovables como puede ser energía eólica o energía solar.

#### 1.4.2 Electrolisis del agua

La electrolisis del agua es una reacción electroquímica que se realiza conectando una fuente de corriente a dos electrodos de platino o acero inoxidable que representan los polos positivo y negativo. Los electrodos se colocan en agua donde el electrodo positivo extrae oxígeno y el electrodo negativo extrae hidrógeno. Así es como se descompone la molécula. (Net InterLab S.A., 2022)



**Figura 1.2 Electrolisis del agua. (Ciencia interactiva y divertida, 2017)**

En la Figura 1.2 se muestra cómo se da el proceso de la electrolisis al separarse una molécula en átomos que según sus cargas son atraídos hacia el ánodo o el cátodo del electrolizador.

### 1.4.3 Electrodo para electrolisis

Los componentes básicos de un electrolizador son comunes para todos los sistemas de electrolisis. Sin embargo, dependiendo del electrolito utilizado, los electrolizadores pueden clasificarse principalmente en: electrolizadores alcalinos, electrolizadores de membrana de intercambio protónico (Tipo PEN, del inglés Proton Exchange Membrane) y electrolizadores de óxido sólido. (IDEAGREEN, 2021)

#### 1.4.3.1 Electrolizadores Alcalinos

Los electrolizadores alcalinos se basan en la inmersión dentro de un electrolito para de esta forma se separan las moléculas de este usando una corriente eléctrica. Los electrodos usados usualmente suelen estar separados por un diafragma que es donde se acumulan los átomos que formaban la molécula del electrolito. (IDEAGREEN, 2021)



**Figura 1.3 Funcionamiento del electrolizador alcalino. (IDEAGREEN, 2021)**

El funcionamiento de un electrolizador alcalino se muestra en la Figura 1.3 en el cual se usa algún tipo de electrolito con una membrana entre los electrodos.

#### 1.4.4 Ley de Faraday de la Electrolisis

Los estudios de Faraday en el siglo XIX realizados a los procesos electroquímicos y termodinámicos le permitieron llegar a la conclusión de que en el proceso de electrolisis la cantidad de sustancia que se oxida o se reduce, es directamente proporcional a la cantidad de energía eléctrica que circula a través del electrolito utilizado, en este caso son los electrones en una corriente eléctrica. (Guzman, s.f.)

##### 1.4.4.1 1ª Ley de Faraday

La masa de la sustancia que mediante la electrolisis se acumula o libera a través de un electrodo es directamente proporcional a la corriente que circula entre los electrodos. (Guzman, s.f.)

##### 1.4.4.2 2ª Ley de Faraday

Para la misma cantidad de electricidad usada, la masa liberada o depositada es proporcional a su masa atómica y al número de electrones intercambiados en cada semirreacción de acuerdo con el electrolito utilizado. (Guzman, s.f.)

$$(m) = \frac{M * Q}{n^{\circ}e^{-} * 96500} \quad (1.1)$$

La ecuación (1.1) nos permite determinar la masa en la electrolisis de Faraday.

- $m$  = Masa de sustancia depositada o liberada (g)
- $M$  = Masa atómica
- $Q$  = Carga que circula por la cuba (C)
- $Q = I \cdot t$  ( $I$ , intensidad de la corriente entre los electrodos en [A];  $t$ , tiempo que se mantuvo la corriente en [s])
- $n^{\circ} e^{-}$  = Número de electrones intercambiados
- 96500 = Constante de Faraday, carga transportada por un mol de electrones (F) C/mol

#### 1.4.5 Modelamiento de un electrolizador alcalino

Los electrolizadores generalmente funcionan mediante un proceso electroquímico y un intercambio de energía, con lo cual sus derivados ( $H_2$ ,  $O_2$ , y  $HHO$ ) debido a la electrólisis del agua son utilizados como combustibles enriquecedores, siendo más limpios que la gasolina y diesel. Se presenta el modelo dinámico de un electrolizador alcalino que utiliza un electrolito ( $KOH$  o  $NaHCO_3$ ) disuelto en agua destilada para acelerar la producción de oxihidrógeno ( $HHO$ ). El modelo muestra

el cambio de fase que ocurre en el interior de la celda electrolítica. Para determinar los valores del modelamiento del electrolizador la fuente citada uso el software EES® para determinar los valores de entalpía, entropía, y energía libre que varían durante la reacción electroquímica. (Erick Daniel Rincón-Castrillo, 2019)

La ley de Faraday establece que la tasa de producción de oxihidrógeno en una celda es proporcional a la transferencia de electrones en los electrodos, es decir la intensidad de corriente suministrada por los electrodos.

$$V_{HHO} = n_f \frac{NI}{zF} \quad (1.2)$$

La ecuación (1.2) representa la producción de hidrogeno en función de la corriente.

- $V_{HHO}$  Volumen de oxihidrógeno generado durante la electrolisis es decir que existe una proporción de 2:1 en la cual se generan dos moléculas de hidrogeno y una de oxígeno.
- $n_f$  Eficiencia de Faraday.
- $N$  Numero de placas del electrolizador.
- $I$  Corriente entre las placas del electrolizador.
- $z$  Numero de electrones intercambiados en la reacción en este caso  $2e^-$ .
- $F$  Constante de Faraday 96500C/mol

La ecuación para representar la eficiencia de Faraday se describe de la siguiente forma:

$$n_F = f_2 \frac{\left(\frac{I}{A}\right)^2}{\left(\frac{I}{A}\right)^2 + f_1} \quad (1.3)$$

La cual esta compuesta por variables como la corriente y la temperatura además de dos funciones que determinan el comportamiento de la termodinámica.

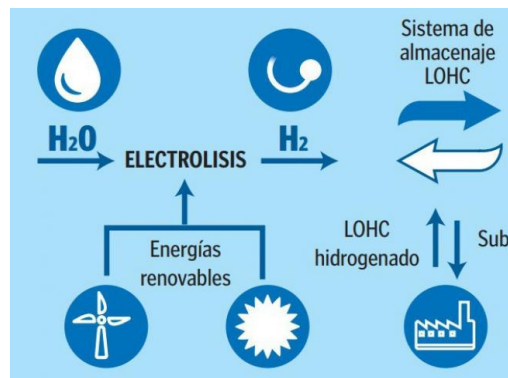
$$f_1(T) = a_{f1} * T + b_{f1} \quad (1.4)$$

$$f_2(T) = a_{f2} * T + b_{f2} \quad (1.5)$$

Las ecuaciones (1.4) y (1.5) las cuales dependen de la temperatura, representan los cambios termodinámicos de un electrolizador, basado en la entalpia del sistema.

#### 1.4.6 Uso del hidrogeno como combustible

El hidrógeno es un elemento en la tabla periódica que más abunda en la naturaleza y se ubica primero en la tabla periódica. Está presente en el 75% de la materia del universo, normalmente en forma de gas. Insípido, incoloro, inodoro, puro y seguro. Sin embargo, el hidrógeno se usa como una fuente de energía primaria como el petróleo entre otros derivados. Este gas hay que producirlo para convertirlo en combustible y se ha convertido en un combustible moderno porque es respetuoso con el medio ambiente y solo emite vapor de agua. (Hyundai, 2020) Sin embargo, el hidrógeno tiene otros usos que pueden contribuir a una actividad humana más respetuosa con el medio ambiente. El hidrógeno necesita celdas de combustible de hidrógeno para producir electricidad. Aquí, el hidrógeno almacenado en el tanque se disocia en la membrana polimérica para combinarse con el oxígeno del aire y produce agua y mucha electricidad. Esta electricidad también se puede usar para iluminar y calentar una casa u oficina, o se puede usar como fuente de electricidad para una fábrica. O simplemente como generador de emergencia adicional para hospitales u otros centros en caso de corte de energía. (Hyundai, 2020)



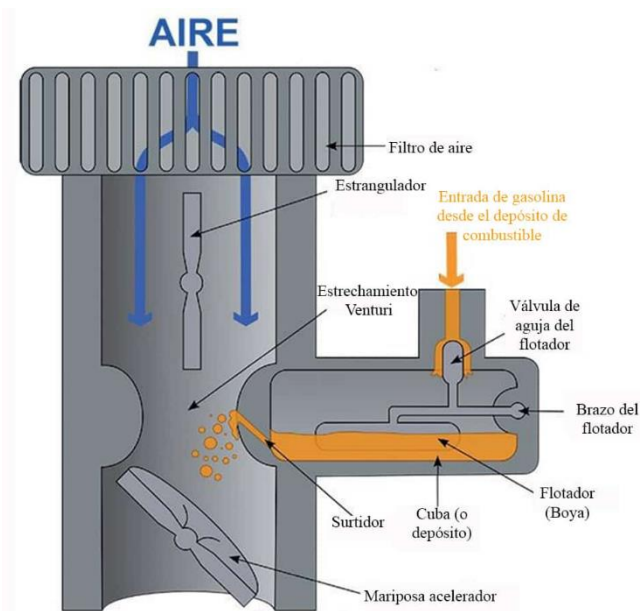
**Figura 1.4 Uso del hidrogeno como combustible. (Herlado, 2017)**

En la Figura 1.4 se muestra el proceso del hidrogeno para ser aplicado en multiples uso, ya sea en la industria o usos en vehiculos, tambien en los motores de combustion.



### 1.4.7 Carburador

Un carburador es un dispositivo usado en motores de combustión el cual se encarga de suministrar al motor la mezcla y cantidad de aire y combustible necesaria en cada momento según como el motor lo requiera. Todo será diferente según los requisitos de aceleración del conductor y la situación. (Avila, 2021)



**Figura 1.5 Carburador de gasolina. (Avila, 2021)**

Hay muchos tipos de carburadores, pero el principio de funcionamiento es el mismo como el que se observa en la Figura 1.5. Básicamente, el sistema de suministro de aceite en un motor de gasolina con carburador consta de un filtro de aire, un múltiple de admisión, un carburador (con todos sus componentes y circuitos internos), válvulas de admisión y cilindros que se comunican con el interior del motor. Gran parte del sistema del carburador se ocupa de los fundamentos de la física y la dinámica de fluidos. (Avila, 2021)

#### 1.4.7.1 Efecto Venturi en el funcionamiento del carburador

Los carburadores funcionan principalmente con el "efecto Venturi". El efecto Venturi consiste en que el fluido en un tubo cerrado circula a cierta velocidad, pero si el tubo se contrae, entonces el fluido aumenta la velocidad y crea resistencia. Tanto es así que puede haber presión negativa (absorción), por lo que, si esta constricción se conecta a otro tubo, se puede aspirar otro fluido. (Avila, 2021)

El flujo de aire proviene del filtro de aire del motor y se dirige a través del tubo de admisión al carburador. Primero pasa la mariposa, que normalmente debería estar abierta, lo que se llama estrangulador. Esta primera mariposa sólo debe cerrarse o cerrarse parcialmente cuando se arranque en frío, ya que esta condición requiere una mezcla muy rica, lo que se puede lograr minimizando el flujo de aire a la entrada del carburador. (Avila, 2021)

El estrangulador de arranque en frío o starter se puede activar manualmente, aunque los carburadores más exitosos lo hacen automáticamente, generalmente con un bimetálico que se inclina y abre o cierra el acelerador. (Avila, 2021)

#### **1.4.8 Paneles solares**

Un panel solar es un dispositivo que utiliza la energía del sol para producir electricidad o calor. Los paneles solares son un dispositivo que se puede utilizar en grandes complejos industriales para generar electricidad para maquinaria y uso personal. Hoy en día, la producción de paneles solares para uso doméstico ha mejorado mucho, encontrando modelos para suministrar energía a todo tipo de viviendas, incluso si están aisladas. (SolarPlak, 2020)



**Figura 1.6 Paneles solares térmicos y fotovoltaicos. (SolarPlak, 2020)**

La Figura 1.6 muestra dos tipos de paneles solares tales como el térmico y fotovoltaico que a pesar de que su forma de generar energía utiliza la misma fuente de energía que es la radiación solar.

#### **1.4.9 MATLAB & SIMULINK**

MATLAB y SIMULINK son software que mediante un ambiente de desarrollo y simulación gráfica es utilizado para hacer procesamiento y análisis de datos,

desarrollo de aplicaciones, modelamientos matemáticos y creación de reportes, en todos los campos de la Ingeniería.

SIMULINK es un entorno completo donde se usan diagramas de bloque para la simulación y procesamiento de información y el diseño basado en modelos matemáticos. Admite la creación, el diseño y la simulación a nivel de sistemas simples o complejos, la generación automática de código para sistemas reales y la prueba y verificación continua de los sistemas embebidos. Simulen ofrece un editor gráfico con variedad de opciones y modelos matemáticos existentes, bibliotecas de bloques personalizables y parametrizables, además solvers para modelar y simular sistemas dinámicos. (MathWorks, s.f.)

#### **1.4.10 Arduino IDE**

Arduino IDE es un software de código abierto que permite a los usuarios escribir y cargar código en un entorno de trabajo en tiempo real. Como este código se va a almacenar en la nube, es un programa que suelen utilizar quienes buscan un nivel extra de redundancia. El sistema es totalmente compatible con cualquier placa de software del fabricante Arduino. (Arduino DOCS, 2023)

El IDE de Arduino puede implementarse en los sistemas operativos Windows, Mac y Linux. La mayoría de sus componentes están escritos en JavaScript para facilitar su edición y compilación. Aunque su intención principal es la de facilitar la escritura de códigos, tiene otras funciones que vale la pena destacar. Está equipado con una herramienta para compartir fácilmente cualquier detalle con otras partes interesadas en el proyecto. Los usuarios pueden modificar los diseños internos y los esquemas cuando lo necesiten. Hay guías de ayuda exhaustiva que resultarán útiles durante el proceso de instalación inicial. También hay tutoriales disponibles para aquellos que no tengan mucha experiencia con la estructura de Arduino. (Arduino DOCS, 2023)

#### **1.4.11 Proteus**

Proteus es un software que permite la creación de proyectos de construcción de equipos electrónicos entre otras aplicaciones con objetivo de aplicar en múltiples funciones y en todas sus etapas: diseño del esquema electrónico, programación del software, construcción de la placa de circuito impreso, simulación de todo el conjunto, depuración de errores, documentación y construcción. (Hubor, s.f.)

Las ventajas que presenta Proteus son notables debido a todas las capacidades de comparación con precios de elementos en el mercado. Con Proteus las fases de prueba no requieren la necesidad de volver a construir nuevos prototipos, con el ahorro de costos y tiempo que ello supone porque dispone de un editor de costos y documentación. (Hubor, s.f.)

Los diferentes módulos disponibles que conforman Proteus se pueden adquirir de forma independiente añadiendo nuevas funcionalidades a medida que aumentan nuestras necesidades de desarrollo y producción de nuestros proyectos, como agregar nuevos elementos. Además, tiene la capacidad de simular cada una de las familias de microprocesadores disponibles también es objeto de adquisición por separado para el desarrollo. De esta manera podemos empezar adquiriendo unas funcionalidades básicas e ir adquiriendo progresivamente nuevas características aprovechando al máximo nuestras inversiones en la herramienta y asegurar al máximo los costes de inversión en el software. (Hubor, s.f.)

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

Basados en el diseño estándar de un generador de hidrogeno, se realizara la caracterización del mismo, para determinar el consumo de energía, la cantidad de producción de hidrogeno, materiales de construcción y rangos de operación, con el fin de relacionarlo con los modelos matemáticos que definen las leyes de Faraday en la electrolisis y la termodinámica, de esta forma se realizó un rediseño y una simulación del generador de hidrogeno controlando variables como la corriente y la temperatura del electrolito.

Al ser un generador de hidrogeno verde, para medir el impacto de la eficiencia la simulación constara con el análisis de la capacidad de captar energía solar y como reconvertirla para generar hidrogeno, a su vez un análisis variando corriente y temperatura para analizar los rangos de operación óptimos para lograr una mayor eficiencia y de esta forma ver como se vería disminuido el consumo de combustible en el sistema de bombeo.

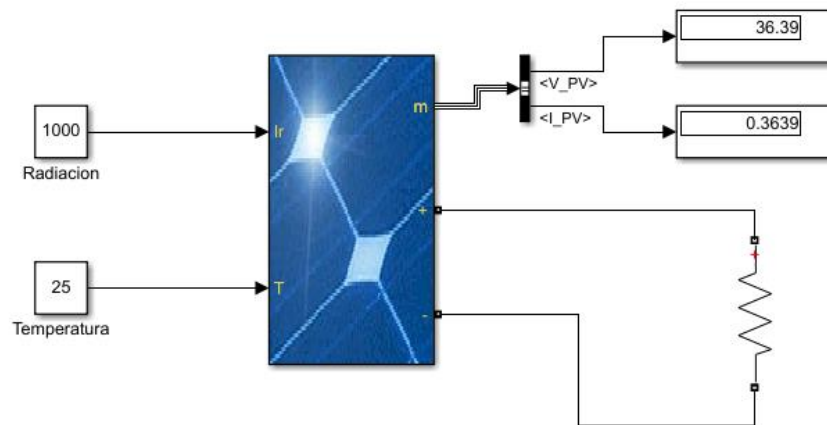
El rediseño del generador de hidrogeno verde constara con un módulo de control digital usando un microcontrolador Arduino UNO, con el cual podremos controlar la cantidad de corriente que circula entre los electrodos, además del control del flujo de recirculación del electrolito a través de las placas del electrolizador, ambos de forma indirecta variando su voltaje.

### 2.1 Modelamiento y simulación del sistema de energía solar con variación de variables críticas.

Para la generación de hidrogeno verde es necesario tener una fuente de energía renovable que genere la cantidad suficiente de carga eléctrica para que la generación del hidrogeno sea optima y suficiente, para aquello se utiliza el modelo de paneles solares que presenta Matlab-Simulink para arreglos de paneles solares en donde se realizó la configuración con respecto a la ficha técnica del panel solar y el tipo de configuración que tengan los mismos, ya sea uno solo, un arreglo en serie o en paralelo.

### 2.1.1 Simulación de las curvas de operación del panel solar

Para realizar la simulación se utilizó un modelo de panel solar en Simulink que permite la simulación del comportamiento de un panel solar en función de la temperatura de la celda medida en °C y la radiación solar medida en (W/m<sup>2</sup>).



**Figura 2.1 Modelo del panel solar en Matlab-Simulink.**

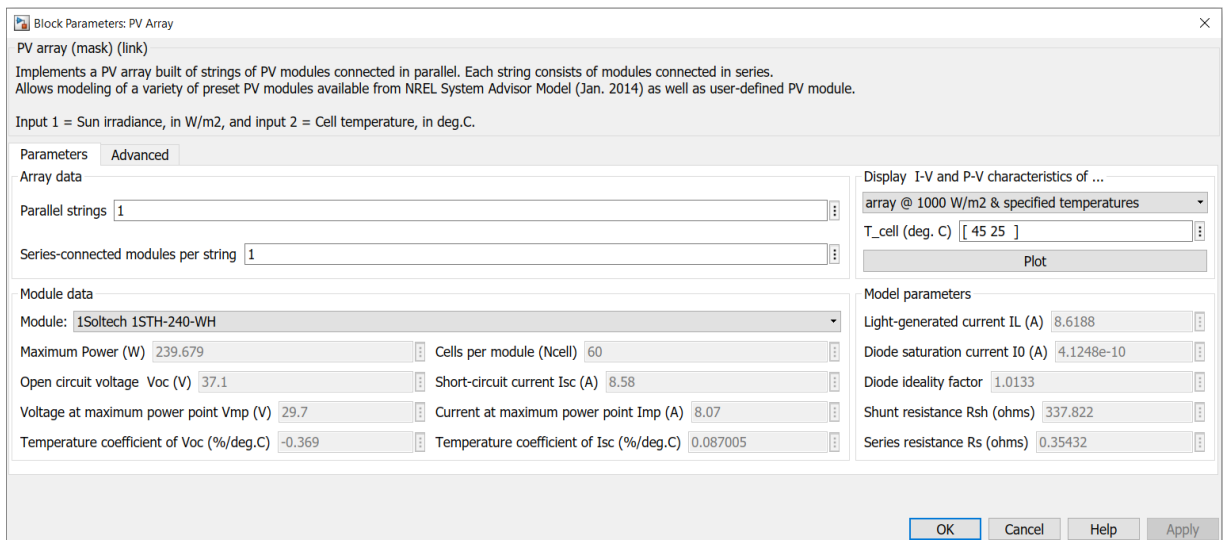
Como se observa en la Figura 2.1 se muestra el diagrama incluido el modelo del panel solar para realizarle las pruebas correspondientes al análisis de variación de radiación solar y temperatura.

Para realizar la simulación se escoge un panel solar con las siguientes características:

**Tabla 2-1 Ficha técnica del panel solar modelo SCL-230P1**

Medida	Modelo: SCL-320P1
Potencia máxima ( $P_{max}$ )[w]	320
Voltaje a potencia máxima ( $V_{mp}$ )[V]	45.7
Intensidad a potencia máxima ( $I_{mp}$ )[A]	9.00
Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ )[V]	37.1
Intensidad de cortocircuito ( $I_{sc}$ )	8.63
Tolerancia de potencia [w]	0/3%

El modelo matemático de Simulink permite obtener las curvas características con los parámetros del fabricante, se realiza la prueba con una carga experimental resistiva de  $10\Omega$ .



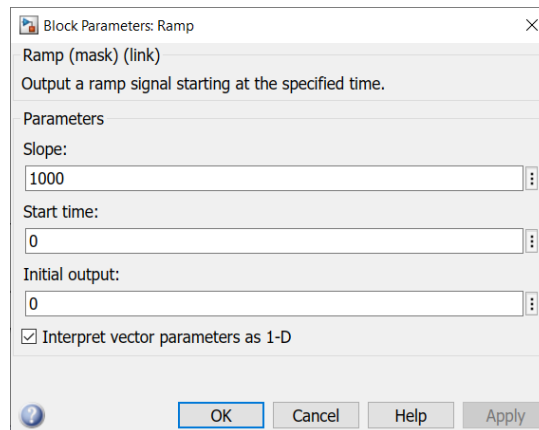
**Figura 2.2 Pantalla de configuración de parámetros del modelo de panel solar en Simulink.**

Como se logra observar en la Figura 2.2 la pantalla de configuración del panel solar, ingresando un arreglo de temperaturas de operación y a una radiación de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  podemos obtener las curvas de operación.

### **2.1.2 Simulación del sistema de energía solar con un circuito de rectificación.**

Para realizar la simulación del panel fotovoltaico se tomará en cuenta la variación de la radiación solar y la temperatura ambiental durante un día despejado y en condiciones climáticas normales, de esta forma se obtiene el comportamiento de la corriente y el voltaje en función de la radiación y la temperatura.

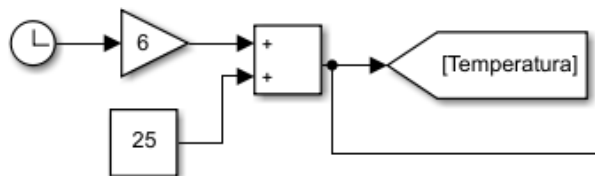
Se realiza las configuraciones con los bloques necesarios para realizar una variación de radiación solar entre  $0(\text{W}/\text{m}^2)$  y  $1000(\text{W}/\text{m}^2)$  durante una simulación de un segundo.



**Figura 2.3 Configuración del bloque Rampa que simula la variación de radiación solar.**

En la Figura 2.3 se observan las configuraciones realizadas en el bloque generador de rampa para obtener los valores deseados.

Para la simulación de la variación de temperatura se toma en cuenta las condiciones climáticas de la costa en donde se utilizará una variación de temperatura entre 25°C y 31°.



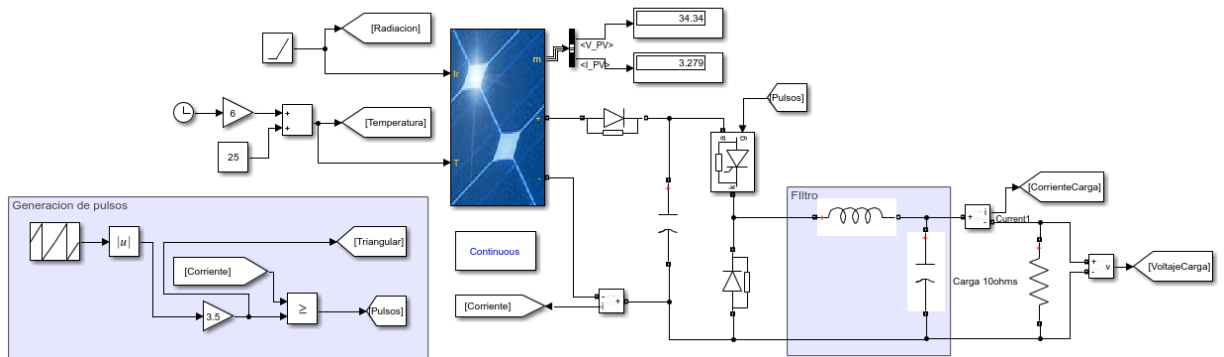
**Figura 2.4 Bloques para variar la temperatura de 25°C a 30° en un tiempo de simulación de 1[s].**

Se observa en la Figura 2.4 dentro de la cual se usó un reloj para ejecutar la acción de cambio de temperatura en función del tiempo de simulación.

Para la simulación de la etapa rectificadora de voltaje se usa un SCR controlado por pulsos, los cuales varían el ancho de pulso según el nivel de la corriente, cuando el nivel de la corriente es bajo se compara con una señal triangular que se encuentra al nivel máximo de corriente que puede dar el panel con una carga de 10Ω de esta forma cuando la corriente es baja el ancho de pulso también, de esta forma se toma energía durante cortos periodos de tiempo evitando la caída del

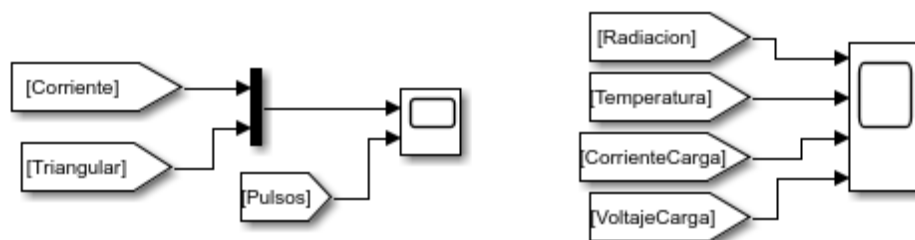


voltaje en la salida del panel, caso contrario de cuando la corriente en la salida del panel es alta y el ancho de pulso se aproxima al 100%.



**Figura 2.5 Circuito rectificador de voltaje para panel solar.**

Como se observa en la Figura 2.6 el circuito cuenta con el control por pulsos el cual permite que el tiristor conmute a un mayor o menor frecuencia dependiente de cuenta corriente entregue el panel solar, de esta forma se evita la caída de voltaje y que el circuito entre en un corto, además de un filtro el cual permite que la salida de corriente y voltaje en la carga sea continua.



**Figura 2.6 Diagrama de bloque SCOPE para visualizar variables.**

En la Figura 2.6 se muestran las variables a graficar en los bloques SCOPE para su posterior análisis.

## 2.2 Simulación de la ecuación de electrolisis de Faraday.

Para realizar la simulación de la electrolisis de Faraday se usó el software de Matlab en el cual mediante el procesamiento de datos y ecuaciones podemos observar el comportamiento de la electrolisis cambiando variables críticas en las cuales se

realizaron simulaciones tomando en cuenta la eficiencia y en otra obviando la eficiencia, para de esta forma determinar el comportamiento del electrolizador. Para realizar esta simulación se usó la ecuación (1.2) en la cual se define que el volumen de oxihidrógeno generado es directamente proporcional a la corriente.

$$V_{HHO} = n_f \frac{NI}{zF} \quad (1.2)$$

En la cual las variables representadas son:

- $V_{HHO}$  Volumen de oxihidrógeno generado durante la electrolisis es decir que existe una proporción de 2:1 en la cual se generan dos moléculas de hidrogeno y una de oxígeno.
- $n_f$  Eficiencia de Faraday.
- $N$  Numero de placas del electrolizador.
- $I$  Corriente entre las placas del electrolizador.
- $z$  Numero de electrones intercambiados en la reacción en este caso  $2e^-$ .
- $F$  Constante de Faraday 96500C/mol

A su vez la eficiencia de Faraday depende de la temperatura, la corriente y el área de los electrodos para, para la simulación se utilizó la ecuación (1.3).

$$n_f = f_2 \frac{\left(\frac{I}{A}\right)^2}{\left(\frac{I}{A}\right)^2 + f_1} \quad (1.3)$$

La Ecuación (1.3) de la eficiencia de Faraday es una relación entre las variables principales para la electrolisis de Faraday como también sus materiales y forma de construcción.

$$f_1(T) = a_{f1} * T + b_{f1} \quad (1.4)$$

$$f_2(T) = c_{f2} * T^2 + d_{f2} * T + e_{f2} \quad (1.5)$$

La ecuación (1.4) y (1.5) según la referencia tomada, resulta de los cambios de entalpia dentro del proceso termodinámico de la electrolisis.

En las ecuaciones anteriores las variables representadas en las ecuaciones son las siguientes:

- $I$  Corriente entre las placas del electrolizador.
- $A$  Área de las placas del electrolizador.
- $T$  Temperatura del electrolito en el electrolizador.

**Tabla 2-2 Coeficientes de las funciones de eficiencia de Faraday.**

Coeficiente	Valor	Unidades
$a_{f1}$	2.5	$\frac{mA^2}{cm^4 \cdot C}$
$b_{f1}$	50	$\frac{mA^2}{cm^4}$
$c_{f2}$	-1.25	$C^{-2}$
$d_{f2}$	0.001	$C^{-1}$
$e_{f2}$	0.88	Adimensional

Los coeficientes de las ecuaciones que forman parte de la eficiencia de Faraday fueron tomados según el modelo que aplica la fórmula y se detallan en la Tabla 2-2.

```

%% Constantes de las funciones de eficiencia de Faraday
%nf=f2*((I/A)^2/(I/A)^2+f1)
%f1=Af1*T+Bf1;
%f2=Cf2*T.^2+Cf2*T+Ef2;
Af1=2.5/1000; %mA^2/cm^4°C
Bf1=50/1000; %mA^2/cm^4
Cf2=-1.25e-5; %°C^-2
Df2=0.001; %°C^-1
Ef2=0.885;
A=0.0049; %m^2 area de las placas


---


%% Constantes de la ecuacion de intensidad suministrada
%vHHO=nf*(N*I)/z*F)
z=2; %Numero de electrones intercambiados en la reaccion H2(g)+O(g)
F=96500; %Valor aproximado de la constante de Faraday
N=6; %Numero de placas

```

**Figura 2.7 Ingreso de parámetros de funciones de eficiencia de Faraday.**

En la Figura 2.7 se muestra el ingreso de los parámetros en Matlab de las funciones que definen el comportamiento de la dinámica del electrolizador.

### 2.2.1 Simulación de la ecuación de Faraday variando corriente y temperatura

Se realizó la simulación de la ecuación de Faraday variando la corriente y la temperatura. En el cual con un lazo for se realizó la simulación con diferente corriente entre 2.77A y 2.80 amperios tomando en cuenta los valores obtenidos en las pruebas realizadas al electrolizador tal como se muestran en la Tabla 2-11 con una variación de 0.006A y en todos los casos la variación de la temperatura entre 25°C y 45°C y se grafica la eficiencia de Faraday y la producción de oxihidrógeno.

```
%% Simulacion variando corriente y temperatura
% Variamos la corriente entre 3.77A y 3.80A con iteraciones cada 0.006A
for I=3.77:0.006:3.80;
    T=25:0.01:45; % Temperatura variable entre 25°C y 45°C
    f1=Af1*T+Bf1;
    f2=Cf2*T.^2+Cf2*T+Ef2;
    nf=f2.*[((I/A).^2/(I/A).^2+f1)];%Funcion de eficiencia de Faraday
    vHHO=nf*(N*I)/(z*F);%Volumen de oxihidrógeno generado
    figure(1)
    plot(T,nf)
    xlabel('Temperatura[°C]')
    ylabel('Eficiencia de Faraday')
    title('Eficiencia de Faraday vs Temperatura con Variacion de Corriente')
    legend('I=3.770A','I=3.776A','I=3.782A','I=3.788A','I=3.794A','I=3.800A')
    grid on
    hold on
    figure(2)
    plot(T,vHHO)
    xlabel('Temperatura[°C]')
    ylabel('Produccion de oxihidrógeno [g]')
    title('Produccion de oxihidrógeno vs Temperatura con Variacion de Corriente')
    legend('I=3.770A','I=3.776A','I=3.782A','I=3.788A','I=3.794A','I=3.800A')
    grid on
    hold on
end
```

**Figura 2.8 Código para simulación de la ecuación de electrolisis de Faraday variando corriente y temperatura.**

La Figura 2.7 muestra el código utilizado para realizar la variación de corriente en la simulación del proceso de electrolisis.

### 2.2.2 Simulación de la ecuación de Faraday variando área de las placas de los electrodos y temperatura

Se realizó la simulación de la ecuación de Faraday variando el área de las placas de los electrodos y la temperatura. En el cual con un lazo for se realizó la simulación áreas diferentes tomando valores entre  $10\text{cm}^2$  y  $50\text{cm}^2$  con una

variación de  $10\text{cm}^2$  y en todos los casos la variación de la temperatura entre  $25^\circ\text{C}$  y  $45^\circ\text{C}$  y se grafica la eficiencia de Faraday y la producción de oxihidrógeno.

```

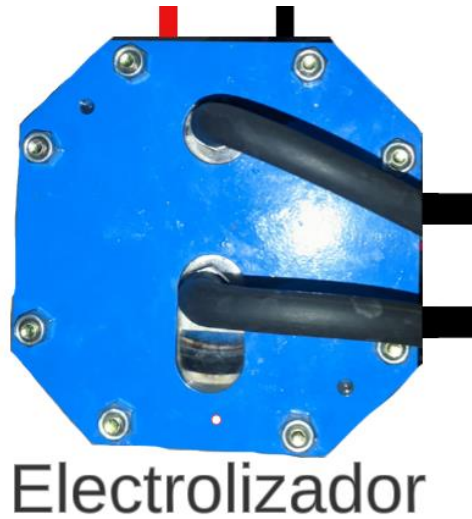
%% Simulacion variando area de las placas y temperatura
% Variamos el area de las placas entre  $10\text{cm}^2$  y  $50\text{cm}^2$ 
for A=10/10000:10/10000:50/10000;
    I=2.77;
    T=25:0.01:45; % Temperatura variable entre  $25^\circ\text{C}$  y  $45^\circ\text{C}$ 
    f1=Af1*T+Bf1;
    f2=Cf2*T.^2+Cf2*T+Ef2;
    nf=f2.*[((I/A).^2/(I/A).^2+f1)];%Funcion de eficiencia de Faraday
    vHHO=nf*(N*I)/(z*F);%Volumen de oxihidrógeno generado
    figure(3)
    plot(T,nf)
    xlabel('Temperatura[°C]')
    ylabel('Eficiencia de Faraday')
    title('Eficiencia de Faraday vs Temperatura con Variacion de area de electrodos')
    legend('A= $10\text{cm}^2$ ', 'A= $20\text{cm}^2$ ', 'A= $30\text{cm}^2$ ', 'A= $40\text{cm}^2$ ', 'A= $50\text{cm}^2$ ')
    grid on
    hold on
    figure(4)
    plot(T,vHHO)
    xlabel('Temperatura[°C]')
    ylabel('Produccion de oxidrogeno [g]')
    title('Produccion de oxihidrógeno vs Temperatura con Variacion de area de electrodos')
    legend('A= $10\text{cm}^2$ ', 'A= $20\text{cm}^2$ ', 'A= $30\text{cm}^2$ ', 'A= $40\text{cm}^2$ ', 'A= $50\text{cm}^2$ ')
    grid on
    hold on
end

```

**Figura 2.9 Código para simulación de la ecuación de electrolisis de Faraday variando el área de los electrodos y temperatura.**

La Figura 2.9 muestra el código utilizado para realizar la variación de área de las placas de los electrodos en la simulación del proceso de electrolisis.

## 2.3 Caracterización del electrolizador



**Figura 2.10 Foto del electrolizador.**

Se tomo un electrolizador de tipo de celda electrolítica alcalina como se muestra en la Figura 2.10 para realizar la caracterización de este y mejorar el modelo propuesto por su fabricante, el funcionamiento del electrolizador está dedicado para ser aplicado en sistemas de motores de combustión como bombas de agua o motos y su funcionamiento es simple, el sistema se alimenta por un voltaje y empieza a generar hidrogeno el cual debe ingresar a la entrada de aire del motor de combustión.

Para realizar la caracterización del electrolizador se realizarán pruebas de su funcionamiento estándar como lo propone el fabricante, así como también haciendo cambios en las variables críticas.

### 2.3.1 Funcionamiento y ficha técnica inicial del electrolizador

La ficha técnica se determina de forma experimental mediante el funcionamiento del electrolizador según lo propuesto por el fabricante, además de las pruebas realizadas. Se alimentó el electrolizador con un voltaje de 12V y se procedió a medir la corriente que circulaba por el electrolizador, el electrolito usado fue la mezcla que recomendaba el fabricante el cual se compone de agua, soda cáustica y bicarbonato de sodio como se muestra en la Tabla 2-3.

**Tabla 2-3 Cantidad de compuestos utilizados para el electrolito 1.**

Electrolito 1
---------------

Compuesto	Cantidad
Hidróxido de sodio NaOH	20[g]
Bicarbonato de sodio NaHCO <sub>3</sub>	20[g]
Agua	3785[ml]

Una vez en funcionamiento el electrolizador presento variaciones de corriente para lo cual se registró la información de las mediciones realizadas y se tomó el valor más alto como corriente máxima los detalles se muestran en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4 Ficha técnica del electrolizador.**

Ficha técnica	
Voltaje de alimentación	12[V]
Corriente máxima	3A]
Electrolito	NaOH+ NaHCO <sub>3</sub> +agua

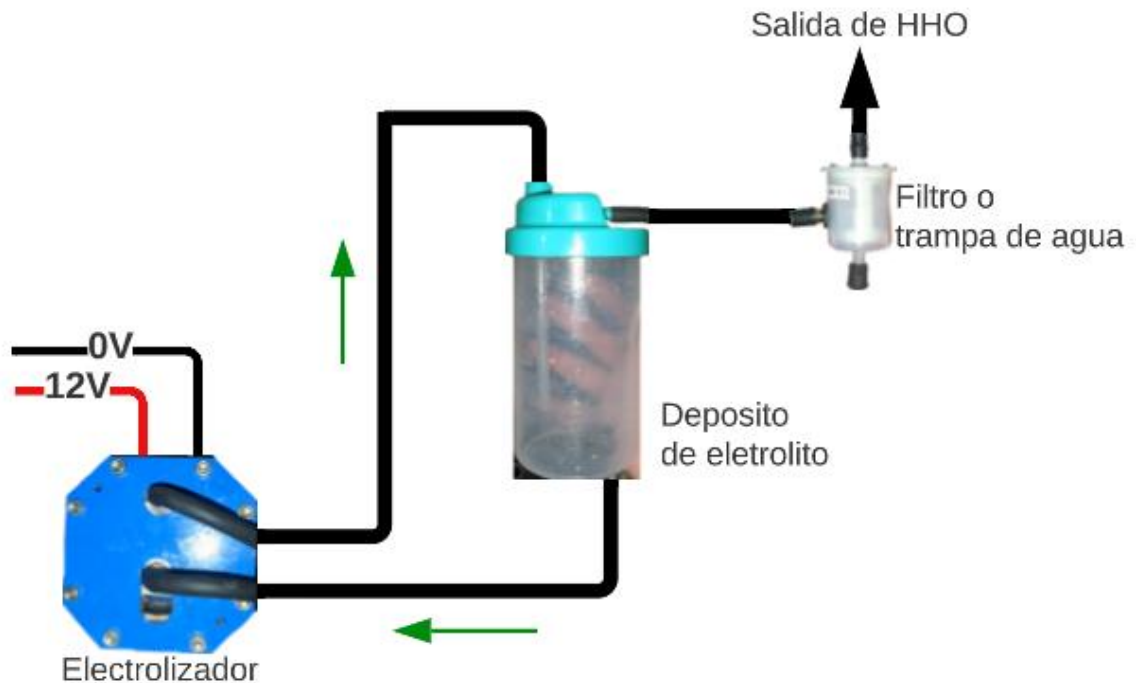
Para determinar la forma y materiales de construcción se utilizó un calibrador vernier y se colocó las medidas aproximadas, también un multímetro en su función de medir continuidad para determinar si las placas dentro del electrolizador estaban conectadas en serie o paralelo, la información se describe en la Tabla 2-5.

**Tabla 2-5 Información de las placas del electrolizador.**

Información de las placas	
Material	Acero
Dimensiones	70[mm]*70[mm]
Espesor	6
Área	4900[mm <sup>2</sup> ]
Numero de placas	6
Tipo de conexión	Paralelo

### 2.3.2 Pruebas del electrolizador sin sistema de recirculación de electrolito

Estas pruebas fueron realizadas de acuerdo con el funcionamiento estándar del electrolizador, el cual al ser alimentado empezó su proceso de electrolisis.



**Figura 2.11 Diagrama del generador de hidrogeno sin sistema de recirculación.**

Como se observa en la Figura 2.11 el sistema generador de hidrogeno aparte del electrolizador cuenta con un depósito de electrolito el cual se encuentra a una altura superior para permitir que el electrolito empiece a recircular luego de un tiempo determinado de funcionamiento mediante los conductos y al generarse el oxihidrógeno gaseoso este subirá hasta el depósito y luego llegar hasta una trampa de agua para permitir que en la salida solo se presente partículas de oxihidrógeno gaseoso.

### 2.3.3 Pruebas aplicando variación de voltaje al electrolizador.

Para realizar la prueba con variación de voltaje se usó ele electrolito 1 descrito en la Tabla 2-3, una batería de 12[V] y una fuente de voltaje, la cual cuenta con 3 salidas de voltaje fijos.

**Tabla 2-6 Parámetros de prueba con variación de voltaje.**



Prueba con variación de voltaje	
Voltaje [V]	Corriente [A]
11.48	1.63
11.35	1.52
5.12	0.34
3.39	0.14

En la Tabla 2-6 se observa los parámetros de corriente obtenidos al variar el voltaje en la entrada de alimentación del electrolizador, el electrolito utilizado fue la disolución con la composición de la Tabla 2-3.

#### 2.3.4 Prueba para determinar producción de oxihidrógeno

Para determinar la producción de oxihidrógeno se utilizó una funda totalmente vacía acoplada a la salida del sistema generador de hidrogeno, la cual luego de eso fue comparada con una funda llena de agua que al tener su densidad de  $1\text{g}/\text{cm}^3$  nos permitió obtener cuantos  $\text{cm}^3$  de oxihidrógeno se había generado aproximadamente.



Figura 2.12 Prueba para determinar cantidad de oxihidrógeno.

Como se observa en la Figura 2.12 se compararon las fundas para luego proceder a pesar en gramos y determinar la cantidad de oxihidrógeno generada.

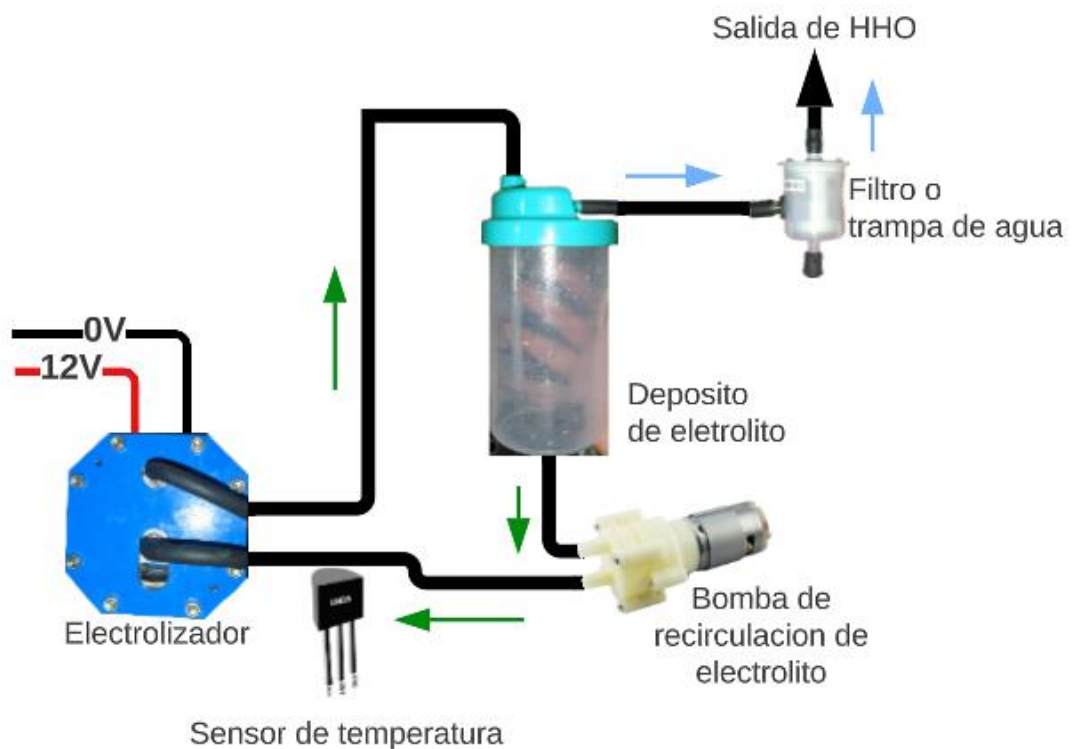
**Tabla 2-7 Producción de oxihidrógeno prueba sin recirculación.**

Producción de oxihidrógeno	
Volumen	286[cm <sup>3</sup> ]
Tiempo	1440[s]
Flujo de HHO	0.1986[cm <sup>3</sup> /s]

En la Tabla 2-7 se describe el tiempo el cual fue medido con un cronometro hasta el momento de tomar la muestra de oxihidrógeno generado.

### 2.3.5 Método para prueba del electrolizador con sistema de recirculación de electrolito.

Para realizar estas pruebas se usó un sistema de recirculación al sistema generador de hidrogeno para permitir que el electrolito recircule desde el primer instante en que se pone en marcha el sistema.



**Figura 2.13 Diagrama del generador de hidrogeno con sistema de recirculación.**

En la Figura 2.13 se observa que además de la bomba para permitir la recirculación del electrolito se agregó un sensor de temperatura LM35 que nos entrega 10mV/°C esta señal de voltaje fue medida con un Arduino1 y mostrada en el monitor serial del programa ArduinoIDE.

Se uso un electrolito diferente para realizar las pruebas del electrolizador con flujo de recirculación el cual se detalla en la Tabla 2-8.

**Tabla 2-8 Cantidad de compuestos utilizados para el electrolito 2.**

Electrolito 2	
Hidróxido de sodio NaOH	20[g]
Agua	1000[ml]

El electrolito 2 permite una mayor conductividad entre las placas, ya que tiene una mayor concentración.

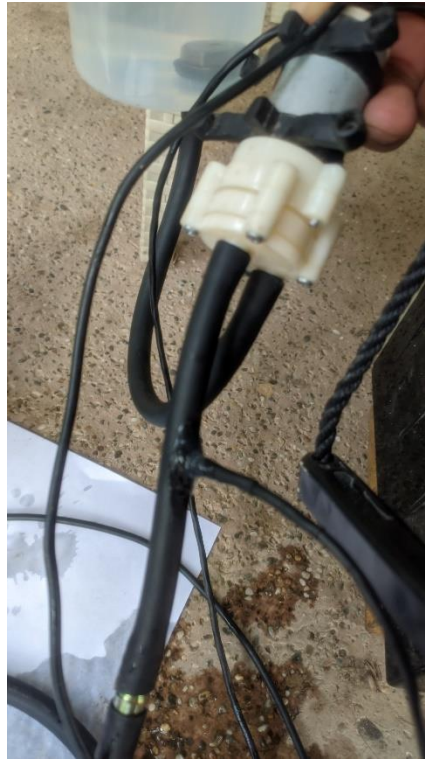
### 2.3.6 Método de medición de temperatura con sensor LM35

```
int temp = 0;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  float gradosC;
  gradosC = (5.0 * analogRead(temp) * 100.0) / 1024;

  Serial.print("Medidas actual\n");
  Serial.print("C: ");
  Serial.print(gradosC);
  delay(2000);
}
```

**Figura 2.14 Código Arduino para medición de temperatura.**

Para la medición de la temperatura se usó el código de la Figura 2.14, el módulo de Arduino nos entrega un valor de 1024 para lectura de 5V en sus entradas analógicas, de esta forma en el código se usó una regla de tres para convertir ese valor leído en un valor de temperatura.



**Figura 2.15 Acople del sensor de temperatura en el sistema.**

Para que el sensor de temperatura pueda censar el valor de temperatura del electrolito fue insertado dentro de una de las mangueras como se muestra en la Figura 2.15 de tal forma que no obstruya la recirculación del electrolito.

### **2.3.7 Prueba para variación de flujo con la bomba de recirculación.**

Para la bomba de recirculación se varió el flujo directamente variando el voltaje para los cual se procedió a variar el voltaje y determinar en qué tiempo llenaba un recipiente marcado en un litro de agua como se muestra en la Figura 2.16.



**Figura 2.16 Prueba de variación de flujo de la bomba de recirculación.**

En las pruebas realizadas se tomó medición de corriente, voltaje y tiempo, de esta forma se obtuvo todos los parámetros del comportamiento de la bomba según la variación del voltaje.

**Tabla 2-9 Prueba para variación de flujo de recirculación.**

Variación de flujo de recirculación			
Prueba	Voltaje	Corriente	Flujo
Flujo 1	12[V]	0.14[A]	33.33[ml/s]
Flujo 2	5[V]	0.09[A]	12.82[ml/s]
Flujo 3	3.3[V]	0.05[A]	6.45[ml/s]

Como se observa en la Tabla 2-9 con la posibilidad de variar el flujo de recirculación se aplicó este cambio en las pruebas para determinar variaciones de temperatura y corriente.

### 2.3.8 Método para calcular producción de hidrogeno y oxígeno.

Para determinar la cantidad de hidrogeno y oxigeno obtenida durante la electrolisis se toma en cuenta la cantidad total de oxihidrógeno obtenida en las pruebas realizadas, en la electrolisis se produce la separación de la molécula de agua, es decir que se genera un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrogeno.

$$V_{HHO} = V_{H_2} + V_O \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1) observar que el volumen total del oxihidrógeno este compuesto por 3 átomos en total de esta forma se determina lo siguiente:

$$V_{H_2} = \frac{2}{3} V_{HHO} \quad (2.2)$$

$$V_O = \frac{1}{3} V_{HHO} \quad (2.3)$$

Como podemos observar en la ecuación (2.2) y (2.3), determinar la cantidad de hidrogeno y oxigeno no es compleja ya que dentro del oxihidrógeno solo están ambos elementos.

### 2.3.9 Prueba del electrolizador con sistema de recirculación y medición de parámetros

Para realizar estas pruebas se usó el diagrama de la Figura 2.13 además de un multímetro en su función de amperímetro conectado entre la entrada de alimentación del electrolizador para medir la corriente.

**Tabla 2-10 Parámetros de las pruebas realizadas.**

Pruebas con sistema de recirculación				
Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Voltaje= 11.30[V]	Voltaje= 11.30[V]	Voltaje= 11.30[V]	Voltaje= 5[V]	Voltaje= 5[V]
Corriente promedio= 2.8346[A]	Corriente promedio= 2.7750[A]	Corriente promedio= 2.7515[A]	Corriente promedio= 2.81[A]	Corriente promedio= 2.82[A]
Flujo de recirculación= 33.33[ml/s]	Flujo de recirculación= 12.82[ml/s]	Flujo de recirculación= 6.45[ml/s]	Flujo de recirculación= 33.33[ml/s]	Flujo de recirculación= 12.82[ml/s]

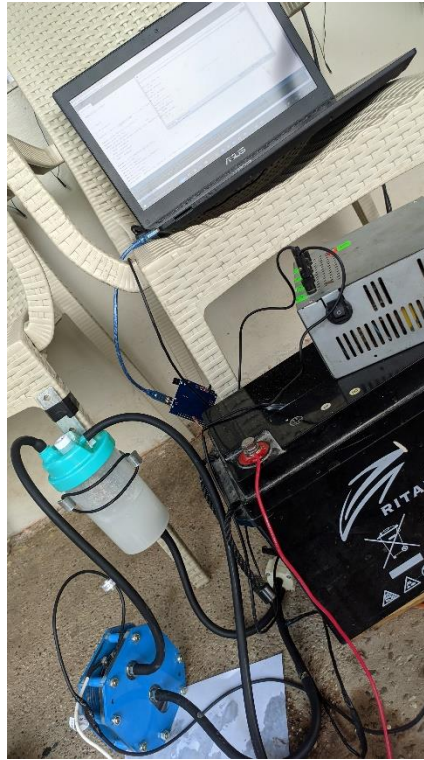
Como se observa en la Tabla 2-10 se varían parámetros como el flujo de recirculación, el voltaje de alimentación y a partir de estas variables se estudia el comportamiento de la corriente y la temperatura en el electrolizador.

Para tomar datos se tomó en cuenta variaciones considerables de temperatura de esta forma se registró la corriente en el electrolizador a determinada temperatura.

**Tabla 2-11 Comportamiento de la corriente con variaciones de temperatura.**

Comportamiento de la corriente con variaciones de temperatura									
Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5	
A	°C	A	°C	A	°C	A	°C	A	°C
2.93	29.79	2.81	31.74	2.88	23.25	0.82	28.81	0.76	29.30
2.90	30.76	2.81	33.20	2.82	31.74	0.82	30.76	0.75	29.79
2.88	31.74	2.79	33.22	2.81	32.23	0.82	31.35	0.74	30.77
2.85	32.71	2.79	33.60	2.76	32.71	0.82	31.74	0.74	31.25
2.84	33.20	2.78	33.71	2.75	32.75	0.81	32.23	0.73	31.54
2.83	34.18	2.78	34.20	2.74	33.20	0.81	32.64	0.72	31.60
2.83	34.20	2.78	34.64	2.73	33.26	0.80	33.20	0.72	31.64
2.82	34.64	2.77	34.67	2.73	33.69	0.80	33.70	-	-
2.80	35.64	2.76	35.16	2.73	34.07	-	-	-	-
2.80	36.13	2.76	36.13	2.71	34.18	-	-	-	-
2.80	36.62	2.75	36.62	2.71	34.19	-	-	-	-

Como se muestra en la Tabla 2-11 se realizaron varias tomas de datos, con excepción de las dos últimas pruebas que tienen menos información ya que el proceso de electrolisis fue más lento para dichas pruebas.



**Figura 2.17 Foto de las pruebas realizadas.**

Como se observa en la Figura 2.17 se encuentran todas las conexiones para realizar las pruebas y la toma de datos.

**Tabla 2-12 Producción de oxihidrógeno en las pruebas realizadas.**

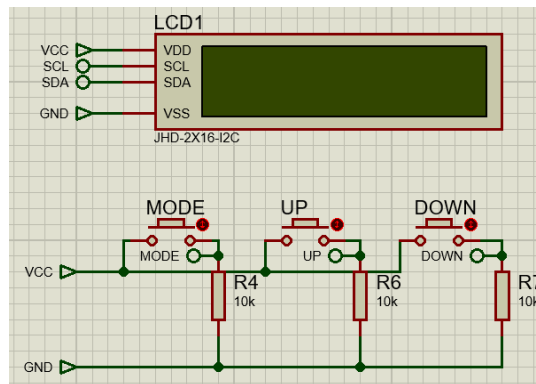
Producción de oxihidrógeno	
Prueba 1	0.9569[cm <sup>3</sup> /s]
Prueba 2	1.0086[cm <sup>3</sup> /s]
Prueba 3	0.9798[cm <sup>3</sup> /s]
Prueba 4	0.2132[cm <sup>3</sup> /s]
Prueba 5	0.2000[cm <sup>3</sup> /s]

Para determinar la producción de oxihidrógeno se usó el método de la Figura 2.12 y los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 2-12.

## **2.4 Rediseño del electrolizador**

Para el rediseño del electrolizador se tomó en cuenta las pruebas realizadas además del comportamiento de este al cambio de variables como corriente y flujo de recirculación, para controlar todas estas variables se realiza un control digital y analógico usando microcontrolador Arduino 1, una pantalla LCD de 16x2 para

mostrar la información, además de pulsadores para parametrizar las variables a controlar. Para realizar la simulación y pruebas del control digital se utilizó el software Proteus.

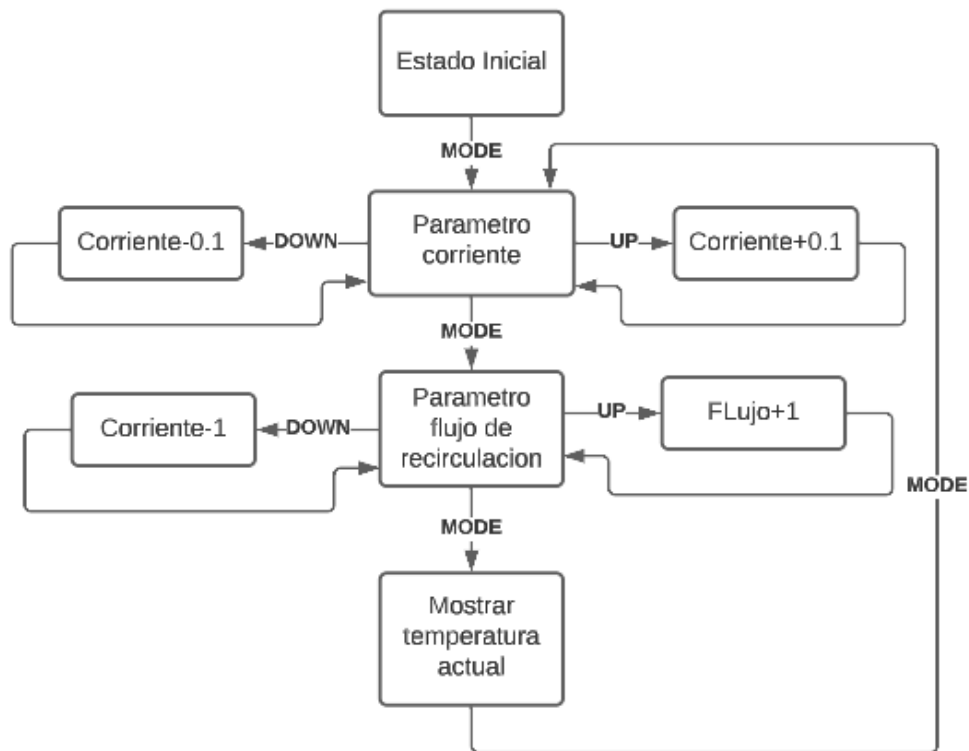


**Figura 2.18 Control digital del electrolizador.**

Como se observa en la Figura 2.18 el control digital cuenta con 3 botones para controlar e interactuar con los diferentes parámetros.

El botón MODE permite cambiar de parámetro a controlar como la corriente y el flujo de recirculación, además de mostrar variables de interés como la temperatura del electrolito, el botón UP y DOWN permiten aumentar o disminuir la corriente y el flujo de recirculación.





**Figura 2.19 Diagrama de flujo del funcionamiento del control digital.**

Como se observa en el diagrama de bloques mostrado en la Figura 2.19 del funcionamiento del control digital, se describe el proceso de control y manejo de las variables.

#### **2.4.1 Control de corriente y flujo de recirculación.**

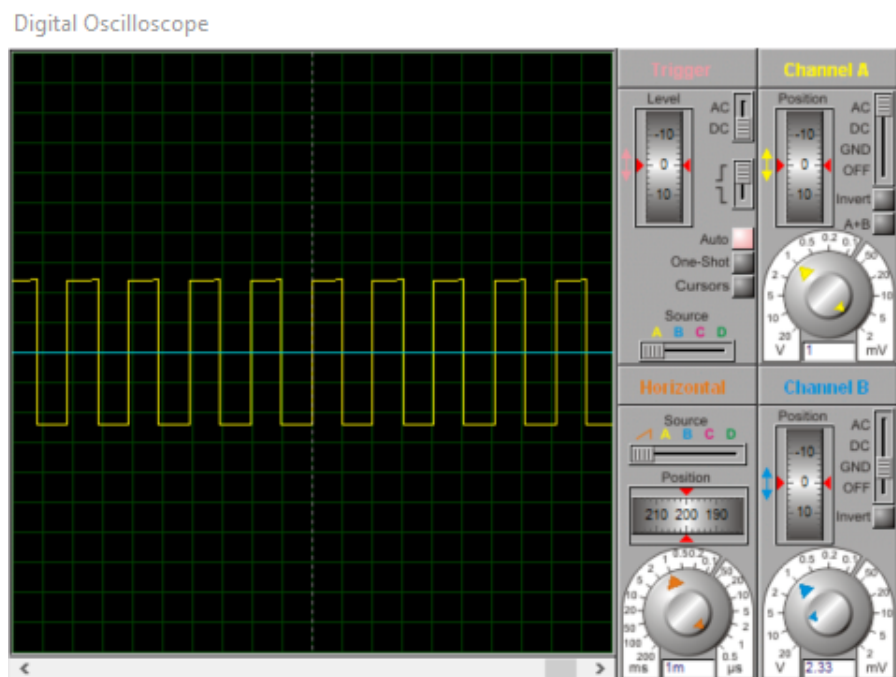
Para el control de corriente y flujo de recirculación se usan las salidas de PWM del microcontrolador Arduino y el control mediante los botones de parametrización, como se observa en el diagrama de flujo cada vez que se pulsa el botón de UP la corriente aumenta en 0.1 y cada que se pulsa el botón DOWN la corriente disminuye en 0.1, en el caso del flujo de recirculación el valor aumenta o disminuye en una unidad, además que mediante programación la corriente está limitada entre 0[A] y 3[A], y el flujo de recirculación entre 0[ml/s] y 33[ml/s] esto tomando en cuenta los valores de corriente máxima obtenidos en las pruebas con el sistema de recirculación y el valor máximo de recirculación que permite la bomba.

La frecuencia del PWM de Arduino es de 0.5[ms] de tal forma que se varía el porcentaje del ciclo de trabajo entre 0% y 100% escribiendo en la salida analógica un valor entre 0 y 255 respectivamente.

$$Salida_{PWM} = \frac{SetPoint}{3} * 255 \quad (2.4)$$

Se uso la ecuación (2.4) para determinar el porcentaje del ciclo de trabajo en el PWM.

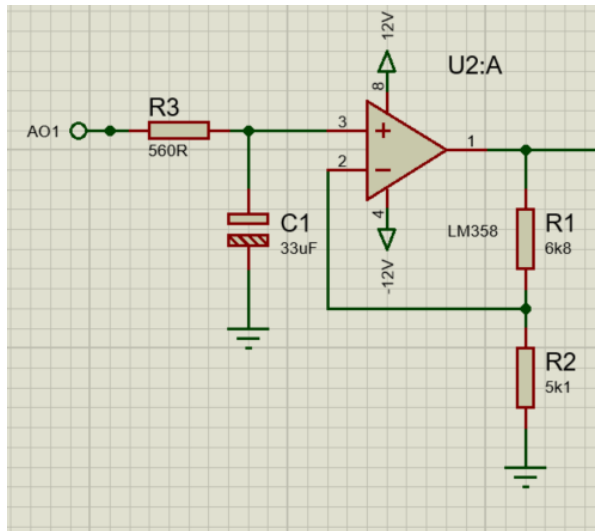
La salida PWM debe ser filtrada para que se convierta en una señal de voltaje continuo, para esto se usa un filtro RC, con valores de R=560Ω y C=33uF y esto nos permite tener en la salida un voltaje de 0[V] a 5[V] continuo.



**Figura 2.20 Salida PWM filtrada con ciclo de trabajo de 50%.**

Como se observa en la Figura 2.20 el filtro cumple con su función de entregar una señal de voltaje DC.

Para el control del electrolizador y la bomba ambos necesitan variar el voltaje en su entrada entre 0[V] y 12[V] esto se logra con un OPAM funcionando como amplificador no inversor.



**Figura 2.21 Amplificador no inversor.**

Para determinar la ganancia del amplificador mostrado en la Figura 2.21 se utiliza el voltaje máximo en la salida del filtro que es 5[V] y el voltaje máximo deseado que es 12[V].

$$A = \frac{12}{5} = 2.4 \quad (2.5)$$

En la ecuación (2.5) observamos que la ganancia deseada es de 2.4, la cual se debe lograr con los valores de resistencias en el amplificador no inversor.

$$A = V_i * \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \rightarrow 2.4 = \frac{R_f}{R_i} + 1 \quad (2.6)$$

$$R_f = 6.8K\Omega \text{ y } R_i = 5.1K\Omega \quad (2.7)$$

En las ecuaciones (2.6) y (2.7) se determina la ganancia requerida y en los valores que deben tener las resistencias tomando en cuenta valores comerciales.

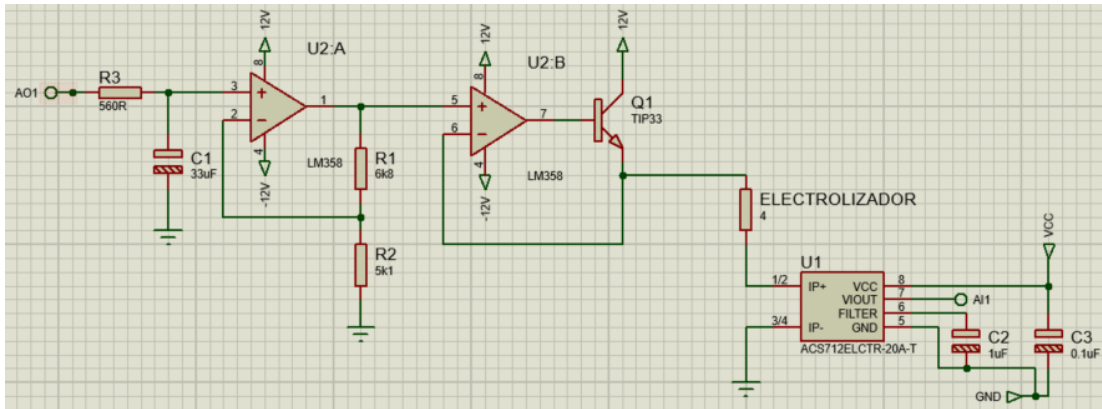
Una vez obtenido la salida de voltaje entre 0[V] y 12[V] se necesita un amplificador de corriente, ya que la salida de corriente del OPAM solo admite hasta 20mA máximo, para esto se coloca un transistor BJT TIP33C con las siguientes características:

**Tabla 2-13 Características del transistor TIP33C.**

TIP33	
Corriente	10[A]
Voltaje	100[V]

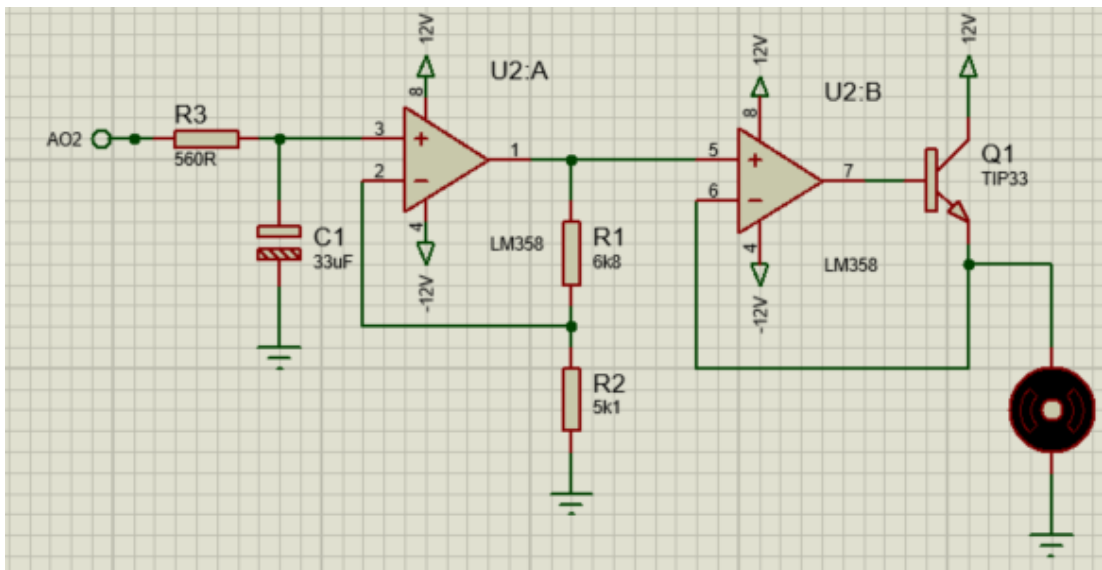
Potencia	80[W]
----------	-------

Una vez acoplado al circuito el transistor con las características descritas en la Tabla 2-13 se puede lograr un control de voltaje y corriente tanto en la bomba como en el electrolizador.



**Figura 2.22 Circuito para control de corriente del electrolizador.**

En la Figura 2.22 se observa el esquemático completo del control de corriente para el electrolizador, en el cual se encuentra un sensor de corriente para mostrar en la pantalla LCD el valor deseado y el valor actual.

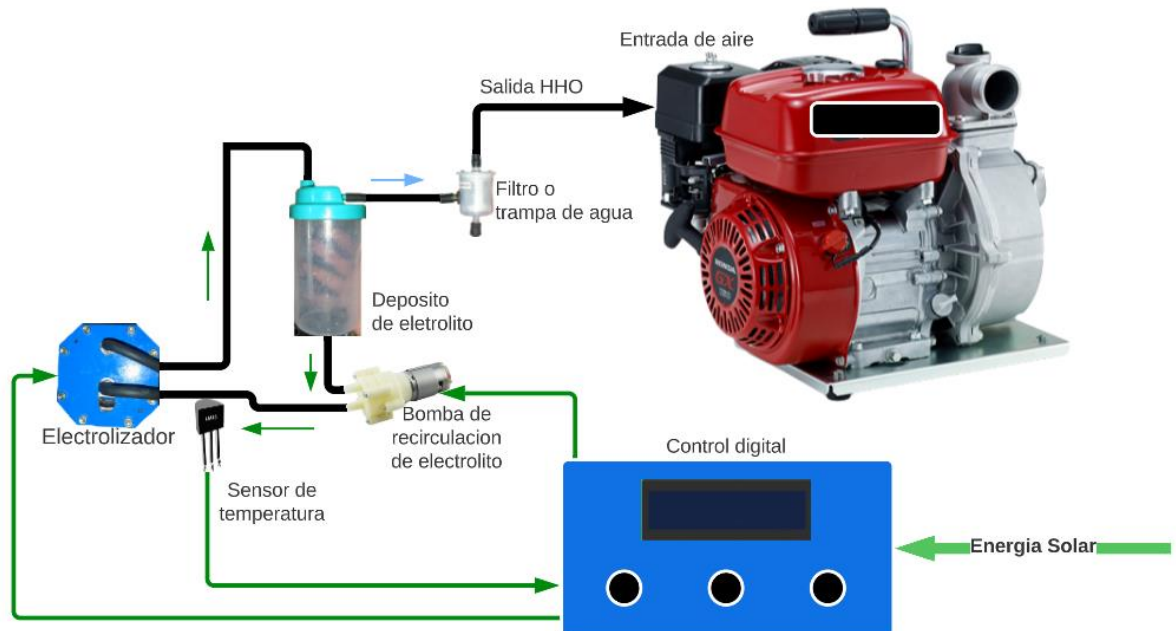


**Figura 2.23 Circuito para control de flujo en la bomba.**

En la Figura 2.23 se observa el circuito para control de voltaje en la bomba.

## 2.5 Sistema de hidrogeno verde para sistemas de bombeo agrícola

Se propone un sistema de recolección de energía solar para utilizarlo en el electrolizador y generar hidrogeno el cual ingresa a la entrada de aire del motor de combustión y de esta forma se logrará aumentar en un porcentaje la velocidad del motor sin necesidad de acelerarlo.



**Figura 2.24 Diagrama del funcionamiento del electrolizador en el sistema de bombeo.**

Como se observa en la Figura 2.24 muestra el sistema completo del funcionamiento del electrolizador en el sistema de bombeo agrícola.

### 2.5.1 Dimensionamiento de energía solar necesaria

Para realizar el cálculo de la energía solar necesaria para el funcionamiento del sistema generador de hidrogeno con control digital se tomó en cuenta la potencia máxima de los equipos eléctricos que componen el sistema, en el caso del electrolizador se toma la potencia máxima presentada en la prueba 2.

$$P = V * I \quad (2.8)$$

La ecuación (2.8) determina la potencia.

**Tabla 2-14 Potencias máxima del sistema.**

Potencia	
Control digital	0.5[W]
Electrolizador	31.35[W]
Bomba	1.68[W]

Para determinar la potencia total se procede a sumar todas las potencias y multiplicar por un factor de 1.25 para darle un margen del 25% a la potencia y evitar caídas de tensión en el caso se un aumento de carga.

$$P_{total} = (0.5 + 31.35 + 1.68) * 1.25 = 41.375[W] \quad (2.9)$$

La ecuación (2.9) determina la potencia total que consume el sistema con un margen de seguridad del 25%.

Para determinar la potencia requerida por horas se asume una jornada de 8 horas de trabajo.

$$Consumo = P_{total} * Horas = 41.37 * 8 = 330.96Wh \quad (2.10)$$

Como se determinó en la ecuación (2.10) se requiere un panel solar que pueda entregar 330Wh.

## 2.5.2 Caracterización del sistema de bombeo agrícola

Para realizar la caracterización de la bomba de agua por combustión se tomó en cuenta un día de riego completo en un cultivo de cacao en un sistema de riego por aspersores, tomando en cuenta cuanto combustible se le coloco para cumplir con la jornada de trabajo

**Tabla 2-15 Prueba de bomba de agua en sistema de riego.**

Bomba de agua de combustión	
Tiempo de trabajo	8 horas
Gasolina consumían	3 galones
Caudal	45 m3/h

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

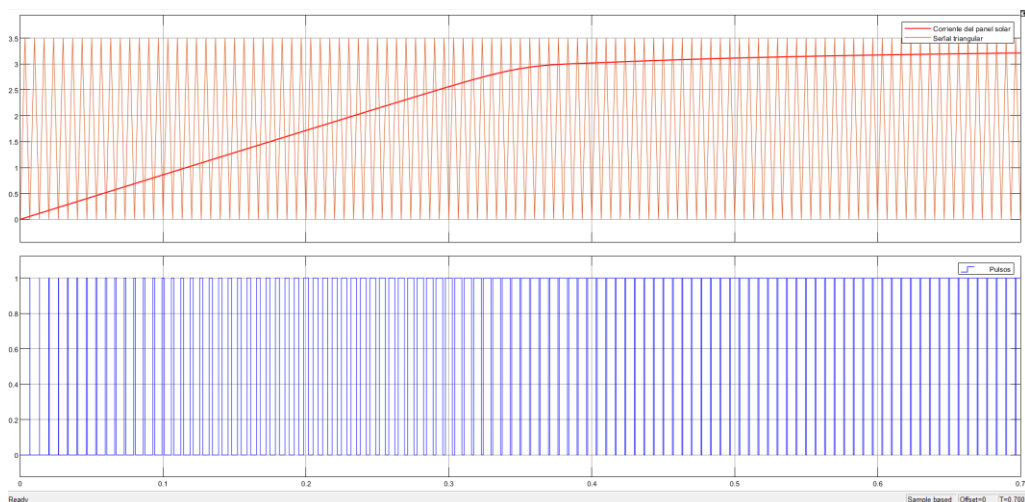
Se procede a realizar el análisis de los resultados obtenidos tanto en las pruebas al electrolizador, como en las simulaciones de esta forma realizar una comparación y determinar si el rediseño del electrolizador le permite obtener una mayor eficiencia o existe un punto de operación óptimo para la aplicación en los sistemas de bombeo agrícola.

### 3.1 Simulación del panel solar

En la simulación del panel solar utilizando el modelo matemático de Matlab-Simulink se realiza la variación de parámetros como la temperatura del panel y la radiación total para lograr observar el comportamiento ante el cambio de este parámetro, se utilizó el circuito de la Figura 2.5 para la rectificación del voltaje y corriente tal como lo haría un regulador de carga.

#### 3.1.1 Comportamiento del circuito de rectificación de voltaje del panel solar

El circuito rectificador de la Figura 2.5 permite controlar la entrada de voltaje y corriente del panel solar a través de un SCR y una señal modulada por pulsos, la cual disminuye si la corriente en la salida del panel es baja y aumenta en caso contrario, esto para evitar que cuando la corriente es baja el panel entre en modo de corto y la salida de voltaje sea 0.

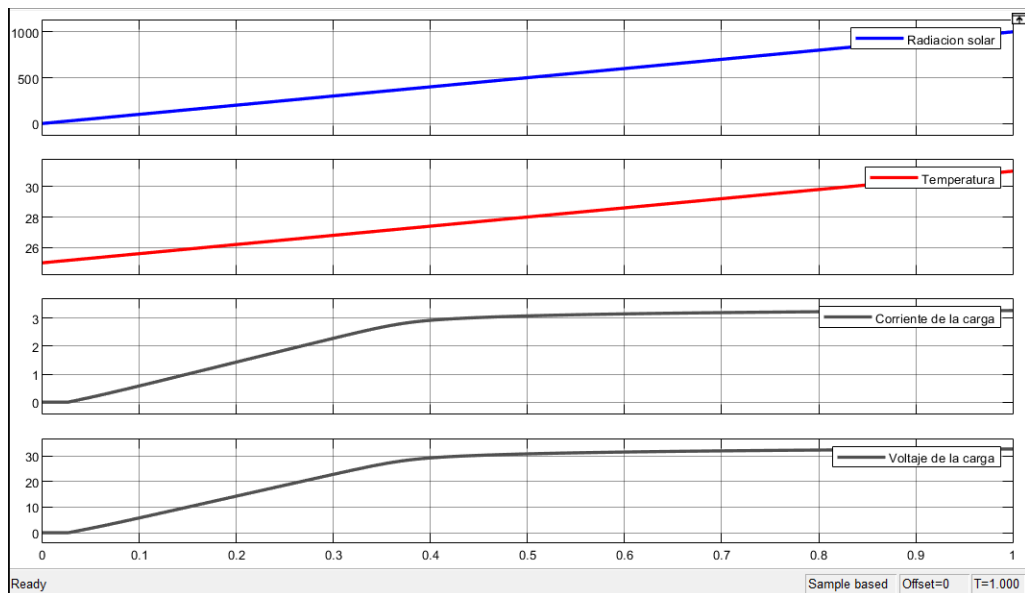


**Figura 3.1 Generación de pulsos para el rectificador del panel solar.**

Como se observa en la Figura 3.1 se compara la señal de corriente que se muestra en la primera grafica con color rojo con una señal triangular que se muestra en la gráfica con color naranja a una frecuencia de 150Hz y como se observa en la parte inferior de la gráfica los resultados obtenidos es la variación del ciclo de trabajo del PWM correctamente.

### 3.1.2 Voltaje y corriente del panel solar con variación de temperatura y radiación solar.

Se realizo la variación de la radiación solar con valores entre 0 y 1000[w/m<sup>2</sup>] y la temperatura entre 25°C y 36°C, para determinar cómo influye en el comportamiento del voltaje y la corriente del panel solar.



**Figura 3.2 Corriente y voltaje del panel solar variando radiación solar y temperatura.**

Se puede observar en la Figura 3.2 que el aumento de la radiación solar es proporcional a la corriente y el voltaje hasta un valor aproximado de 400[w/m<sup>2</sup>], luego se nota que aumentan, pero con un valor poco notable, en el caso de la temperatura su influencia sobre la salida del panel solar no es mayor que la de la radiación solar, esto indica que un panel solar está en su punto de operación si se encuentra con una radiación solar mayor o igual a los 400[w/m<sup>2</sup>].

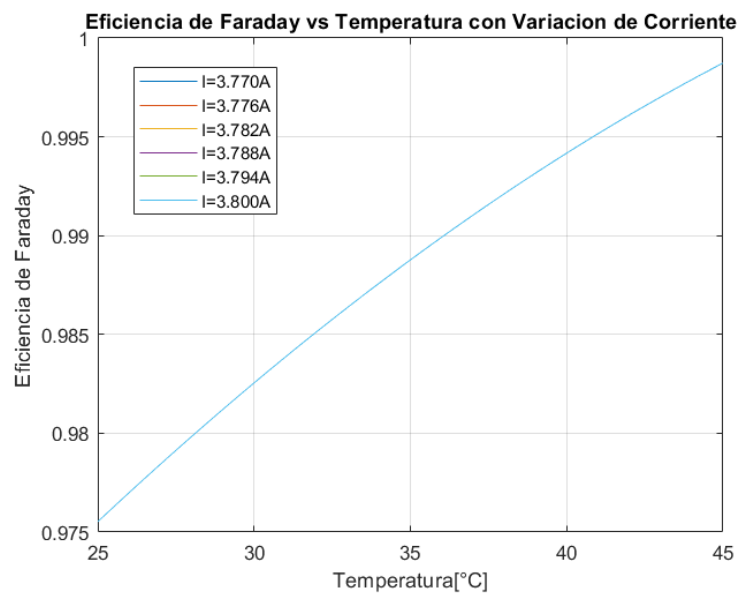


### 3.2 Simulación de la electrolisis de Faraday

Se utilizaron las ecuaciones de Faraday tanto como de producción de oxihidrógeno y de eficiencia realizando variaciones de corriente y temperatura, así también como el área de las placas que funcionan como electrodos de esta forma se obtienen resultados variables del funcionamiento de un electrolizador.

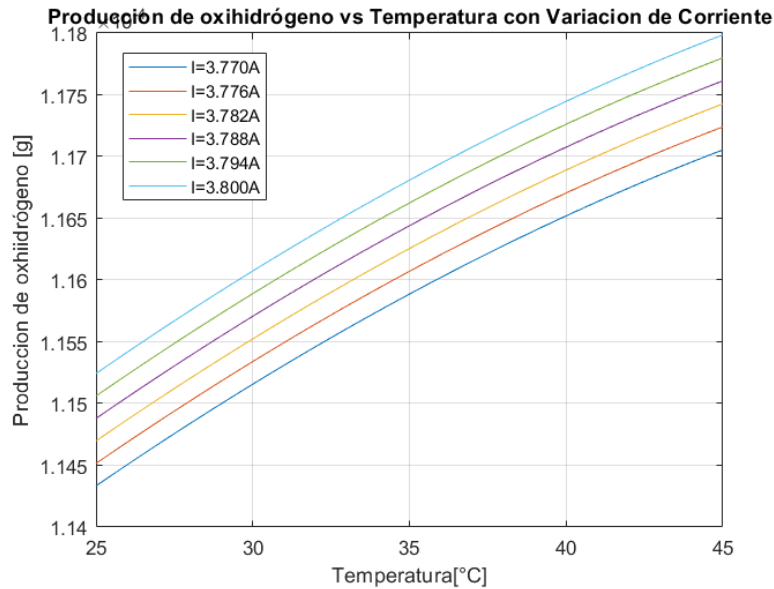
#### 3.2.1 Simulación variando corriente y temperatura

En esta simulación se mantuvo constante el área de los electrodos de tal forma que se realiza la simulación variando la temperatura para diferentes valores de corrientes.



**Figura 3.3 Eficiencia de Faraday vs Temperatura con variación de corriente.**

En la Figura 3.3 podemos observar los resultados de la eficiencia de Faraday con respecto a la temperatura, para lo cual se observa que en todos los casos la eficiencia tiene el mismo comportamiento, es decir que la eficiencia está ligada directamente a la temperatura.

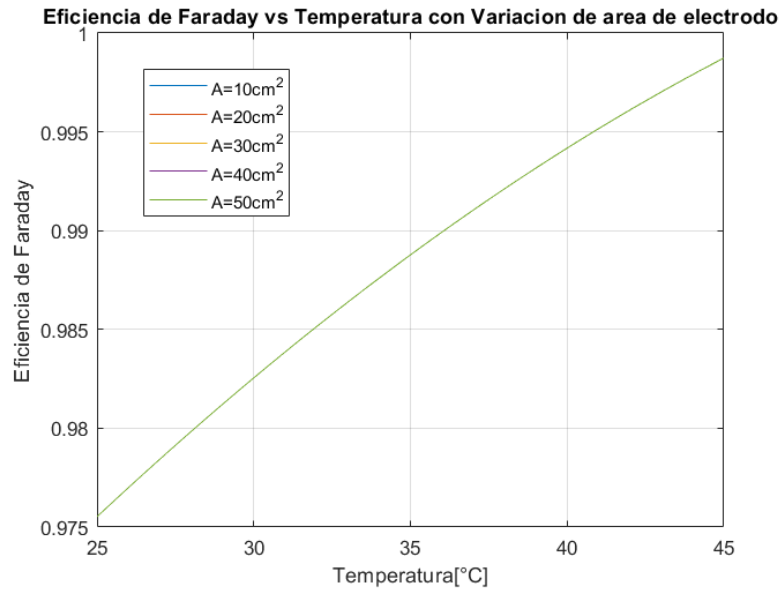


**Figura 3.4 Producción de oxihidrógeno vs Temperatura con variación de corriente.**

En la Figura 3.4 notamos la simulación de la producción de oxihidrógeno a diferentes corrientes, de lo cual se obtienen resultados relevantes como se muestra a diferentes valores de corriente se puede obtener el mismo nivel de producción de oxihidrógeno, pero a una mayor temperatura, lo cual indica que el sistema es más eficiente si aumenta la temperatura produciendo una misma cantidad de hidrogeno, pero con una menor corriente.

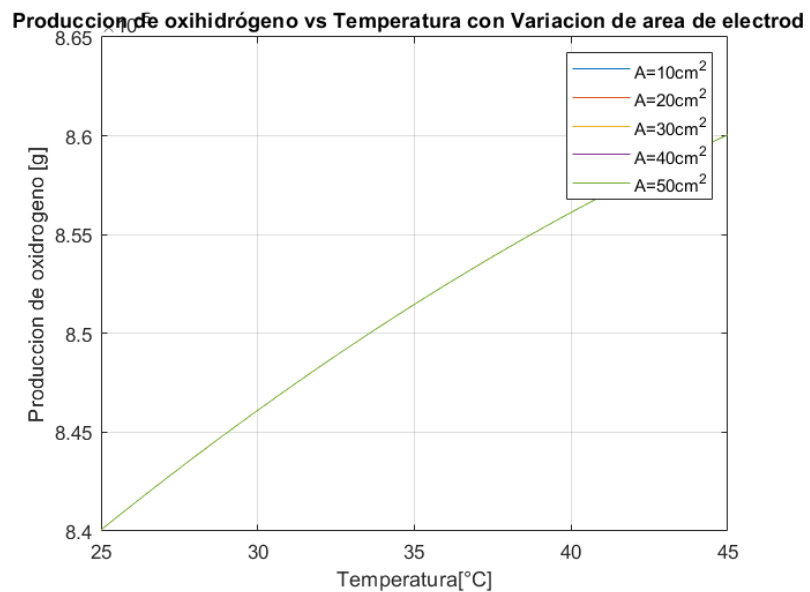
### 3.2.2 Simulación variando área de las placas y temperatura

Se realizo la simulación variando el área de las placas para obtener datos del comportamiento de la eficiencia y la producción de oxihidrógeno.



**Figura 3.5 Eficiencia de Faraday vs Temperatura con variación de área de electrodo.**

Para la simulación con la variación del área, observamos en la Figura 3.5 que no tiene influencia dentro de la eficiencia de Faraday, como en el caso de la corriente se comprueba una vez más que la eficiencia está directamente asociada a la temperatura.



**Figura 3.6 Producción de oxihidrogeno vs Temperatura con variación de área de electrodo.**

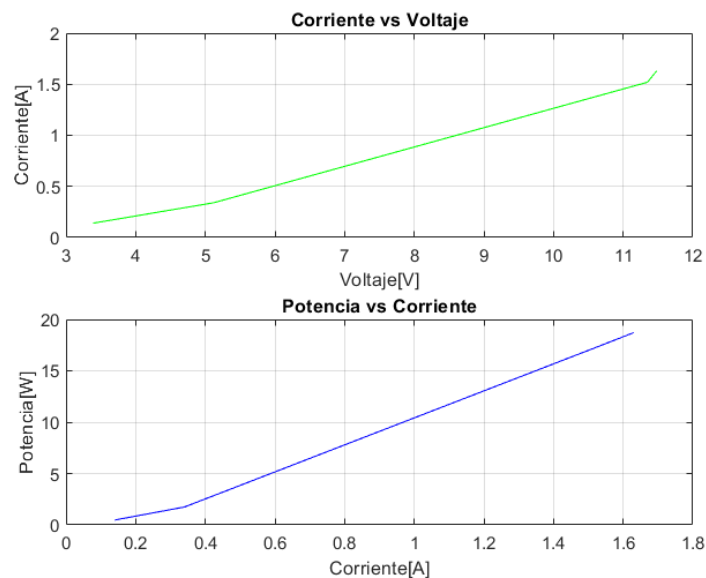
En la Figura 3.6 se observa la producción de oxihidrógeno a diferentes áreas de los electros, sin embargo, no cambian sus valores, se esperaría que a una mayor área se genere una mayor producción de oxihidrógeno, sin embargo, no sucede así porque el valor del área de las placas se usa en la eficiencia de Faraday, pero no en la ecuación de producción de oxihidrógeno ya que aquella resulta del modelo químico de la electrolisis.

### 3.3 Prueba del electrolizador sin sistema de recirculación

Estas pruebas hacen referencia a las realizadas al electrolizador inicialmente las cuales posteriormente permitieron determinar las mejoras necesarias para el rediseño, como no se contaba con una ficha técnica se hicieron pruebas experimentales para determinarla.

#### 3.3.1 Prueba con variación de voltaje

En esta prueba se determinó el comportamiento del electrolizador el cual al aumentar el voltaje los electrones tienen más fuerza para realizar la electrolisis y romper las moléculas de agua.



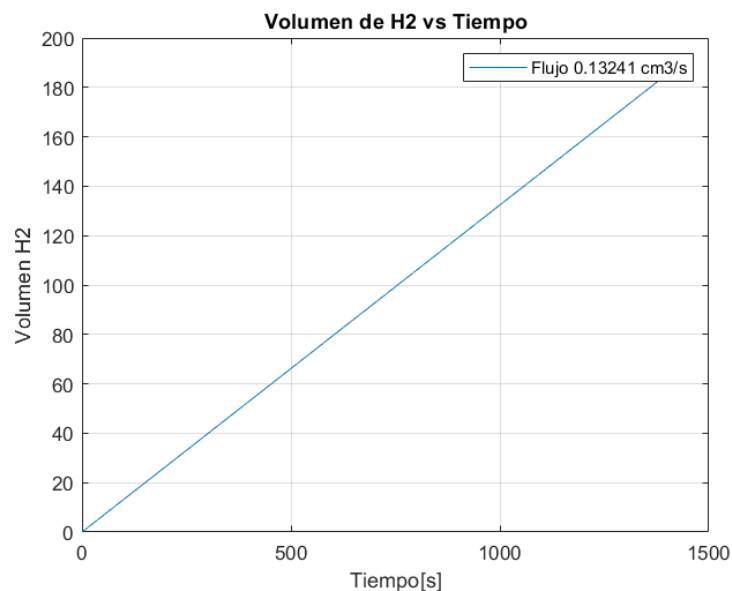
**Figura 3.7 Corriente vs Voltaje del electrolizador.**

En la Figura 3.7 observamos el comportamiento de la corriente y la potencia del electrolizador que se muestra de forma lineal en ambos casos ya que no intervienen componentes eléctricos adicionales en la electrolisis y se podría

determinar mediante ley de ohm una resistencia equivalente pero esta seria variable en función de la temperatura del electrolito.

### 3.3.2 Prueba de producción de oxihidrógeno

Como la ecuación de la electrolisis es directamente proporcional a la corriente se asume la linealidad en el proceso de producción de oxihidrógeno.



**Figura 3.8 Volumen de H<sub>2</sub> vs tiempo.**

Los resultados obtenidos no permiten obtener la gráfica de la Figura 3.8 en la cual se observa cuanto hidrogeno ha producido el electrolizador con su funcionamiento estándar el cual es un valor bajo.

### 3.4 Prueba del electrolizador con sistema de recirculación

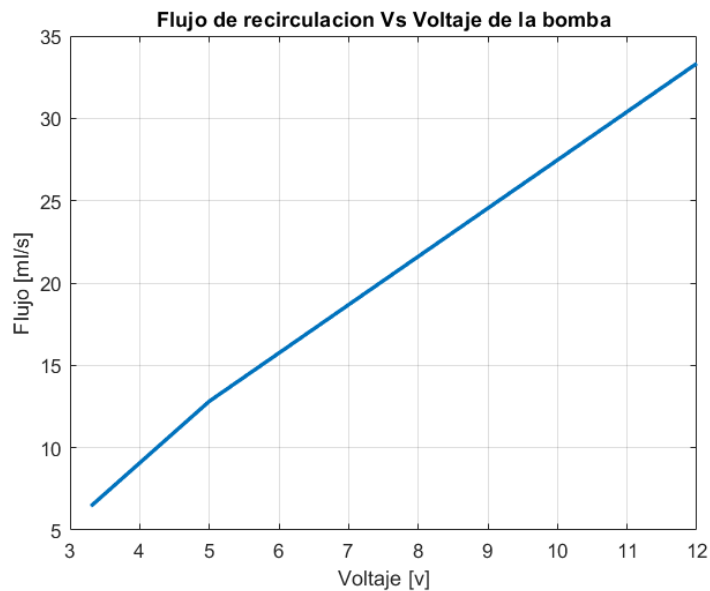
Los resultados obtenidos en las pruebas del electrolizador con su funcionamiento estándar dieron a notar una falencia del sistema generador hidrogeno la cual es que al ponerlo en funcionamiento se empezaba a acumular gas en la parte superior como se muestra en la Figura 3.9 y esto provocaba que parte de las placas quede sin contacto con el electrolito, y directamente provocando la disfunción en la generación de hidrogeno.



**Figura 3.9 Electroizador en pruebas de funcionamiento.**

Se agrego el sistema de recirculación de electrolito para asegurar que las placas de los electrodos estén todo el tiempo en contacto con el electrolito.

### **3.4.1 Flujo de recirculación versus voltaje de la bomba**

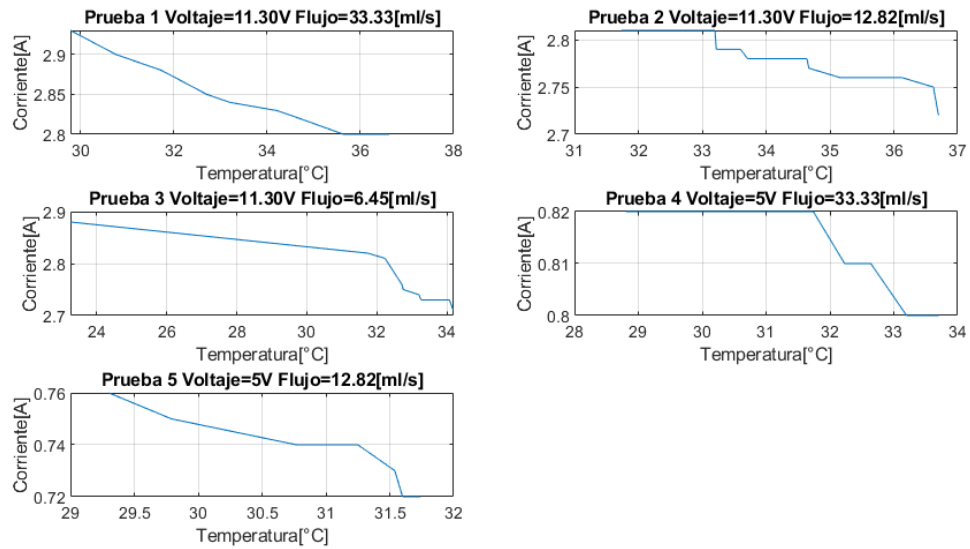


**Figura 3.10 Flujo de recirculación vs voltaje de la bomba.**

En la Figura 3.10 se confirma la ficha técnica de la bomba a su voltaje nominal y también como podemos variar el flujo de recirculación variando el voltaje de alimentación.

### **3.4.2 Variación de corriente con respecto a la temperatura**

Para todas las pruebas realizadas con el sistema de recirculación y variación de parámetros se hizo una sola grafica para analizar el comportamiento de estas.

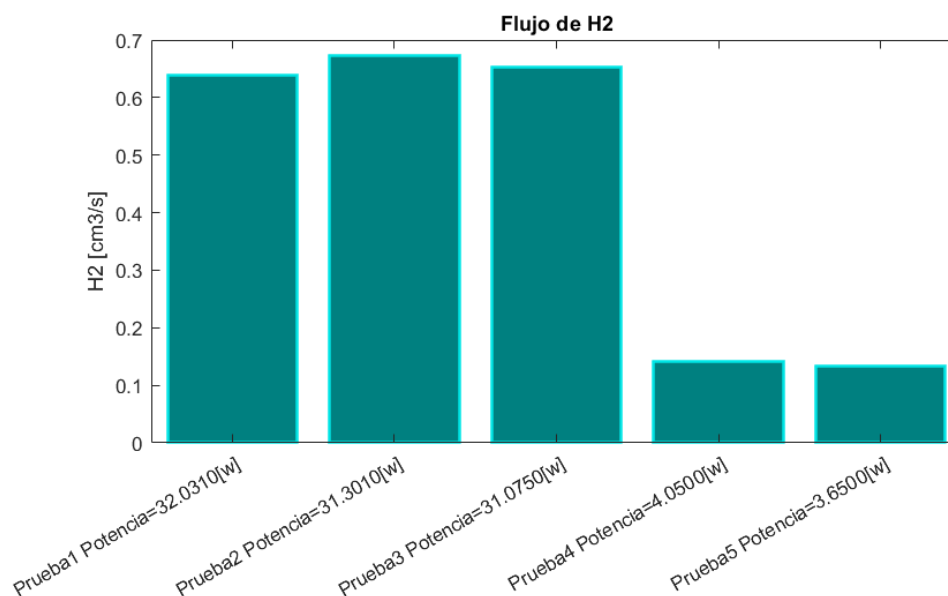


**Figura 3.11 Variación de corriente en pruebas del electrolizador.**

En la Figura 3.11 se observa como en todas las pruebas realizadas al aumentar la temperatura disminuye la corriente, si la corriente es directamente proporcional a la cantidad de hidrogeno generado, y a una mayor temperatura el sistema es más eficiente, no sería congruente que la cantidad de hidrogeno disminuya al aumentar la temperatura, pero se resalta la información de la Figura 3.4 donde esto nos permite comprobar tanto analítica como experimentalmente que el sistema está produciendo la misma cantidad de hidrogeno pero con una menor corriente debido al aumento de la temperatura.

### 3.4.3 Flujo de hidrogeno según la potencia consumida

Se utilizan los datos obtenidos mediante las pruebas experimentales para realizar una comparativa entre la potencia consumida y el h2 generado.



**Figura 3.12 Flujo de H<sub>2</sub> vs potencia.**

En la Figura 3.12 se aprecia el hidrogeno producido según la prueba realizada, esto de forma descendiente, como se observa en la prueba 2 existe una mayor producción de H<sub>2</sub> con una menor potencia que en la prueba 1, pero esto a voltaje nominal del electrolizador, sin embargo, si hacemos una relación de hidrogeno sobre potencia obtendremos una relación que nos permitirá analizar cuál de las pruebas es más eficiente.

**Tabla 3-1 Comparación de eficiencia.**

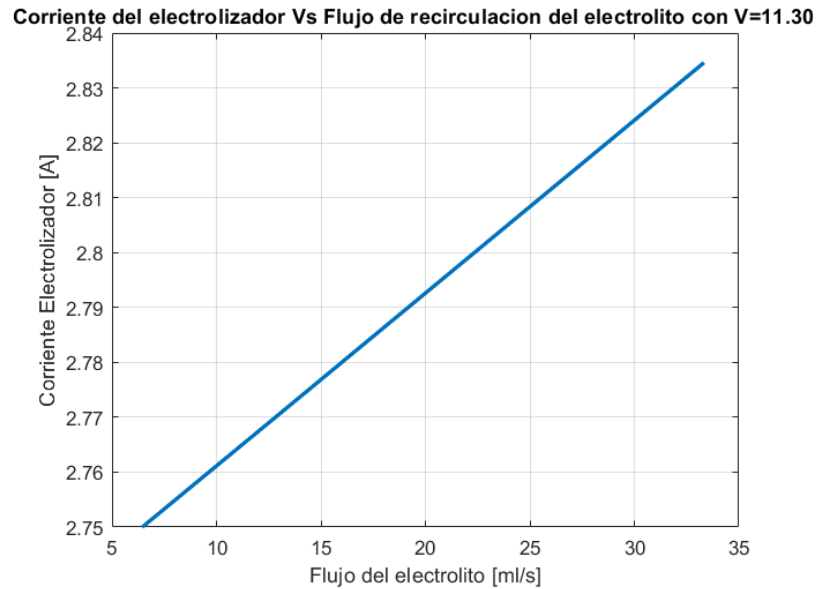
Comparación de eficiencia H <sub>2</sub> /W	
Prueba 1	0.01991
Prueba 2	0.02148
Prueba 3	0.02102
Prueba 4	0.03511
Prueba 5	0.03668

Como se observa en la Tabla 3-1 donde se compara la cantidad de hidrogeno producido en función de la potencia utilizada, notamos que la prueba 5 es la más eficiente, sin embargo, en aquella prueba se usa un voltaje de alimentación de 5[V] para el electrolizador, a diferencia de la prueba 1,2 y 3, en las que se usó el voltaje nominal de 12[V] entonces se toma la prueba 2 como la más eficiente para el rediseño del electrolizador.



### 3.4.4 Corriente en el electrolizador versus flujo de recirculación

Se comprueba cómo se comporta la corriente a medida que se aumenta el flujo de recirculación del electrolito.



**Figura 3.13 Corriente del electrolizador vs flujo de recirculación.**

Como se observa en la Figura 3.13 a medida que se aumenta el flujo de recirculación la corriente aumenta, esto debido a que cuando se realiza la reacción de la electrolisis las partículas en estado gaseoso quedan adheridas a las placas y el flujo les permite a estas partículas que se desprendan con una mayor facilidad y dejen espacio libre para que en dicha área de la placa se cree otra reacción.

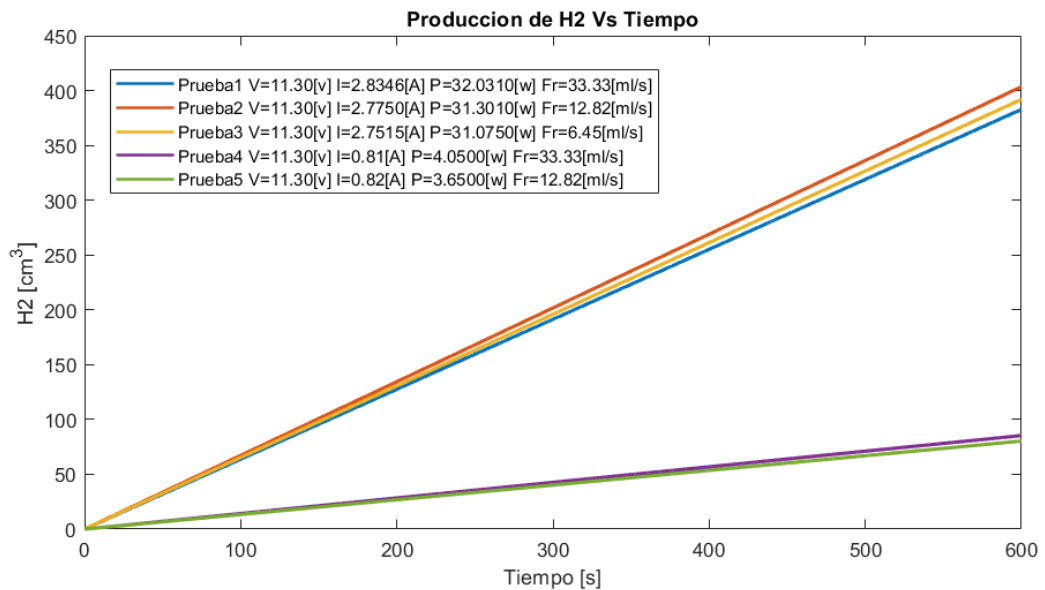


**Figura 3.14 Recipiente del electrolito durante la electrolisis.**

Uno de los problemas que se generan al aumentar el flujo de recirculación se observa en la Figura 3.14 donde se ve un electrolito totalmente mezclado con partículas gaseosas, el problema se da porque al estar el sistema recirculando rápido no le permite a las pequeñas partículas de hidrogeno subir a la superficie, sino que son enviadas nuevamente hacia el electrolizador.

### 3.4.5 Producción de hidrogeno versus tiempo

En las pruebas con flujo de recirculación se graficó cuanto hidrogeno generaron en función del tiempo.

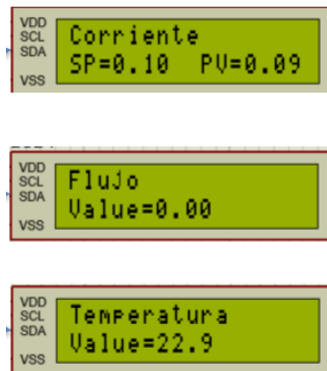


**Figura 3.15 Producción de H<sub>2</sub> vs tiempo en pruebas con recirculación.**

Como se observa en la Figura 3.15 para el voltaje nominal de 12[V] en la prueba 2 se obtuvo una mayor producción de H<sub>2</sub>, a pesar de que en las pruebas realizadas a 5[V] el sistema es más eficiente, la producción se da de forma más lenta, por aquello se determinó trabajar con el voltaje nominal.

### 3.5 Control digital

El control digital tiene una interfaz de control fácil de usar lo cual permite la parametrización rápida del electrolizador según los requerimientos de la bomba de combustión.



**Figura 3.16 Pantalla LCD del control digital.**

Como se observa en la Figura 2.16 se presentan las dos pantallas para configuración de corriente que nos permite directamente controlar la cantidad de hidrogeno producido, como también el flujo de recirculación variable importante en el rediseño del electrolizador.

### **3.5.1 Control de corriente y flujo de recirculación**

En el control de corriente y flujo se usó un OPAM LM358 que es de propósito general por lo cual se asegura el funcionamiento correcto de la electrónica analógica, el cual en su salida nos permite recibir una corriente de 20[mA] máximo, que ingresa al transistor TIC33 que permite una corriente máxima de 10[A] para ponerlo en modo de saturación con lo cual la corriente puede circular a través del mismo, como el electrolizador se lo puede representar como una resistencia, se asegura que variando el voltaje también variamos la corriente.

### **3.5.2 Sensor de temperatura**

El sensor de temperatura LM35 entrego una salida de voltaje con ruido a pesar de ser preciso, por lo cual se agregó un filtro RC para que en su salida el voltaje sea constante, las variaciones de temperatura se deben al electrolito mezclado con partículas de gas, esto le impide que toda la superficie del sensor este en contacto con el electrolito.

### 3.5.3 Tarjeta electrónica para el control digital

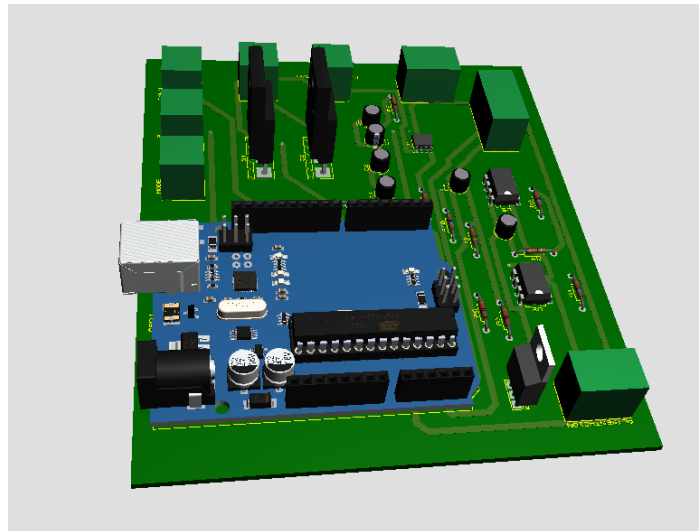


Figura 3.17 Tarjeta electrónica de control digital.

En la Figura 3.17 tenemos la tarjeta electrónica para el control digital, se observa que tiene un tamaño pequeño para que sea de fácil implementación con el electrolizador, además de que su tamaño permite hacerle un encapsulado dentro de una caja para protección de la misma.

### 3.5.4 Análisis de costos del sistema generador de hidrogeno

En el análisis de los costos del control digital se toman en cuenta todos los elementos necesarios para su implementación.

Tabla 3-2 Costo de elementos para el control digital.

Materiales	Cantidades	Costo unitario	Costo total
RESISTENCIAS	10	\$ 0.10	\$ 1.00
OPAM LM358	2	\$ 0.50	\$ 1.00
LM35	1	\$ 1.90	\$ 1.90
TIP33	2	\$ 0.90	\$ 1.80
ARDUINO UNO	1	\$ 12.00	\$ 12.00
LCD 16X2 CON i2c	1	\$ 7.50	\$ 7.50
PULSADORES	3	\$ 1.00	\$ 3.00
CAPACITORES	5	\$ 0.50	\$ 2.50
PCB	1	\$ 10.00	\$ 10.00
BOMBA 12V	1	\$ 11.00	\$ 11.00
TOTAL			\$ 51.70

Como se muestra en la Tabla 3-2 se presentan los costos totales de cada elemento es específico, además de la placa PCB para el circuito en donde irán ensamblados todos los elementos, a excepción de la bomba que se conecta en el

sistema generador de hidrogeno, el costo por soldar los elementos a la PCB está incluido en los costos por trabajo de ingeniería que se muestra en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3 Costo total de implementación.**

Materiales	Cantidades	Costo unitario	Costo total
ELECTROLIZADOR	1	\$ 140.00	\$ 140.00
PANEL SOLAR 50W	1	\$ 50.00	\$ 50.00
CONTROLADOR REGULADOR DE CARGA	1	\$ 15.00	\$ 15.00
CONTROL DIGITAL	1	\$ 51.70	\$ 51.70
TRABAJO DE INGENIERIA	1	\$ 150.00	\$ 150.00
TOTAL			\$ 406.70

En los costos totales de implementación mostrados en la Tabla 3-3 se observa que uno de los costos más elevados es el del electrolizador, sin embargo dentro de ese costo el kit del electrolizador incluye elementos como cables, mangueras, terminales de conexión eléctrica, relevador, filtros de repuesto, fusible, fusilera y también varios soportes de acero para acoplar el electrolizador a cualquier motor, por ello esos costos no se han incluido debido a que ya se incluyen en el costo del electrolizador, dentro del costo de trabajo de ingeniería se refiere al costo por la instalación y puesta en marcha del sistema completo.

### **3.6 Análisis de la caracterización del sistema de riego**

Como se muestra en los resultados obtenidos en la Tabla 2-15 el consumo para un día de trabajo para una bomba de 163cc es de 3 galones, la aplicación en este tipo de motor y para las capacidades del mismo es óptimo, sin embargo, debido al mejoramiento realizado en el funcionamiento del electrolizador, este puede ser aplicado en motores de más cilindraje en su sistema de combustión.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Las simulaciones realizadas a las ecuaciones que permiten representar el comportamiento de la electrolisis tomando en cuenta la eficiencia fueron datos relevantes para mejorar el funcionamiento del electrolizador como el comportamiento de la temperatura, además para realiza un análisis comparativo del mismo entre datos teóricos y experimentales los cuales tuvieron el mismo comportamiento frente a las pruebas realizadas.
- Se diseño una tarjeta electrónica de control digital tomando en cuenta los datos obtenidos de las simulaciones y las pruebas experimentales, el cual permite el control de corriente que de forma directa y proporcional permitiendo controlar la cantidad de hidrogeno que deseamos,
- También se realizó el control de una bomba de 12[V] que permite al electrolito recircular por las placas del electrolizador y aumentar la eficiencia del electrolizador como se mostró en las pruebas realizadas.
- Como se trata de un sistema de generación de hidrogeno verde su fuente de energía renovable son paneles solares, para los cuales mediante las simulaciones realizadas se comprobó que funcionan en su punto de operación para radiaciones solares mayores a 350[w/m<sup>2</sup>], que es un valor promedio de radiación dentro de la costa ecuatoriana, se dimensiono la potencia necesaria del panel solar tomando en cuenta la potencia total del sistema de generación de hidrogeno.
- En el rediseño del electrolizador el uso de hidrogeno está dedicado a los sistemas de bombeo agrícola, por lo cual un sistema que permita mezclar el hidrogeno con el aire que ingresa al motor es necesario, sin embargo los motores de combustión cuentan con su entrada de aire y un filtro para evitar impurezas el cual se vuelve un lugar idóneo para colocar la salida de hidrogeno de forma simple y no usar un sistema complejo ya que el control de producción de hidrogeno se lo realiza de forma digital.
- El desarrollo del rediseño del generador de hidrogeno verde a través de la investigación empírica y analítica llevo a crear un sistema con una electrónica y

un control de parámetros a su vez que nos permite visualizar los mismos mediante una pantalla LCD segmentada, es una gran opción para la aplicación en sistemas de bombeo agrícolas de diferentes cilindrajes del motor ya que se cumple con la parametrización de los requerimientos de cada motor.

- El análisis de costos para la implementación del electrolizador muestra que el costo no es elevado para el beneficio que se obtiene al implementar un sistema de estas características y que a su vez es ecológico y disminuye la contaminación de dióxido de carbono que generan los motores de combustión.

## **4.2 Recomendaciones**

- La generación de hidrogeno mediante la electrolisis está ligada a más variables aparte de las estudiadas en este proyecto, como puede ser la cantidad de luz que incide sobre el electrolito, se recomienda analizar este tipo de variables para crear un modelo mucho más optimo y eficiente.
- Las pruebas realizadas para el rediseño del sistema generador de hidrogeno fueron segmentadas, es decir que se analizó por partes el comportamiento del electrolizador, se recomienda la puesta en marcha del sistema en su totalidad usando el control digital en un sistema de combustión para bombeo agrícola o cualquier otro uso.
- La capacidad calorífica de la gasolina en promedio ronda los valores de los 43MJ/Kg y la del hidrogeno los 130MJ/Kg, es un valor mucho mayor por lo cual se recomienda usar cortafuegos en la salida de hidrogeno y tener mucho cuidado al manipular el equipo en el sistema de combustión.
- El control digital realizado nos permite parametrizar el electrolizador según los requerimientos del sistema de combustión, se recomienda aplicar un sistema de control que permita realizar un sistema de ciclo cerrado para que se automatice la parametrización y la cantidad de hidrogeno requerida por el motor ya no sea la que deseamos, si no la que requiera el sistema según su nivel de aceleración.

# BIBLIOGRAFÍA

- 3 Vectores REGENERATIVE. (10 de agosto de 2021). *ESTRATEGIA PAÍS DE HIDRÓGENO VERDE URUGUAY – H<sub>2</sub>URUGUAY*. Obtenido de <https://3vectores.com/myportfolio/estrategia-pais-de-hidrogeno-verde-uruguay/>
- Arduino DOCS. (07 de 02 de 2023). *Arduino IDE 1*. Obtenido de <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/Windows>
- Avila, D. (23 de Noviembre de 2021). *actualidadmotor*. Obtenido de Carburador: qué es y qué función tiene en un motor: [https://www.actualidadmotor.com/carburador/#Que\\_es\\_un\\_carburador](https://www.actualidadmotor.com/carburador/#Que_es_un_carburador)
- Ciencia interactiva y divertida. (1 de Noviembre de 2017). *PH y Electrólisis*. Obtenido de <https://cienciainteractivaydivertida.wordpress.com/2017/11/01/ph-y-electrolisis/>
- CROWCOM. (14 de Marzo de 2022). *Detecting Gas*. Obtenido de Electrólisis de hidrógeno: <https://www.crowcon.com/es/tag/alkaline-electrolyser/>
- Erick Daniel Rincón-Castrillo, J. R.-S.-D. (2019). Modeling and simulation of an electrolyser for the production of HHO in Matlab-. *Journal of Engineering Sciences*, 6-15.
- Gimenez, J. C. (2019). La hora del hidrogeno verde. En *Hidrogeno Renovable* (págs. 24-30).
- Guzman, I. (s.f.). *Física y Química*. Obtenido de Transferencia de electrones: [https://www.educa2.madrid.org/web/fisica-y-quimica-ies-isidra-de-guzman/quimica-2-bachillerato/-/book/reacciones-de-transferencia-de-electrones?\\_book\\_viewer\\_WAR cms\\_tools\\_chapterIndex=e589a698-3da6-4729-b23f-03505f09ce98](https://www.educa2.madrid.org/web/fisica-y-quimica-ies-isidra-de-guzman/quimica-2-bachillerato/-/book/reacciones-de-transferencia-de-electrones?_book_viewer_WAR cms_tools_chapterIndex=e589a698-3da6-4729-b23f-03505f09ce98)
- Heraldo. (21 de Noviembre de 2017). *Hidrógeno, ¿una alternativa energética viable?* Obtenido de <https://www.heraldo.es/noticias/sociedad/2017/11/21/hidrogeno-una-alternativa-energetica-viable-1209243-310.html>
- Hubor. (s.f.). *Proteus*. Obtenido de ¿Qué es proteus?: <https://www.hubor-proteus.com/proteus-pcb/proteus-pcb/2-proteus.html>
- Hyundai. (18 de Noviembre de 2020). *ZONECO by Hyundai*. Obtenido de Qué ventajas tiene el hidrógeno: <https://www.hyundai.com/es/zonaeco/eco-drive/tendencias/ventajas-hidrogeno-como-combustible#:~:text=2.->



,%C2%BFC%C3%B3mo%20se%20utiliza%3F,los%20cohetes%20de%20la%20NASA.

IDEAGREEN. (16 de febrero de 2021). *Hidrogeno Verde*. Obtenido de Tipos de Electrolizadores: <https://ideagreen.es/hidrogeno-verde/tipos-de-electrolizadores/>

José Linares, B. M. (2007). *El hidrógeno y la energía*. España: Universidad Pontificia Comillas.

MathWorks. (s.f.). *Matlab & Simulink*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>

MIGUEL BAYA GARCÍA, J. A. (21 de Noviembre de 2017). *HERALDO*. Obtenido de Hidrógeno, ¿una alternativa energética viable?: <https://www.heraldo.es/noticias/sociedad/2017/11/21/hidrogeno-una-alternativa-energetica-viable-1209243-310.html>

Net InterLab S.A. (8 de Octubre de 2022). *Qué es la electrólisis del agua y cómo se produce*. Obtenido de Electrolisis del agua: <https://net-interlab.es/electrolisis-del-agua/>

SolarPlak. (2020). *¿Qué es y cómo funciona un panel solar?* Obtenido de <https://solarplak.es/energia/que-es-y-como-funciona-un-panel-solar/>

# ANEXOS

## ANEXO 1: CODIGO DE MATLAB PARA MOSTRAR GRAFICAS DE PRUEBAS DEL GENERADOR DE HIDROGENO SIN SISTEMA DE RECIRCULACION.

```
clac
clear all
close all
%% Pruebas del funcionamiento del electrolizador sin sistema de
recirculacion
% Para realizar estas pruebas se alimento el electrolizador variando
el
% voltaje y de esta forma la corriente y usando el electrolito
indicado por
% el fabricante que es una mezcla de:
% 98.3606% agua
% 0.6557% Hidroxido de sodio
% 0.6557% Bicarbonado de sodio
% 0.3278% Refrigerante de auto
%%%%%%%%%% Pruebas variando voltaje y corriente %%%%%%%%%%%
voltaje=[3.39 5.12 11.35 11.48]; %Voltaje entre los electrodos
corriente=[0.14 0.34 1.52 1.63]; %Corriente que circula entre los
electrodos
potencia=voltaje.*corriente;
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(voltaje,corriente,'g')
title('Corriente vs Voltaje')
xlabel('Voltaje[V]')
ylabel('Corriente[A]')
grid on
subplot(2,1,2)
plot(corriente,potencia,'b')
title('Potencia vs Corriente')
xlabel('Corriente[A]')
ylabel('Potencia[W]')
grid on
%%%%%%%%%% Prueba de produccion de hidrogeno en volumen %%%%%%%%%%%
voltaje=11.70;
corriente=1.59;
potencia=voltaje*corriente;
Volumen=286; %cm3
tiempo=1440; %segundos
FlujoDeH2=(Volumen*2/3)/tiempo; %cm3/s
%FlujoDeH2=[(Volumen1*2/3)/TiempoV1]*densidadH %g/s
FlujoDeO2=(Volumen*1/3)/tiempo; %cm3/s
%FlujoDeH2=[(Volumen1*2/3)/TiempoV1]*densidadO %g/s
t=0:0.01:tiempo;
```

```
vHHO=FlujoDeH2*t;  
figure(2)  
plot(t,vHHO)  
grid on  
title('Volumen de H2 vs Tiempo')  
xlabel('Tiempo[s]')  
ylabel('Volumen H2')  
legend('Flujo '+string(FlujoDeH2)+' cm3/s')
```

## ANEXO 2: CODIGO DE MATLAB PARA MOSTRAR GRAFICAS DE PRUEBAS DEL GENERADOR DE HIDROGENO CON SISTEMA DE RECIRCULACION.

```
clc
clear all
close all
%% Informacion de pruebas realizadas
% Para realizar estas pruebas se agrego una bomba como sistema de
% recirculacion para que el electrolito este fluyendo durante todo el
tiempo
% en el electrolizador.
% Se uso un electrolito con la siguiente mezcla
% 98.0392% Agua
% 1.9607% Hidroxido de sodio

%% Pruebas de flujo de la bomba
% Para relizar pruebas del caudal de la bomba del sistema de
% recirculacion de electrolito se lleno un recipiente de un litro
% en un tiempo determinado
CantidadLiquido=1000;%mililitros
% Flujo 1 - Voltaje 12V %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tiempo1=30; %segundos
Flujo1=CantidadLiquido/tiempo1 %mililitros/segundos
% Flujo 2 - Voltaje 5V %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tiempo2=78; %segundos
Flujo2=CantidadLiquido/tiempo2 %mililitros/segundos
% Flujo 3 - Voltaje 3.3V %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tiempo3=155; %segundos
Flujo3=CantidadLiquido/tiempo3 %mililitros/segundos
flujos=[Flujo3 Flujo2 Flujo1];
voltajeflujo=[3.3 5 12];
plot(voltajeflujo,flujos,'LineWidth',2)
title('Flujo de recirculacion Vs Voltaje de la bomba')
grid on
xlabel('Voltaje [v]')
ylabel('Flujo [ml/s]')
%% Cantidad de HHO
% Se conoce como HHO al oxidrogeno que es una mezcla de dos moleculas
% en estado gaseoso de Hidrogeno con una de Oxigeno, es decir una
% proporcion de 2:1
% Para medir la produccion de HHO se conecto la manguera de salida en
% una funda plastica totalmente vacia de aire para que el HHO se
almacenara
% en la misma y se comparo con otra funfa llena de agua en la misma
% proporcion para obtener un aproximado en ml de agua que en volumen
es
% igual a cm3
%
densidadH=8.99e-5;%g/cm3
densidadO=0.00143;%g/cm3
```

```

%% Prueba 1 Voltaje=11.30V Flujo=33.33[ml/s] Corriente promedio=
2.8346A
voltaje1=11.30;
corriente1=2.8346;
potencial1=voltaje1*corriente1;
Volumen1=689; %cm3
tiempoV1=720; %segundos
FlujoDeH2_prueba1=(Volumen1*2/3)/tiempoV1 %cm3/s
%FlujoDeH2_prueba1=[(Volumen1*2/3)/TiempoV1]*densidadH %g/s
FlujoDeO2_prueba1=(Volumen1*1/3)/tiempoV1; %cm3/s
%FlujoDeH2_prueba1=[(Volumen1*2/3)/TiempoV1]*densidadO %g/s
Temperatura_prueba1=[29.79 30.76 31.74 32.71 33.20 34.18 34.20 34.69
35.64 36.13 36.62];
Corriente_prueba1=[2.93 2.90 2.88 2.85 2.84 2.83 2.83 2.82 2.80 2.80
2.80];
%% Prueba 2 Voltaje=11.30V Flujo=12.82[ml/s] Corriente promedio=
2.7750A
voltaje2=11.30;
corriente2=2.77;
potencia2=voltaje2*corriente2;
Volumen2=584; %cm3
tiempoV2=579; %segundos
FlujoDeH2_prueba2=(Volumen2*2/3)/tiempoV2 %cm3/s
%FlujoDeH2_prueba1=[(Volumen2*2/3)/TiempoV2]*densidadH %g/s
FlujoDeO2_prueba2=(Volumen2*1/3)/tiempoV2; %cm3/s
%FlujoDeH2_prueba2=[(Volumen2*2/3)/TiempoV2]*densidadO %g/s
Temperatura_prueba2=[31.74 33.20 33.22 33.60 33.71 34.20 34.64 34.67
35.16 36.13 36.62 36.70];
Corriente_prueba2=[2.81 2.81 2.79 2.79 2.78 2.78 2.78 2.77 2.76 2.76
2.75 2.72];
%% Prueba 3 Voltaje=11.30V Flujo=6.45[ml/s] Corriente promedio=
2.7515A
voltaje3=11.30;
corriente3=2.75;
potencia3=voltaje3*corriente3;
Volumen3=680; %cm3
tiempoV3=694; %segundos
FlujoDeH2_prueba3=(Volumen3*2/3)/tiempoV3 %cm3/s
%FlujoDeH2_prueba3=[(Volumen3*2/3)/TiempoV3]*densidadH %g/s
FlujoDeO2_prueba3=(Volumen3*1/3)/tiempoV3; %cm3/s
%FlujoDeH2_prueba3=[(Volumen3*2/3)/TiempoV3]*densidadO %g/s
Temperatura_prueba3=[23.25 31.74 32.23 32.71 32.75 33.20 33.26 33.69
34.07 34.18 34.19];
Corriente_prueba3=[2.88 2.82 2.81 2.76 2.75 2.74 2.73 2.73 2.73 2.71
2.71];
%% Prueba 4 Voltaje=5V Flujo=33.33[ml/s] Corriente promedio= 0.81A
voltaje4=5;
corriente4=0.81;
potencia4=voltaje4*corriente4;
Volumen4=148; %cm3
tiempoV4=694; %segundos
FlujoDeH2_prueba4=(Volumen4*2/3)/tiempoV4 %cm3/s
%FlujoDeH2_pruezb4=[(Volumen4*2/3)/TiempoV4]*densidadH %g/s
FlujoDeO2_prueba4=(Volumen4*1/3)/tiempoV4; %cm3/s

```

```

%FlujoDeH2_prueba4=[(Volumen4*2/3)/TiempoV4]*densidadO %g/s
Temperatura_prueba4=[28.81 30.76 31.35 31.74 32.23 32.64 33.20 33.70];
Corriente_prueba4=[0.82 0.82 0.82 0.82 0.81 0.81 0.80 0.80];
%% Prueba 5 Voltaje=5V Flujo=12.82[ml/s] Corriente promedio= 0.82A
voltaje5=5;
corriente5=0.73;
potencia5=voltaje5*corriente5;
Volumen5=186; %cm3
tiempoV5=926; %segundos
FlujoDeH2_prueba5=(Volumen5*2/3)/tiempoV5 %cm3/s
%FlujoDeH2_prueba5=[(Volumen5*2/3)/TiempoV5]*densidadH %g/s
FlujoDeO2_prueba5=(Volumen5*1/3)/tiempoV5; %cm3/s
%FlujoDeH2_prueba5=[(Volumen5*2/3)/TiempoV5]*densidadO %g/s
Temperatura_prueba5=[29.30 29.79 30.77 31.25 31.54 31.60 31.74];
Corriente_prueba5=[0.76 0.75 0.74 0.74 0.73 0.72 0.72];
%% Graficas de Corriente Vs Temperatura
figure(2)
subplot(321)
plot(Temperatura_prueba1,Corriente_prueba1)
grid on
title('Prueba 1 Voltaje=11.30V Flujo=33.33[ml/s]')
xlabel('Temperatura[°C]')
ylabel('Corriente[A]')
subplot(322)
plot(Temperatura_prueba2,Corriente_prueba2)
grid on
title('Prueba 2 Voltaje=11.30V Flujo=12.82[ml/s]')
xlabel('Temperatura[°C]')
ylabel('Corriente[A]')
subplot(323)
plot(Temperatura_prueba3,Corriente_prueba3)
grid on
title('Prueba 3 Voltaje=11.30V Flujo=6.45[ml/s]')
xlabel('Temperatura[°C]')
ylabel('Corriente[A]')
subplot(324)
plot(Temperatura_prueba4,Corriente_prueba4)
grid on
title('Prueba 4 Voltaje=5V Flujo=33.33[ml/s]')
xlabel('Temperatura[°C]')
ylabel('Corriente[A]')
subplot(325)
plot(Temperatura_prueba5,Corriente_prueba5)
grid on
title('Prueba 5 Voltaje=5V Flujo=12.82[ml/s]')
xlabel('Temperatura[°C]')
ylabel('Corriente[A]')

%% Grafica Flujo de H2 Vs Potencia
figure(3)
potencias=[FlujoDeH2_prueba1 FlujoDeH2_prueba2 FlujoDeH2_prueba3
FlujoDeH2_prueba4 FlujoDeH2_prueba5];

```

```

X = categorical({'Prueba1 Potencia=32.0310[w]', 'Prueba2
Potencia=31.3010[w]', 'Prueba3 Potencia=31.0750[w]', 'Prueba4
Potencia=4.0500[w]', 'Prueba5 Potencia=3.6500[w]'});
X = reordercats(X, {'Prueba1 Potencia=32.0310[w]', 'Prueba2
Potencia=31.3010[w]', 'Prueba3 Potencia=31.0750[w]', 'Prueba4
Potencia=4.0500[w]', 'Prueba5 Potencia=3.6500[w]'});
bar(X, potencias, 'FaceColor', [0 .5 .5], 'EdgeColor', [0 .9
.9], 'LineWidth', 1.5)
ylabel('H2 [cm3/s]')
title('Flujo de H2')

%% Grafica Corriente Electrolizador Vs Flujo de recirculacion
electrolito - V=11.30[v]
figure(4)
corrientes=[corriente3 corriente2 corriente1];
plot(flujos, corrientes, 'LineWidth', 2)
grid on
title('Corriente del electrolizador Vs Flujo de recirculacion del
electrolito con V=11.30[v]')
xlabel('Flujo del electrolito [ml/s]')
ylabel('Corriente Electrolizador [A]')
%% Grafica Flujo de H2 vs Corriente Electrolito - V=11.30[v]
figure(5)
flujosH2=[FlujoDeH2_prueba1 FlujoDeH2_prueba2 FlujoDeH2_prueba3];
plot(corrientes, flujosH2, 'LineWidth', 2)
grid on
title('Flujo de H2 Vs Corriente del Electrolizador con V=11.30[v]')
xlabel('Corriente Electrolizador [A]')
ylabel('FLujoH2 [cm^3/s]')
%% Grafica Produccion de H2 vs Tiempo
figure(6)
t=0:0.01:600; %Tiempo de 10 minutos
H2_1=FlujoDeH2_prueba1*t;
H2_2=FlujoDeH2_prueba2*t;
H2_3=FlujoDeH2_prueba3*t;
H2_4=FlujoDeH2_prueba4*t;
H2_5=FlujoDeH2_prueba5*t;
plot(t, H2_1, 'LineWidth', 1.5)
hold on
plot(t, H2_2, 'LineWidth', 1.5)
hold on
plot(t, H2_3, 'LineWidth', 1.5)
hold on
plot(t, H2_4, 'LineWidth', 1.5)
hold on
plot(t, H2_5, 'LineWidth', 1.5)
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('H2 [cm^3]')
title('Produccion de H2 Vs Tiempo')
legend('Prueba1 V=11.30[v] I=2.8346[A] P=32.0310[w]
Fr=33.33[ml/s]', 'Prueba2 V=11.30[v] I=2.7750[A] P=31.3010[w]
Fr=12.82[ml/s]', 'Prueba3 V=11.30[v] I=2.7515[A] P=31.0750[w]
Fr=6.45[ml/s]', 'Prueba4 V=11.30[v] I=0.81[A] P=4.0500[w]')

```

Fr=33.33[ml/s]', 'Prueba5 V=11.30[v] I=0.82[A] P=3.6500[w]  
Fr=12.82[ml/s]')



### ANEXO 3: CODIGO DE MATLAB PARA SIMULACION DE LA ECUACION DE ELECTROLISIS DE FARADAY.

```
clc
clear all
close all
%% Simulacion de la ecuacion de electrolisis de Faraday
% Para realizar esta simulacion se toma en cuenta la ecuacion de la
% electrolisis de Faraday y la ecuacion de eficiencia de Faraday que
% se tomo
% de una referencia la cual depende del area de las placas y la
% corriente.
% La eficiencia de faraday esta dada por  $nf=f2*((I/A)^2/(I/A)^2+f1)$ 
% Donde f1 y f2 dependen de la temperatura y se determian a traves de
% curvas de operacion.
%  $f1(T)=Af1*T+Bf1$ 
%  $f2(T)=Cf2*T^2+Bf2*T+Ef2$ 
% La ley de faraday estabelce que la produccion de oxihidrogeno(HHO)
% es
% porporcional a la transferencia de electrones en los electrodos, es
% decir
% la intensidad suministrada por el trabajo.
% Tenemos la ecuacion  $v_{HHO}=nf*(N*I)/(z*F)$  produccion de oxihidrógeno
% nf es la eficiencia de faraday
% N numero de placas(electrodos)
% I intensidad de corriente
% z electrones intercambiados en la reaccion en este caso  $2e^-$ 
% F constante de Faraday 96500C/mol
%% Constantes de las funiones de eficiencia de Faraday
% $nf=f2*((I/A)^2/(I/A)^2+f1)$ 
% $f1=Af1*T+Bf1$ ;
% $f2=Cf2*T.^2+Cf2*T+Ef2$ ;
Af1=2.5/1000; % $m^2/cm^4$ °C
Bf1=50/1000; % $m^2/cm^4$ 
Cf2=-1.25e-5; %°C^-2
Df2=0.001; %°C^-1
Ef2=0.885;
A=0.0049; % $m^2$  area de las placas
%% Constantes de la ecuacion de intensidad suministrada
% $v_{HHO}=nf*(N*I)/(z*F)$ 
z=2; %Numero de electrones intercambiados en la reaccion  $H_2(g)+O(g)$ 
F=96500; %Valor aproximado de la constante de Faraday
N=6; %Numero de placas

%% Simulacion variando corriente y temperatura
% Variamos la corriente entre 3.77A y 3.80A con iteraciones cada
% 0.006A
for I=3.77:0.006:3.80;
    T=25:0.01:45; % Temperatura variable entre 25°C y 45°C
    f1=Af1*T+Bf1;
    f2=Cf2*T.^2+Cf2*T+Ef2;
    nf=f2.*[ ((I/A).^2/(I/A).^2+f1)];%Funcion de eficiencia de Faraday
    vHHO=nf*(N*I)/(z*F);%Volumen de oxihidrógeno generado
```

```

figure(1)
plot(T,nf)
xlabel('Temperatura[°C]')
ylabel('Eficiencia de Faraday')
title('Eficiencia de Faraday vs Temperatura con Variacion de
Corriente')

legend('I=3.770A','I=3.776A','I=3.782A','I=3.788A','I=3.794A','I=3.800
A')
grid on
hold on
figure(2)
plot(T,vHHO)
xlabel('Temperatura[°C]')
ylabel('Produccion de oxihidrógeno [g]')
title('Produccion de oxihidrógeno vs Temperatura con Variacion de
Corriente')

legend('I=3.770A','I=3.776A','I=3.782A','I=3.788A','I=3.794A','I=3.800
A')
grid on
hold on
end

%% Simulacion variando area de las placas y temperatura
% Variamos el area de las placas entre 10cm^2 y 50cm^2
for A=10/10000:10/10000:50/10000;
I=2.77;
T=25:0.01:45; % Temperatura variable entre 25°C y 45°C
f1=Af1*T+Bf1;
f2=Cf2*T.^2+Cf2*T+Ef2;
nf=f2.*[ ((I/A).^2/(I/A).^2+f1)];%Funcion de eficiencia de Faraday
vHHO=nf*(N*I)/(z*F);%Volumen de oxihidrógeno generado
figure(3)
plot(T,nf)
xlabel('Temperatura[°C]')
ylabel('Eficiencia de Faraday')
title('Eficiencia de Faraday vs Temperatura con Variacion de area
de electrodo')
legend('A=10cm^2','A=20cm^2','A=30cm^2','A=40cm^2','A=50cm^2')
grid on
hold on
figure(4)
plot(T,vHHO)
xlabel('Temperatura[°C]')
ylabel('Produccion de oxidrogeno [g]')
title('Produccion de oxihidrógeno vs Temperatura con Variacion de
area de electrodo')
legend('A=10cm^2','A=20cm^2','A=30cm^2','A=40cm^2','A=50cm^2')
grid on
hold on
end

```

## **ANEXO 4: CODIGO PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL CONTROL DIGITAL**

```
#include <Wire.h>
#include "DFRobot_LCD.h"
  const int colorR = 255;
  const int colorG = 0;
  const int colorB = 0;
  byte MODE=0;
  byte UP=0;
  byte DOWN=0;
  int modo=0;
  float SP_corriente=0;
  float PV_corriente=0;
  float PV_temperatura=0;
  float SP_flujo=0;
  float sensorCorriente=0;
  float sensorTemperatura=0;
DFRobot_LCD lcd(16,2); //16X2 Matriz de caracteres disponibles en la pantalla lcd
void setup() {
  // inicializamos
  lcd.init();
  lcd.setRGB(colorR, colorG, colorB);
  //Configuracion de las entradas digitales
  pinMode(8,INPUT);
  pinMode(12,INPUT);
  pinMode(13,INPUT);
}

void loop() {
  MODE=digitalRead(8);//Leemos el pin digital 8
  UP=digitalRead(12);//Leemos el pin digital 12
  DOWN=digitalRead(13);//Leemo el pin digital 13
  sensorCorriente=analogRead(A1)*(5.0 / 1023.0);//Lectura sensor de corriente
  sensorTemperatura=analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0);
  PV_corriente=(sensorCorriente-2.5)/0.08333;
```

```

PV_temperatura=sensorTemperatura*100;
if (MODE==1){
  modo=modo+1;
  if (modo>3){
    modo=1;
  }
}
// COONTROL DE CORRIENTE
if (modo==1){

  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Corriente  ");
  if (UP==1 && SP_corriente<3){
    SP_corriente=SP_corriente+0.1;
  }
  if (DOWN==1 && SP_corriente>0){
    SP_corriente=SP_corriente-0.1;
  }
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("SP=");
  lcd.setCursor(9,1);
  lcd.print("PV=");
  lcd.setCursor(3,1);
  lcd.print(SP_corriente);
  lcd.setCursor(12,1);
  lcd.print(PV_corriente);
  lcd.setCursor(7,1);
  lcd.print(" ");
}
if (modo==2){
  if (UP==1 && SP_flujo<33){
    SP_flujo=SP_flujo+1;
  }
  if (DOWN==1 && SP_flujo>0){
    SP_flujo=SP_flujo-1;
  }
}

```

```
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Flujo    ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Value=");
lcd.setCursor(6,1);
lcd.print(SP_flujo);
lcd.setCursor(10,1);
lcd.print("    ")
}
```

```
if (modo==3){
```

```
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Temperatura");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Value=");
    lcd.setCursor(6,1);
    lcd.print(PV_temperatura);
    lcd.setCursor(10,1);
    lcd.print("    ");
```

```
}
```

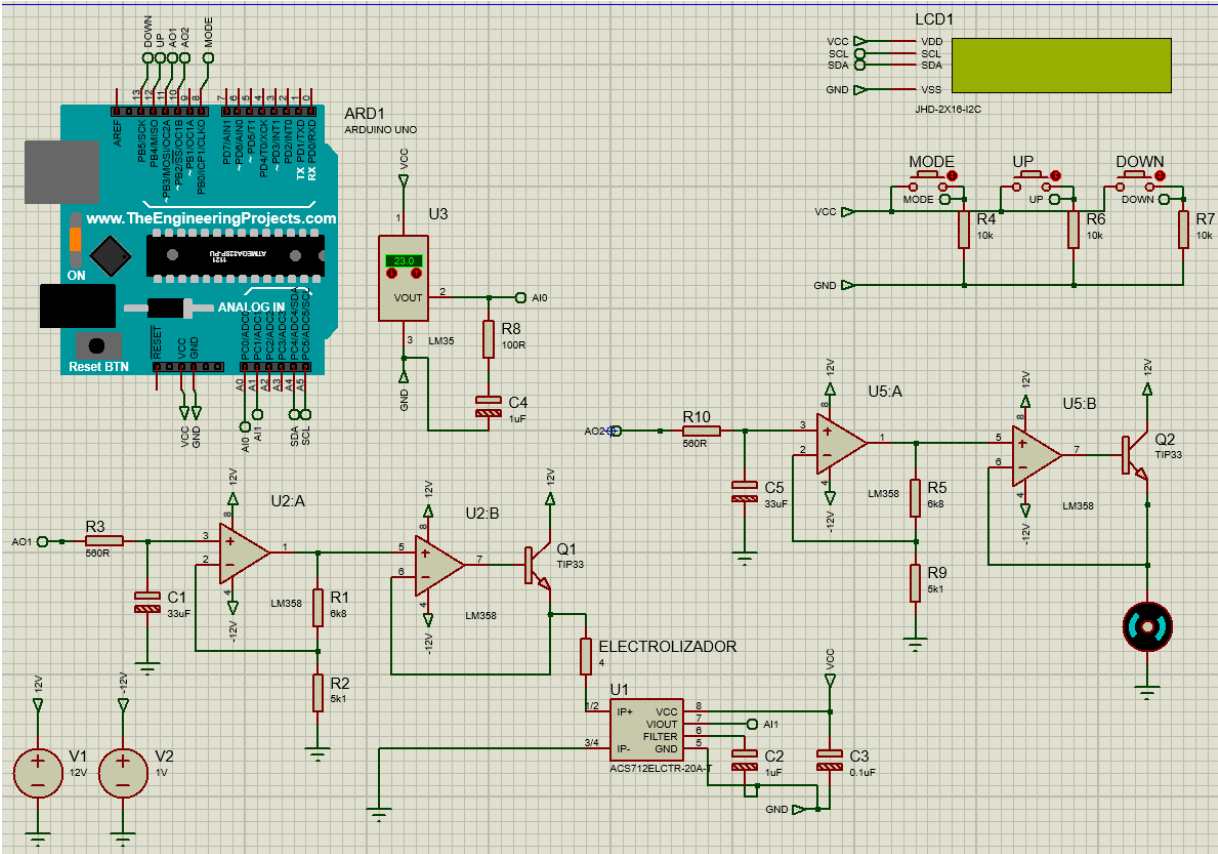
```
//SALIDAS ANALOGICAS
```

```
analogWrite(11,(255/3)*SP_corriente);//Salida analogica para corriente
```

```
analogWrite(10,(255/3)*SP_flujo);//Salida analogica para flujo
```

```
}
```

# ANEXO 5: ESQUEMATICO DEL CIRCUITO DE CONTROL DIGITAL



**ANEXO 6: FOTOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS AL ELECTROLIZADOR**

