



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS**  
**APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**TEMA:**

“MEDICIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE ENERGÍAS RENOVABLES FOTOVOLTAICA Y EÓLICA EXISTENTES EN LA CARRERA DE ELECTRICIDAD UTILIZANDO EL INTERNET DE LAS COSAS PARA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE.”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniero Eléctrico

**AUTOR:**

Darwin Santiago Cangas Ipiales

**DIRECTOR:**

Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo MSc.

**Ibarra – Ecuador**

**2025**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD

#### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1005240088		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Darwin Santiago Cangás Ipiales		
DIRECCIÓN:	Imbabura – Ibarra – Caranqui		
EMAIL:	<a href="mailto:dscangasi@utn.edu.ec">dscangasi@utn.edu.ec</a>		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0960515206

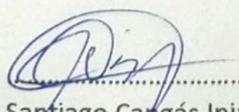
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Medición del potencial energético de Energías Renovables fotovoltaica y eólica existentes en la carrera de Electricidad utilizando el internet de las cosas para generación de hidrógeno verde.
AUTOR (ES):	Darwin Santiago Cangas Ipiales.
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	17/06/2025
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	PhD. Collaguazo Galeano Gerardo Isaías / Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo Msc.

#### CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 19 días del mes de junio de 2025

EL AUTOR:

(Firma)   
Darwin Santiago Cangás Ipiales.

**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Yo, Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo MSc. en calidad de director del señor estudiante Darwin Santiago Cangás Ipiales certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "Medición del potencial energético de energías renovables fotovoltaica y eólica existentes en la carrera de Electricidad utilizando el internet de las cosas para la generación de hidrógeno verde."

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo MSc.

**DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

## DEDICATORIAS

El trabajo de grado lo dedico a Dios por darme salud, paciencia, conocimiento y fortaleza en el camino de la formación profesional y personal, para la culminación de con éxito esta etapa en mi vida.

Dedico este trabajo de grado a mi familia con el apoyo incondicional durante toda la trayectoria académica e igual a todos los docentes que han formado parte de mi vida académica que me impartieron conocimiento y consejos.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por mantenerme con salud y fuera de todo tipo de accidentes en todo el camino de mi vida universitaria, a mi madre y mis hermanos quienes me han involucrado buenos valores y apoyo incondicional por haberme brindado tener una educación excelente.

Agradezco a la Universidad Técnica de Norte por ser parte de esta institución y permitirme formarme en mi vida profesional y a sus docentes que han impartido su conocimiento a lo largo de mi proceso universitario.

Agradecimiento especial a mi director de tesis Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo MSc y asesor PhD. Collaguazo Galeano Gerardo Isaías por guiarme en el proceso de realización del proyecto de grado.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD

#### INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIAS .....	1
AGRADECIMIENTOS .....	2
INDICE DE CONTENIDO.....	3
RESUMEN .....	11
ABSTRACT.....	12
CAPITULO I .....	13
INTRODUCCIÓN .....	13
1.1 Problema de investigación. ....	13
1.2 Problemática para investigar.....	13
1.3 Formulación de la pregunta de investigación.....	14
1.4 Objetivos .....	14
1.4.1 Objetivo general .....	14
1.4.2 Objetivos específicos .....	14
1.5 Alcance y delimitación.....	15
1.6 Justificación .....	17
CAPÍTULO II .....	18
MARCO TEÓRICO.....	18
2. Antecedentes .....	18
2.1 Introducción al hidrógeno como fuente energética. ....	21
2.2 Tecnologías de la generación de hidrógeno. ....	21
2.2.1 Combustibles fósiles.....	21
2.2.1.1 Reforma de hidrocarburos.....	21
2.2.1.1.1 Reformado con vapor .....	22
2.2.1.1.2 Oxidación parcial .....	22
2.2.1.2 Pirólisis de hidrocarburo.....	23
2.2.2.1 Proceso de biomasa.....	24
2.2.2.1.1 Biológico .....	24
2.2.2.1.1.1 Biofotólisis .....	24
2.2.2.1.1.2 Fermentación oscura .....	24
2.2.2.1.1.3 Foto fermentación .....	25



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD

2.2.2.1.2 Termoquímico .....	25
2.2.2.2.1.2.2 Pirólisis.....	25
2.2.2.1.2.3 Combustión .....	26
2.2.2.2 División del agua.....	26
2.2.2.2.1 Termólisis .....	26
2.2.2.2.3 Electrólisis.....	27
2.2.2.2.3.1 Alcalino .....	28
2.2.2.2.3.2 Óxido sólido .....	28
2.2.2.2.3.3 PEM.....	29
2.3 Clasificación de los métodos de producción de hidrógeno .....	30
2.3.1. Hidrógeno Verde .....	30
2.3.2. Hidrógeno Azul .....	30
2.3.3. Hidrógeno Gris.....	31
2.3.4. Hidrógeno Marrón (o Negro).....	31
2.3.5. Hidrógeno Turquesa .....	31
2.3.6. Hidrógeno Rosa .....	31
2.3.7. Hidrógeno Amarillo.....	32
2.3.8. Hidrógeno Blanco. ....	32
2.4. Métodos emergentes y en desarrollo.....	32
2.5. Fuentes Renovables de Energía para la Producción de Hidrógeno.....	33
2.5.1 medición de parámetros eléctricos con IoT.....	34
2.5.2 medición la energía eólica y fotovoltaica .....	34
2.6. Comparación de tecnologías de generación de hidrogeno mediante electrolisis y escoger la más adecuada .....	34
2.6.1 Organizador gráfico de las tecnologías de generación de hidrógeno .....	35
2.6.2 Electrólisis alcalina.....	36
2.6.3 Electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM) .....	37
2.7.Resultado .....	37
CAPÍTULO III. ....	39
MÉTODOS Y MATERIALES.....	39
3.1 Enfoque y tipo de investigación.....	40
3.2 Diseño de la investigación: materiales, equipos y software .....	40



3.2.1 Descripción del área de estudio .....	41
3.2.2 Lugar de estudio .....	41
3.2.3. Procedimiento .....	41
3.3 Materiales. ....	46
3.3.1 Descripción de materiales .....	47
3.4 Matriz de operacionalización de variables. ....	53
3.4.1 Denominación de variables .....	53
3.4.2 Software .....	54
3.4.3 Detalle de ecuaciones matemáticas .....	55
3.5 partes del electrolizador.....	62
3.5.1 Configuración del electrolizador alcalino.....	65
3.5.2 Burbujeador.....	66
CAPITULO IV .....	67
4.1 Cálculos del dimensionamiento del sistema IoT.....	67
4.1.2 Divisores de voltaje para sensores voltaje.....	68
4.1.3 Divisores de voltaje para sensores de corriente .....	69
4.1.4 Convertidor ADS1115 .....	71
4.1.5 Configuración del relé. ....	71
4.1.6 Conexión del sensor MQ-8 .....	72
4.1.7 Conexiones de ESP32 .....	72
4.1.8 Placa de monitoreo IoT.....	73
4.1.9 Procedimiento y análisis de datos .....	75
4.1.10 Configuración del Raspberry Pi3B.....	76
4.1.11 Preparación Raspberry .....	77
4.1.12 Instalación de Node Red .....	78
4.1.13 Instalación de broker MQTT .....	79
4.1.14 Interfaz Node Red.....	81
4.1.15 Dimensionamiento del calibre de los conductores eléctricos.....	82
4.2 Cálculos del dimensionamiento del electrolizador alcalino .....	84
4.2.1 Área de Electrodos .....	84
4.2.2. Fórmula de densidad de corriente.....	85
4.2.3 Cálculo de la cantidad de electrolito a disolver .....	86



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD

4.2.4 Ley de Faraday .....	87
4.2.5 Elaboración del modulo .....	88
4.2.6 Medición visual de la generación de hidrógeno .....	89
4.2.7 Embalse de solución alcalina .....	91
4.2.8 Calibración del sensor MQ8 para la medición de hidrógeno .....	92
4.3 Flujograma de la programación .....	94
4.4 Resultados .....	95
4.4.1 Simulación de la Producción de Hidrógeno en Matlab .....	95
4.4.1.1 Cálculo de carga eléctrica .....	96
4.4.1.2 Cálculo de moles de electrones transferidos .....	96
4.4.1.3 Cálculo de moles de hidrógeno .....	96
4.4.1.4 Cálculo de conversión de gas hidrógeno a volumen .....	96
4.4.1.5 Cálculo de cantidad de agua consumida: .....	97
4.4.1.6 Interpretación del resultado .....	98
4.4.2 Monitoreo del potencial energético de los paneles solares. ....	98
4.4.3 Monitoreo del potencial energético del aerogenerador de eje vertical .....	100
4.4.4 Monitoreo del potencial energético de la turbina eólica .....	102
4.5 Monitoreo de la generación de hidrógeno verde .....	104
4.5.1 Monitoreo de generación de hidrógeno de los paneles solares .....	104
4.5.2 Monitoreo de generación de hidrógeno del aerogenerador de eje vertical .....	106
4.6 Evaluación experimental de la producción de hidrógeno mediante variación de parámetros eléctricos .....	109
4.7 Resultados de la medición visual .....	111
4.7.1 Comportamiento térmico .....	113
4.7.2 Optimización de generación de hidrógeno .....	114
4.7.3 Estimación energética del hidrógeno verde .....	116
Conclusiones .....	121
Recomendaciones .....	121
Referencias bibliográficas .....	123
ANEXOS .....	130
A. Código de Programación ESP32 .....	130
B. Secciones del modulo .....	140



C. Ubicación del módulo.....142

**INDICE DE FIGURAS**

Figura1.- Esquema del proceso para la medición de hidrógeno verde (Fuente: Autor) .....16

Figura2.- Organizador gráfico de tecnologías de generación de hidrógeno (fuente: Autor) .....35

Figura3.- Esquema de proceso de electrólisis. (fuente: Antoinebret) .....36

Figura 4.- Mapa del lugar de estudio (Fuente: Google Maps) .....41

Figura 5.- Flujograma del procedimiento. ....42

Figura 6.- Esquema del sistema IoT .....43

Figura 7.- Esquema general del electrolizador alcalino .....45

Figura 8.-Placa de desarrollo ESP32 .....48

Figura 9.- Raspberry Pi 3 B .....48

Figura 10.- Sensores ACS 712 .....49

Figura 11.- Resistencias eléctricas de 1/2 W .....49

Figura 12.- Acero inoxidable 304.....50

Figura 13.- Agua destilada .....50

Figura 14.- Hidróxido de Sodio ( NaOH) .....51

Figura 15.- Sensor de hidrogeno MQ8 .....52

Figura 16.- Sensor de nivel de líquido, flotador.....52

Figura 17.- Convertidor DC - DC Buck .....53

Figura 18.- Diagrama del tablero principal de control y posición de equipos.....54

Figura 19.- Ubicación del tablero del sistema de medición y el electrolizador.....54

Figura 20.- Esquema de divisor de voltaje.....56

Figura 21.- Conexión del sensor ASC712 al ESP32 .....61

Figura 22.- Componente de la electrólisis Alcalina.....62

Figura 23.- Acero inoxidable 304 .....64

Figura 24.- Configuración tipo " U " de la estructura del electrolizador alcalino .....65

Figura25 .- disposición del electrolizador alcalino.....65

Figura 25.- 40 gramo de hidróxido de sodio (NaOH) .....66

Figura 26.- Burbujeador del electrolizador alcalino.....66

Figura 27.- Valores de los divisores de voltaje y pines del EP32 .....69



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD

Figura 28.- Divisor de voltaje sensor de corriente de la turbina de eje vertical. ....	70
Figura 29.- Divisor de voltaje sensor de corriente de la turbina eólica. ....	70
Figura 30.- Divisor de voltaje sensor de corriente de los paneles solares. ....	71
Figura 31.- Conexión del ADS y sus respectivos pines nombrados .....	71
Figura 32.- Conexión de los pines del Relé .....	72
Figura 33.- Conexión del sensor MQ-8 al conversor ADS115 con su respectivo divisor de voltaje. ....	72
Figura 34.- Identificación de los pines del microcontrolador ESP32 .....	73
Figura 35.- Diseño de la placa baquelita de monitoreo IoT .....	73
Figura 36.- Visión 3D de la Placa de monitoreo .....	74
Figura 37.- Pista de placa de monitoreo en modo espejo para impresión .....	74
Figura 38.- Mascara de componentes de la placa de monitoreo.....	75
Figura 39.- Interfaz Raspberry pi imager .....	75
Figura 40.- Configuración básica de Raspberry Pi3B .....	76
Figura 41.- Preparación del Raspberry Pi3B .....	76
Figura42.-Tarjeta microSD 128GB .....	77
Figura43.- Combo completo de Raspberry pi3b+ .....	77
Figura 44.- Raspberry con SD.....	77
Figura 45.- Raspberry con inhibidores de calor .....	77
Figura 46.- Instalación de Node red en Raspberry pi3B .....	78
Figura 47.- Ingreso del comando ip addr.....	79
Figura 48.- Interfaz Node Red .....	79
Figura 49.- Instalación Mosquito bróker mqtt.....	80
Figura 50.- Programación grafica de Node Red .....	80
Imagen54.- Interfaz de producción de hidrógeno .....	82
Figura55.- Ocho electrodos de acero inoxidable 304 .....	85
Figura 56.- Diseño del módulo metálico con dimensiones .....	89
Figura 57.- Medición visual del hidrógeno verde producido .....	89
Figura 58.- Probeta para medición visual de generación de hidrógeno verde .....	90
Figura 60.- Embalse de solución alcalina .....	91
Figura 61.- Curva de detección de Hidrógeno del sensor MQ-8.....	92
<u>Figura 64.- Simulación de producción de hidrógeno con paneles solares .....</u>	<u>95</u>



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

Figura 65.- Monitoreo de voltaje de paneles solares sin carga .....98

Figura 66.- Monitoreo de la corriente de panel solares sin carga. ....98

Figura 67.- Monitoreo de voltaje y corriente de los paneles solares conectados al electrolizador alcalino .....99

Figura 68.- Monitoreo de voltaje de aerogenerador de eje vertical sin carga.....100

Figura 69.- Monitoreo corriente de aerogenerador de eje vertical conectado al electrolizador alcalino. ....100

Figura 70.- Monitoreo de voltaje del aerogenerador de eje vertical con carga .....101

Figura 71.- Monitoreo de voltaje de aerogenerador de eje vertical con carga. ....101

Figura72.- Monitoreo de voltaje de la turbina eólica sin carga. ....102

Figura 73.- Monitoreo de corriente de la turbina eólica sin carga. ....103

Figura 74.- Monitoreo de voltaje de la turbina eólica con carga. ....103

Figura 75.- Monitoreo de corriente de la turbina eólica con carga. ....104

Figura 76.- Monitoreo de generación de hidrógeno de los paneles solares.....104

Figura 77.- Simulación en Matlab de generación de Hidrógeno de los paneles solares. ....105

Figura 78.- Comparación entre gráficos de corriente y generación de hidrógeno .....105

Figura 79.- Producción de hidrógeno con aerogenerador de eje vertical. ....106

Figura 80.- Simulación en Matlab de generación de Hidrógeno del aerogenerador de eje vertical .....106

Figura 81.- Grafica de corriente vs tiempo de la turbina de eje vertical .....107

Figura 82.- Grafica de corriente vs tiempo de la turbina. ....107

Figura 83.- Simulación en Matlab de generación de Hidrógeno de turbina eólica .....108

Figura 84.- Grafico de la curva de hidrógeno vs voltaje .....110

Figura 85.- Grafico de la curva de hidrógeno vs corriente.....111

Figura 86.- Comportamiento térmico del electrolizador en función de la corriente aplicada. ...114

Figura 87.- Convertidor DC-DC Buck calibrado y con carcasa en impresión 3D.....115

Figura 88.- Generación total de los paneles solares .....118

Figura 89 Generación total de la turbina de eje vertical .....118

Figura 90.- Generación total de la turbina eólica .....119



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

## INDICE DE TABLAS

Tabla1.- Tabla de comparación de las tecnologías más usadas de generación de hidrógeno. ...	38
Tabla2.- Tabla de materiales, equipos y software .....	47
Tabla3.- Tabla de clasificación de sensores ACS712 según su corriente.....	60
Tabla4.- Tabla de propiedades de los aceros inoxidable. ....	64
Tabla5.- Tabla de amperaje soportado según su calibre(fuente: MasVoltaje) .....	82
Tabla6.- Tabla de valores de la curva de detección de hidrógeno del sensor MQ-8 .....	92
Tabla 7.- Tabla de Evaluación Experimental de la Producción de Hidrógeno Mediante Variación de Parámetros Eléctricos.....	109
Tabla 8.- Tabla de datos Experimentales de Producción de Hidrógeno con la probeta .....	112
Tabla 9.- Tabla para demostración de resultados experimentales .....	112
Tabla 10.- Tabla de parámetros para optimizar la producción de hidrógeno.....	114
Tabla 11.- Tabla de distribución horaria de la generación de hidrógeno según condiciones ambientales de viento y radiación solar.....	116



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

## RESUMEN

Este trabajo de grado aborda la medición del potencial energético de las energías renovables fotovoltaica y eólicas disponibles en el edificio de la carrera de Electricidad (CIELE), utilizando el Internet de las Cosas (IoT) para la generación de hidrógeno verde. El problema radica en la necesidad de optimizar el uso de fuentes renovables para producir hidrógeno, ya que este es un vector energético limpio, El objetivo principal de este trabajo es analizar cómo se puede estimar la producción de hidrógeno verde a partir de un sistema integrado, utilizando tanto infraestructura disponible como tecnologías emergentes, entre ellas el Internet de las Cosas (IoT), para optimizar el proceso. La metodología incluye la implementación de sensores para medir voltaje y corriente de las fuentes renovables, un microcontrolador ESP32 para la medición y transmisión de datos, y un Raspberry Pi 3B con Node-Red para el almacenamiento y visualización de datos. Estos componentes permiten la monitorización en tiempo real. Los resultados obtenidos evidencian un funcionamiento constante y eficiente tanto de los paneles solares como de los aerogeneradores, demostrando una capacidad suficiente para cubrir la producción de hidrógeno requerida en entornos educativos y proyectos de investigación. En conclusión, el hacer uso de IoT en la gestión de fuentes de energías no convencionales presenta un rumbo eficiente para la generación de hidrógeno verde. Este estudio no solo proporciona una base para futuras investigaciones, sino que también demuestra el potencial de implementar sistemas similares en otros entornos educativos y de investigación.

**Palabras clave:** Energías renovables, IoT, Hidrógeno verde, Potencial energético.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

## ABSTRACT

This thesis focuses on measuring the energy potential of photovoltaic and wind renewable sources available at the Electricity Department building (CIELE), using the Internet of Things (IoT) for green hydrogen generation. The main issue lies in the need to optimize the use of renewable sources to produce hydrogen, as it is a clean energy carrier. The primary objective of this work is to analyze how green hydrogen production can be estimated through an integrated system, utilizing both available infrastructure and emerging technologies, including the Internet of Things (IoT), to optimize the process. The methodology involves the implementation of sensors to measure voltage and current from the renewable sources, an ESP32 microcontroller for data measurement and transmission, and a Raspberry Pi 3B with Node-Red for data storage and visualization. These components allow for real-time monitoring. The results show a consistent and efficient performance of both the solar panels and wind turbines, demonstrating sufficient capacity to meet the hydrogen production needs in educational environments and research projects. In conclusion, the use of IoT in managing unconventional energy sources offers an efficient approach for green hydrogen generation. This study not only provides a foundation for future research, but also demonstrates the potential of implementing similar systems in other educational and research settings.

**Keywords:** Renewable energy, IoT, Green hydrogen, Energy potential.

**CAPITULO I****INTRODUCCIÓN****Tema:**

Medición del potencial energético de energías renovables fotovoltaica y eólica existentes en la carrera de Electricidad utilizando el internet de las cosas para generación de hidrógeno verde.

**1.1 Problema de investigación.**

El calentamiento global, causado por actividades humanas, ha sido reconocido por el IPCC como una amenaza que requiere acciones urgentes para limitar el aumento de la temperatura global y mitigar sus impactos negativos. Ecuador, con condiciones geográficas y climáticas favorables, tiene el potencial para adoptar tecnologías de energía limpia y sostenible. Sin embargo, no aprovechar tecnologías emergentes como la IoT limita significativamente su eficiencia y aprovechamiento. En este contexto el hidrógeno verde, producido mediante electrólisis alcalina, emerge como una solución clave en la transición energética, ya que no emite carbono. No obstante, es crucial resolver problemas relacionados con la estabilidad, almacenamiento y su medición para el uso del hidrógeno para maximizar su potencial como energía limpia y disminuyendo la dependencia de combustibles convencionales.

**1.2 Problemática para investigar.**

Ante las claras evidencias del calentamiento global generado por la acción humana, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) destaca la urgencia de adoptar medidas prioritarias para enfrentar este fenómeno. Su objetivo es frenar el incremento de la temperatura media del planeta, ya que su progresión implica múltiples impactos adversos sobre los ecosistemas y el equilibrio ambiental. Además, Ecuador tiene capacidad para adoptar tecnologías de energía limpia y sostenible debido a sus condiciones geográficas y climáticas favorables.



No aprovechar las tecnologías emergentes como la IoT junto con las fuentes renovables limita la capacidad de optimizar su producción y utilización. El emplear el hidrógeno verde como fuente de energía limpia se presenta como un elemento clave para impulsar la transición energética.

El electrolizador alcalino es una tecnología fiable y madura para la generación de este sector energético. Es importante resaltar que los problemas que influyen en la obtención del hidrógeno es la estabilidad, acumulación y su uso directo para sus aplicaciones, el uso de este elemento como portador de energía es libre de contaminantes ambientales y se ha convertido en una opción indispensable para mitigar el calentamiento en el planeta y sus emisiones de carbono relacionadas. La implementación de tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT) permite obtener información en tiempo real relacionada con la generación de hidrógeno verde a partir de fuentes de energía renovable.

### **1.3 Formulación de la pregunta de investigación**

¿Qué cantidad de hidrógeno verde se puede obtener con la medición del potencial energético proveniente de energías renovables fotovoltaica y eólica en el edificio de la carrera de Electricidad?

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Medir el potencial energético de energías renovables fotovoltaica y eólica utilizando el internet de las cosas para la generación de hidrógeno verde en el edificio de la carrera de Electricidad.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- 1.- Describir tecnologías de generación de hidrógeno a partir de fuentes renovables fotovoltaica y eólica.
- 2.- Diseñar un prototipo para la producción y medición de hidrógeno verde.
- 3.- Monitorear utilizando IoT la generación de hidrógeno verde.



### **1.5 Alcance y delimitación**

Este estudio se basa en la medición mediante el Internet de las cosas (IoT) de la cantidad de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables fotovoltaica y eólica existentes en el edificio de la carrera de electricidad para la generación de hidrógeno y con los datos obtenidos se estimará la generación de hidrógeno producido.

Con base en una investigación se identificará la tecnología óptima para ser implementada en el edificio de la carrera de Electricidad. Referente a la medición del potencial energético de las fuentes de energía renovable usando IoT, se usará como microcontrolador el ESP32, donde se conectarán los sensores.

Además, se usará para la medición de corriente, el sensor ACS712 para cada fuente al momento de generar hidrógeno, y para la medición de voltaje se realizará un divisor de voltaje para su monitoreo con el microcontrolador ESP32.

Una vez recopilada la información, se procederá a conectar la red Wifi y enviar por medio de MQTT que es un protocolo para la comunicación entre dispositivos en redes de Internet de las Cosas, se implementara un Raspberry Pi 3B para implementar Node Red y visualizar los datos en tiempo real. Con elaboración de la programación se permitirá la recolección de los datos que entrega cada uno de los sensores al ESP32 estos se verán reflejados en Node Red que es una herramienta que permite visualizar la información de dispositivos de hardware, además se realizara simulaciones en Matlab para analizar el comportamiento de electrolizador pues para la obtención de la medida del gas hidrógeno se realizará mediante electrolisis alcalina y su configuración consta de una celda electrolítica que comprende dos electrodos inmersos en agua a la que se ha incorporado una mínima cantidad de electrolito, como el NaOH. El electrolito es muy importante porque el agua no tiene iones suficientes para conducir la carga eléctrica adecuadamente. En el ánodo, la molécula de agua sufre un proceso de oxidación que da lugar a la formación de oxígeno en estado gaseoso y protones (iones hidrógeno). Simultáneamente, en el cátodo ocurre una reacción de reducción en la que el agua produce hidrógeno gaseoso junto con iones hidroxilo.



El proceso de medición del hidrógeno generado mediante electrólisis se basa en calcular la cantidad de carga eléctrica que circula por el sistema. A partir de la reacción química del agua, se sabe que por cada molécula sometida a electrólisis se liberan dos moles de hidrógeno en forma gaseosa. Para cuantificar esta producción se recurre a la Ley de Faraday, la cual relaciona directamente la carga eléctrica con la cantidad de sustancia generada. Una vez estimados los moles de hidrógeno, se aplica su masa molar para transformar este valor en volumen. Esta metodología se representa esquemáticamente en la figura 1.

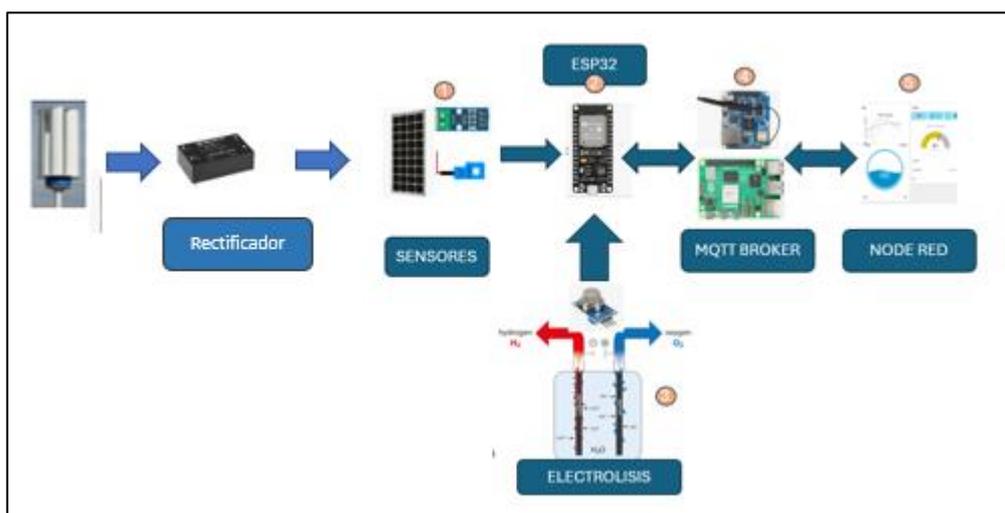


Figura1.- Esquema del proceso para la medición de hidrógeno verde (Fuente: Autor)

De esta manera, se facilita la obtención de datos en tiempo real relacionados con la producción eléctrica proveniente de fuentes renovables. A través de estos dispositivos es posible obtener información precisa sobre el rendimiento energético, incluyendo la eficiencia de paneles solares y aerogeneradores, así como estimaciones de la cantidad de hidrógeno que podría generarse a partir de dicha energía. Además, se desarrollará un prototipo funcional que permita producir hidrógeno utilizando el proceso de electrólisis.



## **1.6 Justificación**

Durante el año 2019, las emisiones globales de dióxido de carbono asociadas a la generación de energía a partir de combustibles fósiles dejaron de crecer, luego de dos años consecutivos de incremento. Esta estabilización se atribuye principalmente al incremento en el uso de energías renovables, en especial la energía solar fotovoltaica y la eólica.

El hidrógeno destaca por su valor estratégico debido a su carácter sostenible y a su amplia gama de aplicaciones, lo que lo convierte en una alternativa eficaz frente a los combustibles fósiles. Su uso contribuye significativamente a la reducción del impacto ambiental. En el ámbito energético, puede emplearse como fuente en vehículos impulsados por pilas de combustible, así como en la industria química, donde sirve para almacenar energía o participar en procesos como la síntesis de amoníaco y otros compuestos.

Beneficiando al ambiente como fuente de energía alterna y a estudiantes para el uso o estudio de la generación de hidrógeno.

Además, es viable ya que existe el acceso a las fuentes de energías renovables CIELEC y de implementar las herramientas necesarias con un costo estimado posible.

Ayudando a abordar problemas como emisiones de gases que afectan a la naturaleza, disminuyendo así las emisiones de gases contaminantes y evitando deficiencia en la gestión energética debido a su implementación de sistemas de medición de monitoreo inteligente.

**CAPÍTULO II****MARCO TEÓRICO****2. Antecedentes**

El calentamiento global es uno de los resultados principales de la liberación de dióxido de carbono. Esto se debe en gran medida a que las fuentes de energía no renovables son responsables de una gran parte de esta emisión, que abarcan desde el cambio climático y la contaminación del aire y el agua hasta la degradación de los ecosistemas y el riesgo para la salud humana.[1]

El hidrógeno ha surgido como una opción energética prometedora a nivel mundial debido a su versatilidad en la producción, sus excelentes propiedades energéticas y su Aplicación en una variedad de sectores como, por ejemplo, en el sector energético.

Esto lo convierte en una alternativa innovadora y sostenible para diversas tecnologías energéticas [3].

En Latinoamérica, la hidroelectricidad se presenta como una opción altamente viable para la producción de hidrógeno, dado que no requeriría una infraestructura adicional, debido a que la mayoría de los países de la región ya disponen de fuentes hidroeléctricas para su suministro energético [2].

Sin embargo, la producción de hidrógeno debe ser completamente verde, sin generar emisiones contaminantes en ningún paso del proceso, es decir usar fuentes de energía renovables para su obtención [4].

Para la producción de hidrógeno puede ser producido o descompuesto por moléculas químicas que contengan átomos de hidrógeno como los hidrocarburos, o el agua [5].

El descomponer los hidrocarburos generan emisiones de carbono, por lo que no es una opción viable. Una alternativa adicional consiste en separar la molécula del agua para obtener hidrógeno a través de la electrólisis [6]. No obstante, se requiere disponer de un suministro eléctrico constante y proveniente de fuentes renovables para poder producir hidrógeno verde. Dentro de las alternativas renovables disponibles se encuentran la energía solar y eólica, las cuales aprovechan el potencial disponible.



como fuentes primarias para el electrolizador, convirtiendo el hidrógeno en un vector energético para su posterior uso final.

Es importante conocer la cantidad constante y sostenible de hidrógeno que se podría producir mediante energías renovables para realizarlo eficazmente dicho sistema [7]

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) muestra que un estudio realizado en los Estados Unidos en el caso de la energía solar se pudo obtener una producción de hidrógeno equivalente a  $8,7 \times 10^9$  y con energía eólica  $2,74 \times 10^{11}$  ton de hidrógeno y mediante hidroeléctricas asumiendo que un 30% para la producción de hidrógeno obteniendo  $1 \times 10^6$ ton, En Brasil su producción de hidrógeno verde a través de electrólisis con fuentes de energía provenientes de centrales hidroeléctricas en combinación con energía solar y eólica se obtuvo  $3,22 \times 10^6$ ton. Canadá mediante la planta hidroeléctrica Tayson obtuvieron 7 ton/día [8] [9][10].

Para estimar la producción de hidrógeno, se procede a calcular el potencial de hidrógeno que se puede obtener en cada proceso [12].

En primer lugar, en el caso de la energía eólica, se obtienen los valores teóricos de generación eléctrica utilizando el Atlas Eólico desarrollado en base a un sistema MesoMap donde indica que en Imbabura produce 18.95MW – 32.54Wh/año y en el caso de energía solar mediante el Atlas Solar el cual tiene como base información del NREL sobre irradiación solar diaria directa, difusa y global [13]. En el caso de la energía hidroeléctrica, existen dos enfoques para destinarla a la producción de hidrógeno. El primero consiste en asignar aleatoriamente un porcentaje de la generación total exclusivamente para este fin. El segundo método se basa en aprovechar el caudal de agua turbinada que usualmente se desecha, lo que permitiría mejorar la eficiencia global de la planta al utilizar ese recurso en la generación de hidrógeno. Posteriormente, se calcula el potencial productivo de hidrógeno utilizando un electrolizador de membrana de intercambio protónico (PEM). Ya que según estudios la eficiencia de este tipo de electrolizador es aproximada del 75 % [11]. Explorar soluciones energéticas sostenibles



e incorporar el Internet de las Cosas (IoT) propone un sistema innovador para optimizar la generación de hidrógeno avanzando un Futuro sostenible mediante la eficiente generación de energía verde, adaptándose al panorama siempre cambiante de las aplicaciones de IoT. [14].

Se recopilarán datos sobre la generación de energía utilizando registradores de datos conectados a cada fuente de energía, que registrarán las tasas de generación en intervalos específicos emplearán dispositivos IoT en un entorno controlado para recolectar datos sobre patrones de consumo de energía.[15] En Colombia se realizó un prototipo de sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos y nivel de agua en un acuífero. [20] IoT permite la conectividad de dispositivos y la toma de decisiones. Este estudio emplea sensores e IoT, utilizando MQTT para el envío de datos, este protocolo será usado para el monitoreo del voltaje y corriente entregados por los paneles solares y turbinas eólicas en que se encuentran en CIELEC. Investigaciones recientes destacan la eficacia de la IoT en diversos campos, como la gestión datos que aprovecha el internet de las cosas para optimizar su uso con energías renovables.

A través de MQTT utilizando un microcontrolador ESP32 equipado con un módulo 3G (GSM), un dispositivo de hardware que permite la conectividad a redes móviles 3G utilizando la tecnología GSM. Estos módulos son esenciales en una variedad de aplicaciones que requieren comunicación móvil, como dispositivos IoT enviando datos a la plataforma Adafruit IO para visualización en tiempo real. Los datos recopilados se exportaron a un archivo de valores separados por comas (CSV) para su análisis utilizando [14][20] ESP-32, recopila datos de consumo de energía del submedidor y los transmite a la nube. Estos datos se utilizan para supervisar los valores de un sistema fotovoltaico típico instalado [21].



El ESP32, con conectividad MQTT, es crucial en IoT para medir el potencial energético de sistemas fotovoltaicos y eólicos. Permitiendo la transmisión de datos a plataformas como Adafruit IO, la exportación a archivos y Node Red haciendo uso de un Raspberry Pi3B para análisis. Esto mejora el monitoreo debido a su compatibilidad con Node-RED.

### **2.1 Introducción al hidrógeno como fuente energética.**

El hidrógeno ha venido cobrando un gran interés a nivel global debido por sus propiedades energéticas y tiene la posibilidad de obtenerlo mediante diversas fuentes como son las energías renovables [1]. La producción del hidrógeno se presenta como una alternativa viable para solucionar la problemática de las emisiones contaminantes, ya que no solo permite almacenar y transportar energía de una manera eficiente, sino que también de una manera amigable con el medio ambiente [2]. Esto quiere decir que el hidrógeno está siendo reconocido y desarrollado como un medio para transportar, almacenar y distribuir energía.

### **2.2 Tecnologías de la generación de hidrógeno.**

Las tecnologías se basan en principios químicos y físicos que se muestran métodos y principios involucrados en la generación de hidrógeno verde.

#### **2.2.1 Combustibles fósiles**

Son recursos naturales que se han formado a partir de restos orgánicos de plantas y animales enterrados bajo capas de sedimentos durante millones de años, estos incluyen el carbón, el petróleo y el gas natural [22]. Siendo usados como fuente energía no renovable.

##### **2.2.1.1 Reforma de hidrocarburos**

La reforma de hidrocarburos es un método utilizado para obtener hidrógeno a partir de compuestos como el gas natural, los cuales se combinan con vapor de agua y se someten a altas temperaturas en presencia de un catalizador. Este proceso genera una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, el cual reacciona posteriormente con más vapor para



formar dióxido de carbono adicional y una mayor cantidad de hidrógeno. Entre estas técnicas, la reforma de metano con vapor destaca por su eficiencia y bajo costo de operación. Sin embargo, al generar  $\text{CO}_2$ , presenta implicaciones ambientales. Actualmente, este procedimiento se aplica de forma extensa en sectores como la producción de amoníaco, el refinado de petróleo y el suministro de hidrógeno para pilas de combustible. [23].

#### **2.2.1.1.1 Reformado con vapor**

Es el proceso que produce mayor concentración de hidrógeno en el producto y menores emisiones de  $\text{CO}_2$  por mol de hidrógeno producido [17], en este proceso, los hidrocarburos reaccionan con vapor de agua a altas temperaturas y presiones en presencia de un catalizador para producir una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono [18]. El hidrógeno producido a través de este método se emplea ampliamente en diversas áreas, entre ellas la industria química, la refinación de crudo y la generación de energía mediante celdas de combustible. Si bien se trata de una opción tecnológicamente eficiente y con bajos costos operativos, su desventaja principal es la emisión de dióxido de carbono como subproducto, lo que implica un desafío ambiental que requiere ser mitigado mediante técnicas de captura y almacenamiento de carbono.

#### **2.2.1.1.2 Oxidación parcial**

La oxidación parcial es una tecnología empleada para generar hidrógeno a partir de fuentes como el gas natural o derivados del petróleo. Este procedimiento consiste en calentar los hidrocarburos junto con una cantidad controlada de oxígeno, lo cual se realiza a elevadas temperaturas. A diferencia de la combustión completa, que produce principalmente monóxido de carbono e hidrógeno.

El almacenamiento de gas hidrógeno en sitios de almacenamiento de gas natural podría ayudar a proporcionar el almacenamiento de energía a gran escala necesario para descarbonizar el suministro energético mundial. [24]



### **2.2.1.1.3 Reforma autotérmica**

El reformado autotérmico de metano es un procedimiento de gran manera estable para la deposición de autotérmico de metano sobre catalizador[25], promovido con metales nobles de reforma autotérmica (ATR) para la producción de hidrógeno se siguen los pasos de oxidación parcial que trata de una oxidación parcial de un hidrocarburo liberando calor después esta reacción con vapor de agua provocando una reacción endotérmica donde el monóxido de carbono producido reacciona con vapor de agua para generar dióxido de carbono y más hidrógeno.

### **2.2.1.2 Pirólisis de hidrocarburo**

Una parte significativa de la energía consumida a nivel mundial proviene de los hidrocarburos, que además representan una fuente clave de ingresos económicos para varios países de América Latina. El problema de la dependencia hacia los hidrocarburos se puede agravar con el incremento en la demanda de energía debido al constante crecimiento de la población [26]

Los hidrocarburos se calientan a altas temperaturas (generalmente entre 800°C y 1200°C) en ausencia de oxígeno estos se descomponen en sus componentes básicos. Por ejemplo, el metano se descompone en carbono sólido (C) e hidrógeno gaseoso (H). El resultado del proceso es hidrógeno gaseoso y carbono sólido. El hidrógeno se puede recolectar y purificar para su uso, mientras que el carbono sólido se puede gestionar o utilizar en otras aplicaciones industriales.

### **2.2.2 Recursos renovables**

El mercado nacional de hidrógeno puede evolucionar migrando de una producción basada en combustibles fósiles a una basada en energía renovable que haga más atractiva la aplicación del hidrógeno como vector energético y que permita un desarrollo de infraestructura con dicho propósito [22]



### **2.2.2.1 Proceso de biomasa**

El proceso implica la transformación de materiales orgánicos renovables, como residuos agrícolas, forestales o de alimentos, en gas de síntesis, a través de la gasificación.

Durante este proceso, según [23] “la biomasa se somete a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, lo que produce una mezcla de gases, incluido el hidrógeno”. Entonces este gas de síntesis puede ser posteriormente purificado para obtener hidrógeno puro, que puede utilizarse como combustible o materia prima en diversas aplicaciones industriales. Esta tecnología aprovecha los recursos naturales de manera sostenible, reduce la dependencia de los combustibles fósiles y ayuda a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero al convertir los residuos orgánicos en una fuente de energía limpia y renovable [26].

#### **2.2.2.1.1 Biológico**

Su principio se basa en emplear organismos vivos, como ciertas algas y bacterias, que pueden producir hidrógeno mediante procesos biológicos como la fermentación y la fotosíntesis.

##### **2.2.2.1.1.1 Biofotólisis**

Las investigaciones se han enfocado a la producción de hidrógeno mediante microorganismos como algas y bacterias teniendo muchas ventajas como es el secuestro de CO<sub>2</sub> uno de los gases más contaminantes. [27]

##### **2.2.2.1.1.2 Fermentación oscura**

Según [16] “La fermentación oscura es un proceso biológico donde ciertos microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo una mezcla de productos, incluyendo hidrógeno. Aunque puede generar hidrógeno, es menos eficiente que otros métodos. Sin embargo, sigue siendo investigada como una opción para la producción de hidrógeno renovable” Se presenta la tecnología de



fermentación oscura (FO) para la producción de hidrógeno, como un proceso amigable con el ambiente [28], ya que depende de que las bacterias descompongan productos orgánicos para producir hidrógeno en condiciones de oscuridad y anaeróbicas. Sin embargo, la cantidad de producción de hidrógeno sigue siendo baja

#### **2.2.2.1.1.3 Foto fermentación**

Involucra el uso de bacterias fotosintéticas. Las bacterias capturan la energía solar y utilizan substratos orgánicos como ácidos grasos volátiles para producir hidrógeno molecular en condiciones anaeróbicas.

#### **2.2.2.1.2 Termoquímico**

En primer lugar, se realiza la gasificación; el gas se compone básicamente de  $H_2$ ,  $CO$  y  $CH_4$ . El metano se convierte en hidrógeno y monóxido de carbono al reformarse con el vapor, además la eficiencia del hidrógeno aumenta al convertir el monóxido de carbono en hidrógeno mediante la reacción de cambio [16]. Esta tecnología adquiere relevancia porque, aunque se genera dióxido de carbono como subproducto, las emisiones provenientes de la biomasa se consideran neutras, ya que no incrementan los niveles de  $CO_2$  en la atmósfera.

#### **2.2.2.1.2.1 Gasificación**

Este proceso se fundamenta en la gasificación, que transforma la biomasa en un gas sintético compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono y otros gases. La conversión se lleva a cabo mediante la aplicación de altas temperaturas en condiciones de escasa presencia de oxígeno.

#### **2.2.2.2.1.2.2 Pirólisis**

El pirólisis es un tratamiento térmico en el que materiales orgánicos se descomponen mediante calor intenso en un entorno sin oxígeno. Este proceso consiste en una combinación de productos, incluyendo gases, líquidos y residuos carbonosos sólidos. Se



puede aplicar a diversos tipos de materia orgánica, como biomasa, desechos agrícolas o plásticos, transformándolos en compuestos de valor como biocombustibles o insumos químicos. Esta tecnología permite aprovechar fuentes renovables y representa una alternativa viable para disminuir el uso de combustibles fósiles, al tiempo que contribuye a una gestión más eficiente de los residuos.

### **2.2.2.1.2.3 Combustión**

En una reacción química se rompen enlaces químicos de los reactivos y como resultado originan otros compuestos químicos en los productos, en todo este proceso la energía liberada o absorbida es diferente en el proceso químico de los reactivos y productos [29]

### **2.2.2.2 División del agua**

La división del agua para la producción de hidrógeno se refiere al proceso de descomponer el agua ( $H_2O$ ) en sus componentes básicos, hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) [31]. Es ampliamente utilizada por su alta pureza y su operación sencilla, utilizando fuentes renovables para un proceso sostenible y libre de emisiones de carbono.

#### **2.2.2.2.1 Termólisis**

Se utilizan el calor solar para producir hidrógeno mediante la división del agua por pasos termoquímicos [30] como la selección de la sustancia que contenga hidrógeno, como el agua ( $H_2O$ ) o un hidrocarburo ( $CH_4$ ). Mediante la aplicación de altas temperaturas en un ambiente libre de oxígeno, las sustancias sometidas a termólisis se fragmentan en sus elementos fundamentales. En el caso del agua, este proceso provoca su separación en hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ). El hidrógeno generado puede ser capturado y posteriormente purificado, permitiendo su utilización como fuente energética o en diversas aplicaciones dentro del ámbito industrial.



#### 2.2.2.2.2 Fotolisis

Se basa en el agua como materia prima y la energía solar como energía, y el agua es descompuesta por microorganismos fotosintéticos para producir hidrógeno [16] el agua ( $H_2O$ ), se expone a la luz solar o luz ultravioleta (UV), que contiene suficiente energía para romper los enlaces químicos en la sustancia. La luz absorbida por la sustancia provoca la descomposición de los enlaces químicos, liberando hidrógeno ( $H_2$ ). El hidrógeno producido durante la fotólisis se puede recolectar y su purificación.

#### 2.2.2.2.3 Electrólisis

El principio de la electrólisis consta de división del agua ( $H_2O$ ) en sus moléculas simples mediante la aplicación de una corriente eléctrica.

La electrólisis es un método utilizado para obtener hidrógeno, el cual consiste en aplicar una corriente eléctrica a una solución acuosa o vapor de agua que contiene un electrólito, como ácido sulfúrico o hidróxido de sodio. A través de este proceso, las moléculas de agua se dividen en oxígeno e hidrógeno, que se liberan en los electrodos: el oxígeno en el ánodo (polo positivo) y el hidrógeno en el cátodo (polo negativo). El hidrógeno producido puede ser recolectado como un combustible limpio y renovable. La electrólisis es una tecnología clave para la producción de hidrógeno verde, especialmente cuando se utiliza energía renovable para alimentar el proceso, ya que no produce emisiones de gases de efecto invernadero [13], el procedimiento se detalla a continuación.

**1.- Selección de la Sustancia:** Se elige una sustancia que pueda ser descompuesta para la aplicación de una corriente DC, como el agua.

**2.- Preparación de la celda electrolítica:** La sustancia seleccionada se coloca en una celda electrolítica que contiene dos electrodos sumergidos en la solución. Los electrodos están conectados a una fuente DC.

**3.Reacciones en los Electroodos: la reacción de los electroodos son los siguientes**

En el cátodo (electrodo negativo): Los  $H^+$  presentes en el agua y los electrones provenientes de la fuente de corriente se combinan para formar moléculas de hidrógeno gaseoso:

En el ánodo (electrodo positivo): Los iones de oxígeno ( $OH^-$ ) presentes en la solución se descomponen y liberan oxígeno gaseoso y electrones

Recuperación de Hidrógeno: El hidrógeno producido en el cátodo se recolecta y purifica

Recuperación de Oxígeno: El oxígeno producido en el ánodo también se recolecta y puede ser utilizado en aplicaciones donde se requiera oxígeno gaseoso.

**2.2.2.3.1 Alcalino**

La electrólisis alcalina es una de las tecnologías más utilizadas para la generación de hidrógeno. Se basa en introducir una corriente eléctrica en una mezcla de agua y un electrolito de carácter alcalino, como el KOH o el NaOH, para inducir la descomposición del agua. Este proceso divide las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno, los cuales se liberan en el ánodo (polo positivo) y el cátodo (polo negativo), respectivamente. El hidrógeno obtenido en el cátodo puede ser almacenado y utilizado como una fuente de energía limpia y renovable. Esta técnica es considerada una opción tecnológica consolidada en el ámbito industrial y se emplea ampliamente, especialmente cuando se acopla a fuentes energéticas renovables para reducir el impacto ambiental.

**2.2.2.3.2 Óxido sólido**

Conocido como (SOEC) trata de la descomposición de una sustancia utilizando una celda electroquímica que utiliza un óxido sólido como electrolito. Aquí están los pasos para obtener hidrógeno mediante la electrólisis de óxido sólido:

1.- Preparación de la Celda SOEC: Se construye una celda electroquímica con un electrolito sólido, típicamente un óxido cerámico conductor de iones entre estos el óxido



de circonio estabilizado con óxido de itrio (YSZ). La celda tiene dos electrodos: el cátodo y el ánodo.

2.- Aplicación de Electricidad: Se suministra energía eléctrica de corriente continua a la celda SOEC para activar el proceso de electrólisis.

3.- Reacciones en la Celda: En el cátodo: Los iones de oxígeno ( $O^{2-}$ ) del electrolito sólido se reducen para formar oxígeno gaseoso ( $O_2$ ) cuando se les suministra energía eléctrica:

Una vez que los  $H^+$  alcanzan el ánodo tras atravesar el electrolito, se combinan con electrones provenientes del circuito externo, formando moléculas de hidrógeno gaseoso.

4.- Recuperación de  $H_2$  y  $O$ : El hidrógeno y el oxígeno obtenidos en los electrodos son almacenados y purificados para su posterior uso en aplicaciones energéticas o industriales.

### **2.2.2.3.3 PEM**

Este método se basa en una celda electrolítica que emplea una membrana de intercambio protónico como electrolito. Durante el proceso, se introduce una corriente eléctrica a través de la membrana que está en contacto con una solución acuosa que contiene un electrolito, como ácido fosfórico o sulfúrico en forma diluida. La membrana permite el tránsito de protones, pero impide el paso de electrones, lo que posibilita la disociación de las moléculas de agua. Como resultado, el oxígeno se libera en el ánodo y el hidrógeno en el cátodo.

1.- Preparación de la celda electrolítica: En una celda electrolítica, se instala una membrana de intercambio protónico entre los dos electrodos, que corresponden al ánodo y al cátodo.

2.- Alimentación de agua y electrolito: Se introduce una solución de agua y un electrolito ácido, como ácido fosfórico o sulfúrico diluido, en la celda electrolítica.



3. Aplicación de corriente eléctrica: Se energiza la celda electrolítica mediante una corriente proporcionada por una fuente de alimentación externa.

4.- Electrólisis: La aplicación de corriente eléctrica provoca la ruptura de las moléculas de agua, separándolas en oxígeno e hidrógeno. En el ánodo ocurre la oxidación del agua, lo que da lugar a la liberación de oxígeno en estado gaseoso; mientras tanto, en el cátodo, los protones se reducen al captar electrones, generando hidrógeno gaseoso como producto.

5.- Separación y recolección de gases: El proceso permite la separación y recolección individual del oxígeno en el ánodo y del hidrógeno en el cátodo.

Entonces los gases producidos, especialmente el hidrógeno, se pueden utilizar en una variedad de aplicaciones, como vehículos de combustible, sistemas de almacenamiento de energía y procesos industriales.

### **2.3 Clasificación de los métodos de producción de hidrógeno**

La producción de hidrógeno puede clasificarse según el tipo de fuente energética empleada en su generación. Esta categorización agrupa los distintos métodos disponibles, entre los cuales se destacan:

#### **2.3.1. Hidrógeno Verde**

El hidrógeno obtenido a través de la electrólisis del agua empleando energía eléctrica proveniente de fuentes renovables como la solar, eólica o hidroeléctrica se considera una alternativa limpia y sostenible, ya que su proceso de producción no genera emisiones de dióxido de carbono.

#### **2.3.2. Hidrógeno Azul**

Este tipo de hidrógeno se genera a partir de gas natural mediante el proceso de reformado con vapor de metano, incorporando técnicas de captura y almacenamiento de carbono (CCS). Gracias a esta combinación, las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la producción se



reducen significativamente, convirtiéndolo en una opción con bajo impacto ambiental en comparación con métodos convencionales.

### **2.3.3. Hidrógeno Gris**

El hidrógeno generado a partir de gas natural mediante reformado con vapor de metano, sin aplicar técnicas de captura de carbono, implica una elevada emisión de dióxido de carbono. Este enfoque tiene un fuerte impacto ambiental, ya que contribuye directamente al cambio climático debido a la liberación no controlada de CO<sub>2</sub> durante el proceso.

### **2.3.4. Hidrógeno Marrón (o Negro)**

Hidrógeno producido a partir de carbón mediante gasificación. El que transforma el carbón en gas con altas temperaturas y agentes gasificantes, produciendo hidrógeno y monóxido de carbono. Su producción genera grandes cantidades de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> entre otros contaminantes.

### **2.3.5. Hidrógeno Turquesa**

El hidrógeno obtenido a través del pirólisis del metano se genera mediante la descomposición térmica de esta molécula, dando como resultado hidrógeno gaseoso y carbono en estado sólido. Aunque esta tecnología aún se encuentra en fase de desarrollo, presenta ventajas potenciales al evitar la emisión directa de CO<sub>2</sub>, aunque requiere soluciones para el manejo y aprovechamiento del carbono sólido resultante.

### **2.3.6. Hidrógeno Rosa**

Este tipo de hidrógeno se obtiene a través de la electrólisis del agua utilizando electricidad proveniente de fuentes nucleares. Aunque no se generan emisiones directas de CO<sub>2</sub> durante su producción, surgen desafíos importantes relacionados con la gestión de desechos radiactivos y la baja aceptación social de la energía nuclear.



### **2.3.7. Hidrógeno Amarillo**

Hidrógeno producido mediante electrólisis del agua utilizando electricidad generada a partir de energía solar específica (a veces el término se usa de manera intercambiable con hidrógeno verde).

### **2.3.8. Hidrógeno Blanco.**

Hidrógeno que se encuentra naturalmente en la Tierra y no requiere proceso de producción. Es un hidrógeno geológico. Su problema radica Disponibilidad limitada y dificultad de extracción.

## **2.4. Métodos emergentes y en desarrollo**

De todos los métodos revisados anteriormente el hidrógeno turqués es un método emergente ya que, a su potencial para producir hidrógeno de manera limpia y eficiente, sin emitir CO<sub>2</sub> asociadas con otros métodos. Su capacidad para utilizar la infraestructura y producir carbono sólido con aplicaciones industriales adicionales lo convierte en una tecnología que promete en la transición energética.

### **Fotoelectrólisis:**

- Emplea la energía del sol para separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno a través de una reacción fotoquímica. Este método depende en gran medida del desarrollo de materiales fotocatalíticos avanzados y de la mejora en el rendimiento de las células solares.

### **Bioproducción de Hidrógeno:**

- **Biomasa y Microorganismos:** Utiliza microorganismos o procesos biológicos para generar H<sub>2</sub> con biomasa o desechos orgánicos. Ejemplos incluyen la fermentación oscura y la fotofermentación.

**Reformado Avanzado:**

- **Reformado con CO<sub>2</sub>:** Este proceso emplea dióxido de carbono, en lugar de vapor de agua, para reformar hidrocarburos, con el propósito de disminuir la emisión de gases de efecto invernadero durante la producción de hidrógeno.
- **Reformado de Hidrocarburos con Energía Renovable:** Integra fuentes de energía renovable para mejorar la sostenibilidad del proceso de reformado.

**Generación de Hidrógeno a partir de Residuos:**

- **Plasma:** Utiliza tecnología de plasma para descomponer residuos en hidrógeno y otros productos útiles.
- **Gasificación de Residuos:** Convierte residuos sólidos en otro tipo de gas, desde el cual se puede extraer hidrógeno de manera pura.

**Tecnologías de Membranas Avanzadas:**

- **Membranas de Intercambio Protónico (PEM) Mejoradas:** Se están explorando nuevos materiales y diseños estructurales con el fin de optimizar el rendimiento y abaratar los costos de las membranas de intercambio protónico (PEM).

**2.5. Fuentes Renovables de Energía para la Producción de Hidrógeno.**

Las energías renovables son esenciales para avanzar en una producción de hidrógeno más limpia y sustentable, ya que representan una opción viable frente a los métodos tradicionales que dependen de combustibles fósiles. Al incorporarlas en los procesos de generación, se disminuyen las emisiones de gases contaminantes y se impulsa una transición hacia una economía del hidrógeno más respetuosa con el medio ambiente. Entre las principales fuentes renovables utilizadas en este contexto se encuentran la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y la biomasa. Estas permiten alimentar



distintos procesos, como la electrólisis, la fotoelectrólisis o la gasificación, mediante el uso de energía libre de emisiones. Aunque ofrecen una vía ecológica para la obtención de hidrógeno, estos sistemas todavía enfrentan desafíos como la intermitencia en el suministro energético y los elevados costos iniciales. Sin embargo, la integración de varias fuentes renovables puede mejorar tanto la estabilidad como la eficiencia del proceso de producción de hidrógeno.

### **2.5.1 medición de parámetros eléctricos con IoT**

La integración de IoT en estos sistemas utiliza sensores, dispositivos de comunicación y plataformas de análisis para mejorar la gestión y el rendimiento. Sensores de corriente, como el ASC712, miden la producción eléctrica, mientras que microcontroladores como el ESP32 y el Raspberry Pi 3 gestionan los datos. Herramientas basadas en la nube, como Node-RED, permiten la recopilación y análisis de datos en tiempo real, facilitando la estimación de la producción de hidrógeno verde. La incorporación de tecnologías IoT en los sistemas de medición eléctrica ha optimizado el consumo energético y contribuido a una disminución de los costos operativos.

### **2.5.2 medición la energía eólica y fotovoltaica**

La medición de energía eólica permitió un monitoreo preciso de la generación eléctrica proveniente de turbinas eólicas. Estas turbinas generaron energía en forma de corriente alterna (CA), y está conectada aun regulador de carga que proporciona CC al diferencia de los paneles fotovoltaicos estos proporcionan energía en DC y también están conectados a un regulador de carga y sus mediciones fueron medidos a su salida mediante sensores de voltaje y corriente.

## **2.6. Comparación de tecnologías de generación de hidrogeno mediante electrolisis y escoger la más adecuada**

La figura 2 muestra un organizador gráfico que resume las tecnologías abordadas en la revisión bibliográfica relacionadas con la producción de hidrógeno verde.



**2.6.1 Organizador gráfico de las tecnologías de generación de hidrógeno**

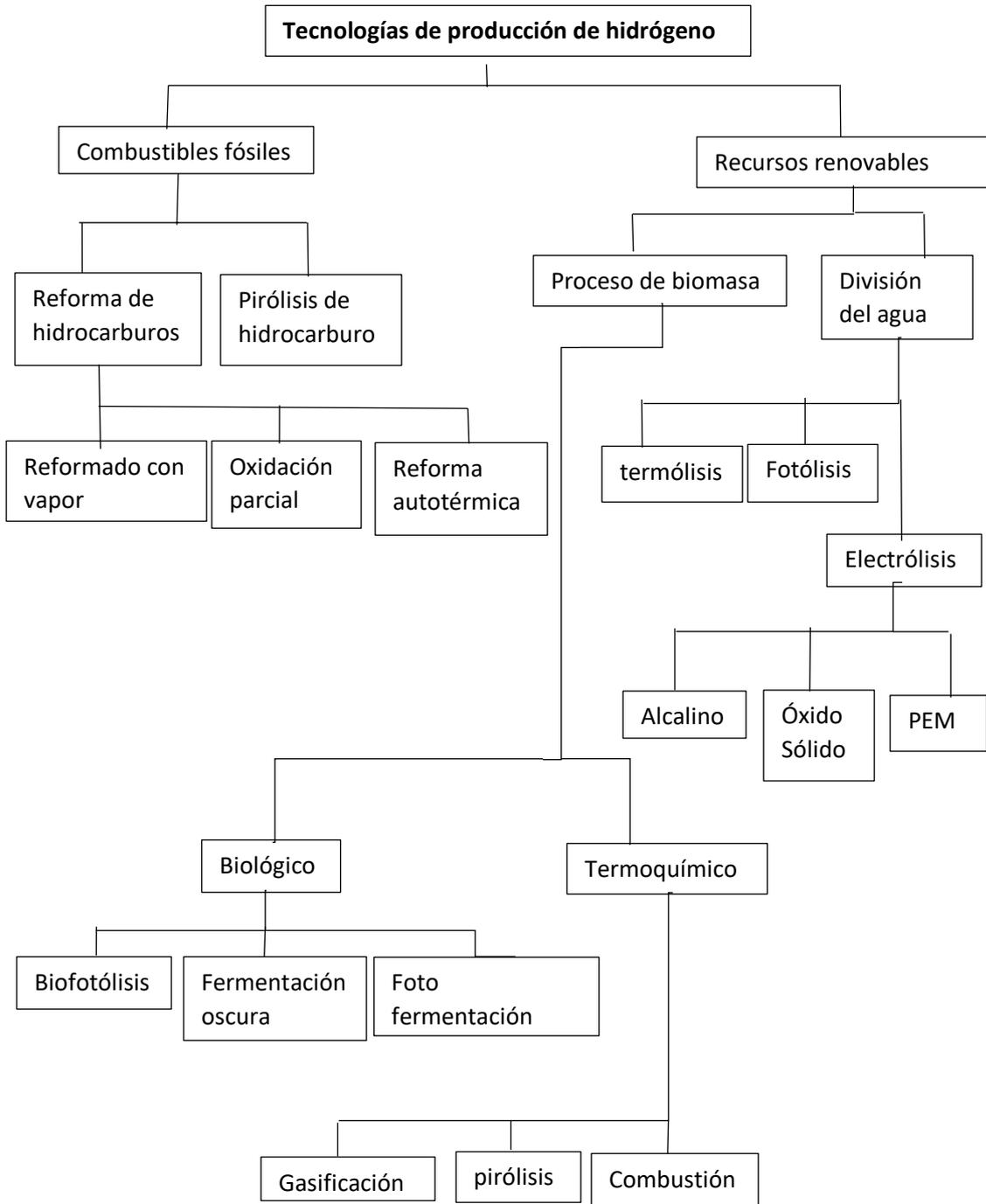


Figura2.- Organizador gráfico de tecnologías de generación de hidrógeno (fuente: Autor)



En la figura 2 se muestra una categorización de las distintas tecnologías utilizadas para la producción de hidrógeno, las cuales se agrupan en función de la fuente energética que emplean y la materia prima utilizada. Entre ellas, la tecnología de óxido sólido presenta limitaciones para su adopción a gran escala, principalmente por los elevados costos asociados y las altas temperaturas necesarias para su operación, lo que dificulta su aplicación.

En contraste, los métodos basados en electrólisis alcalina y en membranas de intercambio protónico (PEM) son altamente valorados por su eficiencia y por la capacidad de generar hidrógeno con un alto nivel de pureza, requisito fundamental en sectores industriales y energéticos. Ambas tecnologías han alcanzado un grado de desarrollo que permite su implementación tanto en sistemas de pequeña escala como en proyectos de gran envergadura, además de su compatibilidad con fuentes renovables como la solar y la eólica. La electrólisis alcalina, en particular, se destaca por ser más asequible y tener menor impacto ambiental

### 2.6.2 Electrólisis alcalina.

Según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España (MITERD, 2020) [19] La electrólisis se caracteriza por la disociación de la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno en estado gaseoso haciendo uso de electricidad continua, como se muestra en la figura3, entregada por una fuente de alimentación conectada a dos electrodos, en los cuales se realiza la ruptura de la molécula del agua para la cual existen diferentes tecnologías de electrolizadores para producir hidrógeno.

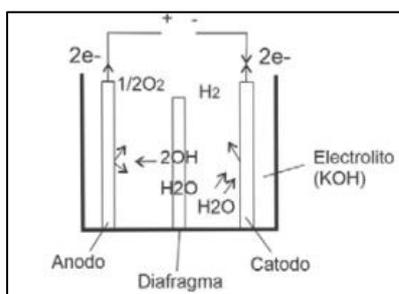


Figura3.- Esquema de proceso de electrólisis. (fuente: Antoinebret)



Según (MITERD 2020) Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico indica que en esta tecnología el electrolito en el que se produce la conducción de los iones

Es una disolución alcalina [32], como se observa en el esquema generalmente de hidróxido de potasio (KOH), el cual es apropiado porque presenta una gran conductividad iónica.

Su estabilidad química frente al voltaje aplicado evita cualquier deterioro que pueda afectar el rendimiento del proceso electrolítico. Asimismo, presenta resistencia frente a las fluctuaciones de pH derivadas de los cambios en la concentración de protones, lo que contribuye a la eficiencia general del sistema.

### **2.6.3 Electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEM)**

Este método de generación de hidrógeno utiliza una membrana selectiva que únicamente permite el paso de protones ( $H^+$ ), mientras bloquea el movimiento de otros gases a través de ella los gases como el oxígeno y el hidrógeno. Se aplica una corriente eléctrica entre dos electrodos separados por esta membrana, lo que provoca la división del agua en oxígeno e hidrógeno. El oxígeno se genera en el ánodo, mientras que el hidrógeno se libera en el cátodo. La membrana PEM, compuesta por un polímero con propiedades conductoras de protones, facilita su transporte desde el ánodo hacia el cátodo, completando así el proceso electrolítico.

## **2.7.Resultado**

En resumen, cada tipo de electrólisis presenta ventajas y limitaciones particulares, por lo que su elección depende de las condiciones específicas del proceso de producción de hidrógeno y del entorno en el que se implementará. En este caso de estudio, la electrólisis alcalina se consideró la opción más apropiada debido a que no genera emisiones de  $CO_2$  durante su operación y cuenta con antecedentes sólidos de aplicación tanto en investigaciones previas como en procesos industriales a gran escala. A continuación, se



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

detallan las principales características de las tecnologías utilizadas para la obtención de hidrógeno mediante la división del agua, así como la justificación de la alternativa seleccionada como la más adecuada.

Tabla 1.- Tabla de comparación de las tecnologías más usadas de generación de hidrógeno.

<b>Característica</b>	<b>Electrólisis PEM</b>	<b>Electrólisis Alcalina</b>
Principio de funcionamiento	Emplea una membrana de intercambio protónico para dividir las moléculas de agua y generar hidrógeno y oxígeno de forma separada.	Se basa en una disolución alcalina, como hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH), que actúa como electrolito para separar el agua en sus componentes: hidrógeno y oxígeno.
Material de la membrana/electrolito	Membrana de polímero conductor (PEM).	Solución alcalina (KOH o NaOH).
Temperatura de operación	Baja (50-80°C)	Moderada (70-90°C).
Eficiencia	Alta eficiencia de conversión energética (60-70%).	Alta eficiencia de conversión energética (65-75%).
Mantenimiento	Más frecuente y costoso, debido a la sensibilidad de los componentes.	Menos frecuente y más económico, los sistemas son más simples y robustos.
Aplicaciones típicas	Aplicaciones de alta pureza y baja escala, como laboratorios y sectores especializados.	Producción industrial a gran escala, generación de energía renovable, y aplicaciones comerciales.

La electrólisis es la tecnología más utilizada para la producción de hidrógeno verde [33].

Optar por la electrólisis alcalina para producir hidrógeno utilizando energía solar y eólica es una opción viable debido a su durabilidad, compatibilidad con la variabilidad de la



energía solar y el viento, además de sus bajos costos en comparación con las demás tecnologías, facilitando una transición hacia fuentes de energía más sostenibles y renovable, para la producción de esta fuente energética.

### **CAPÍTULO III.**

#### **MÉTODOS Y MATERIALES**

##### **Introducción**

Asimismo, se realizaron simulaciones en Matlab con el fin de analizar el comportamiento del sistema de electrólisis. La producción de hidrógeno se llevó a cabo utilizando una celda electrolítica alimentada con una solución de NaOH como electrolito. La detección del hidrógeno generado se efectuó mediante un sensor MQ-8, y la cantidad obtenida se calculó aplicando la ley de Faraday, convirtiendo los moles de hidrógeno en su volumen correspondiente.

Se usaron divisores de voltaje para medir el voltaje de las fuentes renovables con el ESP32 debido a varias razones. Primero, reducción de voltajes altos a un nivel seguro y medible dentro del rango de entrada del ESP32, que es de 0 a 3.3V. Segundo, protege los pines del microcontrolador de sobrevoltajes, evitando posibles daños. Tercero, permitió mediciones precisas al ajustar el voltaje a un rango adecuado. Cuarto, facilitó la adaptación a diferentes fuentes de voltaje mediante el ajuste de resistencias. Por último, proporcionó una solución simple y económica para escalar el voltaje, garantizando la compatibilidad con el microcontrolador.

El microcontrolador ESP32 se utilizó en el trabajo de grado debido a su conectividad Wi-Fi que facilitó la transmisión de datos de forma inalámbrica y su versatilidad permitió manejar múltiples tareas simultáneamente. Ofreció varios pines de entrada analógica y digital, ideales para conectar y leer sensores como el ACS712. La compatibilidad con entornos de desarrollo como Arduino IDE simplificó la programación. Además, su bajo



consumo energético y costo accesible hicieron que fuera una opción eficiente y económica para aplicaciones IoT.

El sensor de corriente ACS712 fue elegido porque ofrece mediciones precisas y un rango amplio para diferentes niveles de corriente. La salida analógica se integra fácilmente con el ESP32 para el análisis de datos, es económico y de fácil accesibilidad facilitando su uso.

Se llevaron a cabo simulaciones en Matlab con el objetivo de evaluar el rendimiento del sistema de electrólisis. Para la generación de hidrógeno, se utilizó una celda electrolítica con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) como medio conductor. La presencia del gas fue verificada mediante el uso del sensor MQ-8, y la cantidad obtenida se determinó aplicando la ley de Faraday, lo que permitió convertir los moles producidos en volumen.

### **3.1 Enfoque y tipo de investigación**

Este trabajo tuvo un enfoque cuantitativo ya que involucra la recolección de datos numéricos de voltaje, corriente y producción de hidrógeno mediante sensores, además se analizaron estos datos en la nube, se usó ecuaciones matemáticas y simulaciones para predecir el comportamiento del sistema y su producción estimada de hidrógeno. Los resultados fueron cuantificables y comparables entre los obtenidos en la simulación como en la medición en el prototipo implementado.

Este proyecto se desarrolló bajo un enfoque investigativo y experimental, ya que tuvo como objetivo principal la implementación y evaluación de un sistema destinado a recolectar y analizar datos relacionados con el potencial energético de fuentes renovables, específicamente solar fotovoltaica y eólica. Para ello, se integró tecnología IoT en la prueba de un prototipo para la generación de hidrógeno verde.

### **3.2 Diseño de la investigación: materiales, equipos y software**

El diseño metodológico de este estudio expone los materiales, dispositivos y programas utilizados para cumplir con los objetivos establecidos, entre ellos la integración de



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD

soluciones IoT en sistemas basados en energías renovables, con el propósito de medir la producción de hidrógeno verde.

#### 3.2.1 Descripción del área de estudio

Se realizó el estudio en la Universidad Técnica del Norte, el lugar en donde fue realizado es en el CIELE, donde se midió el potencial energético de las fuentes renovables fotovoltaicas y eólica existentes en el edificio utilizando IoT,

#### 3.2.2 Lugar de estudio

El estudio se llevó a cabo específicamente en el laboratorio de Máquinas Eléctricas, que cuenta con un tablero de control de las fuentes renovables a usar en este proyecto, facilitando el acceso a la implementación de los sensores y conexión del electrolizador para las respectivas mediciones.



Figura 4.- Mapa del lugar de estudio (Fuente: Google Maps)

#### 3.2.3. Procedimiento

A continuación, se describe mediante un organizador grafico el procedimiento implementado.

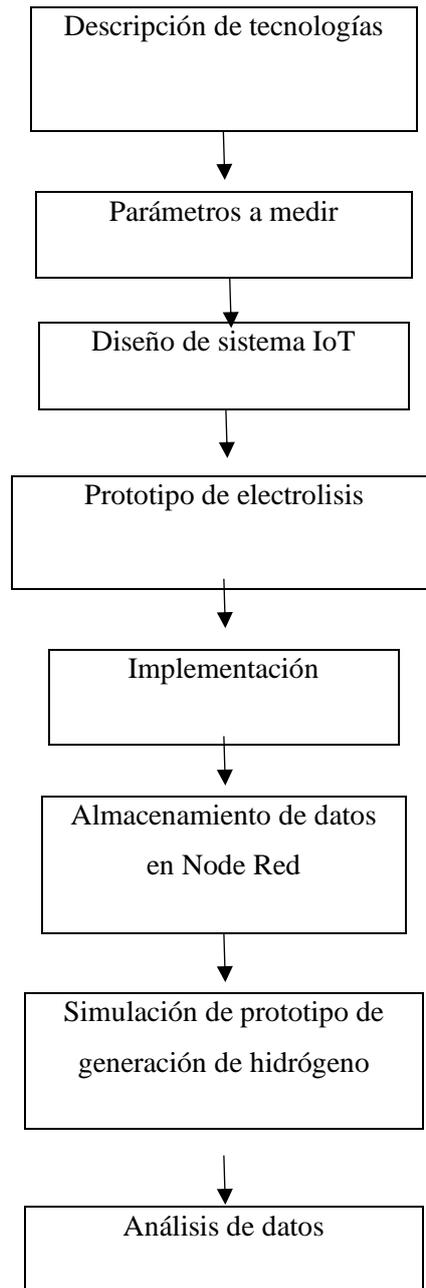


Figura 5.- Flujograma del procedimiento.

A continuación, se describe cada etapa del flujograma.



### Descripción de tecnologías

La etapa inicial, representada en la figura 3, consistió en una revisión exhaustiva de investigaciones previas relacionadas con el uso de tecnologías IoT para medir variables eléctricas en sistemas destinados a la generación de hidrógeno verde. Este análisis incluyó artículos científicos, libros y otros documentos relevantes sobre la integración del IoT en sistemas de energías renovables. Para ello, se recurrió a bases de datos académicas como Google Scholar, Scopus y ScienceDirect, utilizando términos clave como “hidrógeno verde”, “IoT en energía renovable” y “electrólisis alcalina”, entre otros. Como resultado de esta revisión, se concluyó que la electrólisis alcalina era la alternativa más adecuada para aplicar en el proceso de obtención de hidrógeno verde.

### Parámetros para medir

Una vez elegido los sensores adecuados para medir voltaje y corriente. Se instaló los sensores en las salidas de los reguladores de carga de las turbinas eólicas, y se conectó estos sensores al ESP32 para permitir la transmisión de datos obtenido con la medición de parámetros eléctricos de las fuentes renovables, asegurando la correcta monitorización de estos parámetros críticos y la medición de hidrógeno producido en la figura 6.

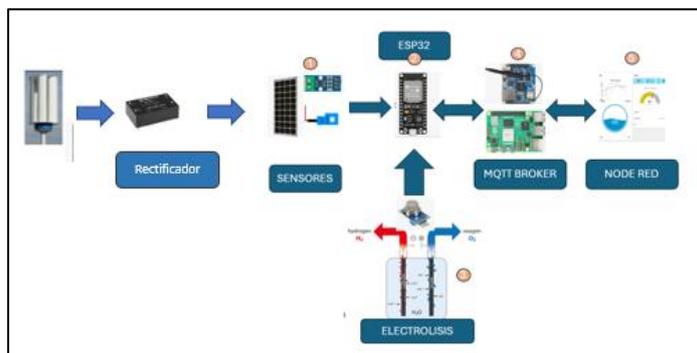


Figura 6.- Esquema del sistema IoT



La imagen 6 muestra el proceso de medición y producción de hidrógeno utilizando tecnologías IoT. El diagrama consta de los siguientes componentes:

**1.- Sensores:** Los sensores midieron los parámetros de voltaje y corriente de las fuentes renovables fotovoltaicas y eólicas.

**2.- ESP32:** Los datos de los sensores se enviaron a un microcontrolador ESP32.

**3.- Electrólisis:** El ESP32 tuvo la función de supervisar el proceso de electrólisis alcalina, en el que se llevó a cabo la separación del agua en oxígeno e hidrógeno.

**4.- MQTT:** Los datos del ESP32 se transmiten a un broker MQTT, un protocolo de mensajería para la comunicación entre dispositivos IoT.

**5.- Node-RED:** Los datos se recibieron y procesaron en Node-RED, una herramienta de programación visual implementada en la Raspberry Pi 3B. Aquí, se almacenan y visualizan los datos de manera local.

**6.- Medición del hidrógeno producido:** Incluye la indicación de la medición del hidrógeno producido, que se estima mediante los datos de voltaje y corriente recopilados.

El flujo sigue el orden desde la medición inicial con sensores hasta la visualización y almacenamiento de los datos en Node-RED, pasando por el procesamiento y transmisión de datos de los parámetros medidos.

A través del ESP32 y el MQTT Broker, y culmina con la producción y medición del hidrógeno.

### Sistema IoT

Se implementó un sistema basado en tecnología IoT destinado al seguimiento de la generación de hidrógeno verde, el cual integró sensores, microcontroladores y herramientas para la visualización de datos en tiempo real. Los parámetros a medir fueron el voltaje y la corriente de las fuentes renovables fotovoltaica y eólicas. En la selección de componentes, eligió el sensor ACS712 para



corriente y se implemento divisores de tensión para sensar el voltaje, asegurando que la señal llegará correctamente al ESP32. Seleccionó el microcontrolador ESP32 y el Raspberry Pi 3 se procedió a diseñar el flujo de datos desde los sensores hasta el almacenamiento en Node-RED.

Para el desarrollo del software, programó el ESP32 para la recolección y transmisión de datos. Además, configuró el Raspberry Pi 3 para recibir datos usando Node-RED.

### Prototipo de Electrólisis

Se identificó los componentes necesarios, como agua destilada , electrodos inoxidables y electrolitos (NaOH) como fuente de conducción más eficiente del agua, la misma que será almacenada en un recipiente tanque de PVC con el electrolito ya disuelto para compensar el agua del electrolizador, este trabajo se limita a medir el gas directamente.

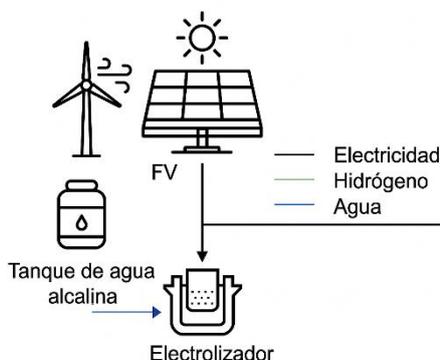


Figura 7.- Esquema general del electrolizador alcalino

### Implementacion

La implementación del prototipo consistió en desarrollar los elementos software para IoT para la producción de este vector energético mediante electrólisis alcalina. Se instalaron sensores ASC712 y divisores de tensión en paneles solares y turbinas eólicas, conectándolos a un ESP32 programado para recolectar y transmitir datos a través de un broker MQTT. Se ensambló el sistema de electrólisis con celdas electrolíticas de acero inoxidable 304, agua destilada y NaOH.



Los datos fueron procesados y mostrados en Node-RED, implementado en un Raspberry Pi3 B, donde se diseñaron flujos para la correcta visualización

Finalmente, el hidrógeno producido se midió directamente a la salida del electrolizador.

### **Almacenamiento de datos en Node-RED**

Se configuró los flujos de datos en Node-Red y se diseñó flujos para procesar y almacenar datos. Además se realizó pruebas para asegurar la correcta visualización y almacenamiento de los datos.

### **Simulación del prototipo de generación de hidrógeno**

Se realizó una simulación del prototipo de producción de hidrógeno mediante la construcción de un modelo digital del sistema de electrólisis alcalina en el software MATLAB. Esta herramienta permitió emular las condiciones reales del proceso, incluyendo las reacciones electroquímicas y la generación tanto de hidrógeno como de oxígeno. Los datos obtenidos a través de la simulación fueron útiles para analizar la eficiencia del sistema y confirmar la viabilidad del diseño planteado.

### **Análisis de datos**

Una vez registradas las mediciones de corriente y voltaje de los sistemas eólico y fotovoltaico, los datos fueron procesados y visualizados mediante el entorno de programación Node-RED. A partir de estas mediciones, se calculó la cantidad estimada de hidrógeno generado. Paralelamente, se determinó el volumen de hidrógeno gaseoso producido por el electrolizador, realizándose pruebas para verificar su medición. Estos resultados permitirán analizar el desempeño real de las fuentes renovables en la producción de hidrógeno verde y evaluar su eficiencia en condiciones operativas.

### **3.3 Materiales.**

Los materiales que se usaron en el proyecto están descritos en la tabla 4.



Tabla2.- Tabla de materiales, equipos y software

<b>Materiales de campo</b>	<b>Materiales de laboratorio</b>	<b>Equipos</b>	<b>Software</b>
-1 Esp32	-Fuente variable de DC	-Multímetro	Matlab
-1 Raspberry pi 3B		-Controlador de	kicad
-3 Sensores de corriente ACS712		carga eólica	Arduino IDE
		WT060	Nod Red
-Resistencias de 100k, 10k,4,5k, Ohmios		-Controlador de	
-Manguera de gas		carga eólica MPPT	
-Acero inoxidable 304		30A	
-Agua destilada			
-NaOH			
-Sensor de gas hidrógeno MQ8			
- Flotador resistente a la corrosión NC p25			
-Convertidor Buck 10A			

### 3.3.1 Descripción de materiales

Se describe las características de los materiales a usar.

#### - **Microcontrolador ESP32:**

En la figura 8 se observa el microcontrolador ESP32 que es un microcontrolador versátil equipado con dos núcleos que operan a una velocidad máxima de 240 MHz, además de contar con Wi-Fi y Bluetooth integrados, ideales para proyectos de IoT, es de 12 bits para procesar señales analógicas que fueron de suma importancia en el trabajo de grado presente, y es compatible con protocolos como MQTT el cual fue usado como protocolo de mensajería. y como característica física su tamaño es compacto.

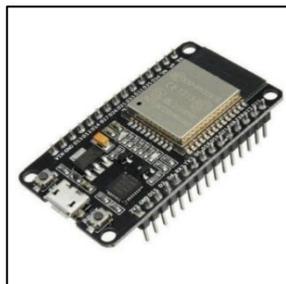


Figura 8.-Placa de desarrollo ESP32

### - Raspberry Pi 3 B

En la figura 9 se muestra la Raspberry Pi 3 B, una placa mejorada que incorpora un procesador Broadcom de cuatro núcleos a 1.4 GHz, acompañada de 1 GB de memoria RAM. Esta versión incluye conectividad inalámbrica de doble banda (2.4 y 5 GHz) y soporte para Bluetooth 4.2, además de un puerto Ethernet para redes cableadas. También cuenta con una interfaz GPIO de 40 pines, lo que facilita la conexión de sensores y periféricos. Su almacenamiento mediante tarjetas microSD la convierte en una solución flexible, adecuada para proyectos de IoT, aplicaciones industriales y entornos educativos.

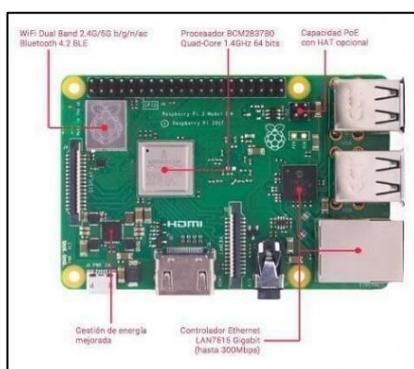


Figura 9.- Raspberry Pi 3 B

### - Sensor ACS 712

En la figura 8 se observa el sensor ACS712 que es un sensor diseñado para medir corriente en rangos de 5A, 20A o 30A, según la versión seleccionada. Utiliza un efecto Hall incorporado que genera una señal analógica proporcional a la corriente que detecta. Su



diseño asegura un aislamiento galvánico y una medición precisa, haciéndolo ideal para monitorear sistemas eléctricos. También es eficiente en consumo de energía y de fácil integración con microcontroladores.

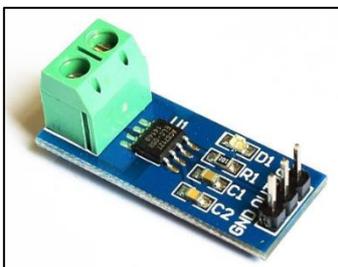


Figura 10.- Sensores ACS 712

#### - Resistencias

En la figura 9 se identifica una resistencia, un dispositivo electrónico diseñado para controlar la cantidad de corriente que circula en un circuito, limitándola según un valor específico medido en ohmios ( $\Omega$ ). Este tipo de componente es esencial para mantener la exactitud en las lecturas de corriente y voltaje, además de evitar que otros elementos del sistema sufran daños por exceso de energía.

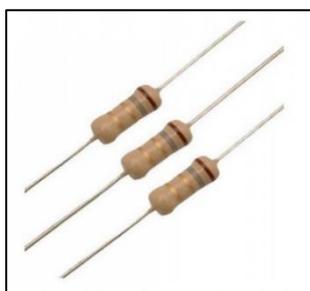


Figura 11.- Resistencias eléctricas de 1/2 W

#### - Acero inoxidable 304

En la figura 12 se presenta el acero inoxidable 304 y este se destaca por su alta resistencia a la corrosión, lo que lo hace ideal para aplicaciones en condiciones exigentes. Su



composición incluye 18-20% de cromo y 8-10.5% de níquel, lo que le proporciona durabilidad y resistencia a la oxidación. Además, ofrece buena resistencia a la tracción y al alargamiento, siendo fácil de soldar y mecanizar. Estas propiedades lo convierten en un material óptimo para aplicaciones industriales, como en celdas de electrólisis.



Figura 12.- Acero inoxidable 304

#### - **Agua destilada**

En la imagen 13 se muestra agua destilada, la cual se obtiene al purificar el agua mediante el proceso de destilación. Este procedimiento consiste en calentar el agua hasta que se convierte en vapor, eliminando así sustancias no deseadas como minerales, sales y otras impurezas. Posteriormente, el vapor se enfría y condensa, dando como resultado un líquido prácticamente libre de contaminantes, ideal para usos que requieren alta pureza.



Figura 13.- Agua destilada

**- Hidróxido de Sodio ( NaOH):**

El hidróxido de sodio (NaOH), o sosa cáustica, es un compuesto altamente alcalino y corrosivo que se presenta comúnmente en forma de escamas como fue la forma en la que se usó en la elaboración del electrolizador y se observa en la imagen12. Es muy soluble en agua, aumenta la conductividad del líquido. Tiene un pH extremadamente alto (alrededor de 13-14), lo que lo convierte en una de las bases más fuertes. Estas propiedades lo hacen útil en una amplia variedad de aplicaciones industriales.



Figura 14.- Hidróxido de Sodio ( NaOH)

**- Sensor de gas hidrógeno MQ8**

La figura 15 muestra el sensor MQ-8, un componente electrónico de tipo semiconductor diseñado para identificar la presencia de hidrógeno en el aire, con un rango de detección que va de 100 a 10,000 partes por millón (ppm). Funciona con una alimentación de 5 voltios en corriente continua y proporciona señales tanto analógicas como digitales, lo que facilita su compatibilidad con microcontroladores como el ESP32 o Arduino. Este sensor se caracteriza por su elevada sensibilidad al hidrógeno.



Figura 15.- Sensor de hidrogeno MQ8

- **Sensor de nivel de líquido flotador resistente a la corrosión NC P25**

El sensor de nivel tipo flotador mostrado en la imagen 15 es un dispositivo que actúa como interruptor, activado por el movimiento de un flotador que varía según el nivel del líquido. Cuando el flotador alcanza una altura específica, se acciona un interruptor magnético interno. Este sensor tiene un peso aproximado de 29 gramos y está fabricado con materiales resistentes a la corrosión, como plástico o acero inoxidable, lo que permite su utilización en entornos industriales exigentes.



Figura 16.- Sensor de nivel de líquido, flotador



### - Convertidor DC Buck

El módulo mostrado en la imagen 17 es un convertidor tipo Buck 300W 9A DC DC 280W, diseñado para disminuir un voltaje de entrada a un nivel inferior y estable en la salida que específicamente el voltaje de entrada 8V a 40V DC y  $V_o$  de 1,25V - 36V DC. Este tipo de convertidor es especialmente útil en sistemas de energías renovables, debido a que estas fuentes presentan voltajes fluctuantes dependiendo del potencial energético. En este caso, se utilizará para garantizar un suministro de voltaje estable al electrolizador. Su diseño incluye disipadores de calor, una bobina de inducción y capacitores, asegurando una conversión eficiente y reduciendo pérdidas energéticas en el proceso



Figura 17.- Convertidor DC - DC Buck

### 3.4 Matriz de operacionalización de variables.

A continuación, se detalla las variables a medir en las tesis esenciales para cumplir con los objetivos establecidos.

#### 3.4.1 Denominación de variables

La información obtenida a partir de la medición fueron los parámetros de voltaje y corriente de las fuentes renovables fotovoltaica y eólica esta es la información primaria para estimar cuanta será la producción de hidrógeno mediante un prototipo que usa la tecnología de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno.

Según [35] el tablero de control se ubica de la siguiente manera, entonces los sensores se conectaron a las salidas de los respectivos reguladores de carga hacia otro gabinete donde contiene el sistema IoT y electrolizador del presente trabajo de grado, pero según [36] se aumentó un regulador de carga eólica en el tablero.

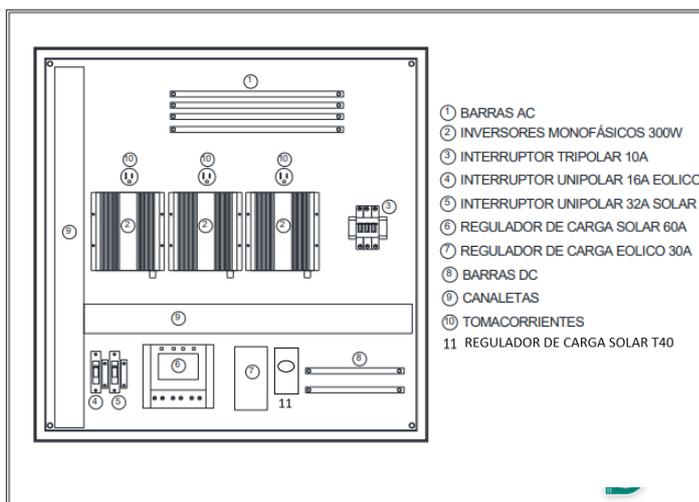


Figura 18.- Diagrama del tablero principal de control y posición de equipos  
Ubicación del gabinete de sistema IoT hacia los reguladores de carga del tablero de control de las fuentes renovables a conectar esta encuentra en la figura 14.

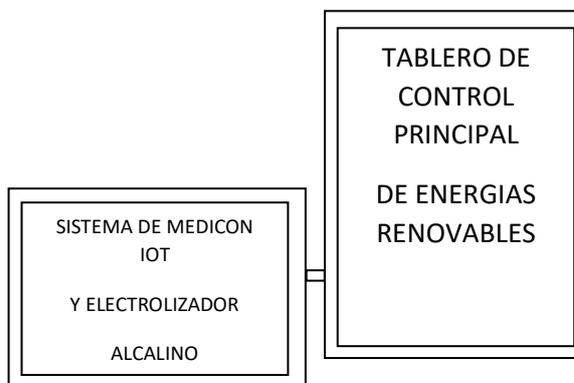


Figura 19.- Ubicación del tablero del sistema de medición y el electrolizador

### 3.4.2 Software

Las simulaciones realizadas en Matlab fueron fundamentales para comprobar la validez de los modelos teóricos aplicados en la producción de hidrógeno verde. Gracias a estas pruebas, se pudo verificar que las fórmulas utilizadas en el diseño del sistema fueran correctas. Además, el entorno de simulación permitió ajustar parámetros clave, como la corriente generada por los paneles solares y aerogeneradores, con el objetivo de identificar las condiciones óptimas que mejoren la eficiencia del sistema.



### 3.4.3 Detalle de ecuaciones matemáticas

#### Resolución del ESP32

Para calcular la resolución del ESP32 en milivoltios se procede a aplicar la siguiente ecuación en este caso porque se usó un microcontrolador ESP32, ecuación 1 :

$$\text{Resolucion en mV} = \frac{\text{Rango completo en mV}}{\text{Numero de total de pasos}} \quad (1)$$

**Donde:**

- Rango completo en mV = 3300 mV
- Numero de total de pasos = 12 bits

#### Divisor de voltaje

Tomando en cuenta que el voltaje de entrada es el voltaje máximo que puede ofrecer tanto las turbinas eólicas como el panel solar y el voltaje de salida debe ser como máximo 3.3V, para eso se utiliza la siguiente ecuación de un divisor de voltaje, ecuación 2 :

$$V_o = V_i \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (2)$$

**Donde:**

- $V_o$  = voltaje de salida
- $V_i$  = voltaje de entrada
- $R_1$  y  $R_2$  = Resistencias del divisor de voltaje

$V_o$  es el voltaje de salida seguro para el ESP32 y  $V_i$  el voltaje máximo que entrega el panel solar y las turbinas eólicas. Tanto en las turbinas eólicas como el panel solar es necesario realizar una medición del voltaje generado tomando en cuenta que en el panel a mayor intensidad solar mayor voltaje y en la turbina a mayor intensidad del viento mayor voltaje, esto se lo realiza por medio de un divisor de voltaje. Hay que recordar que las entradas de los ESP32 ADC tienen un conversor análogo digital de 12 bits. Y acepta en un voltaje de entrada de 3.3 voltios.

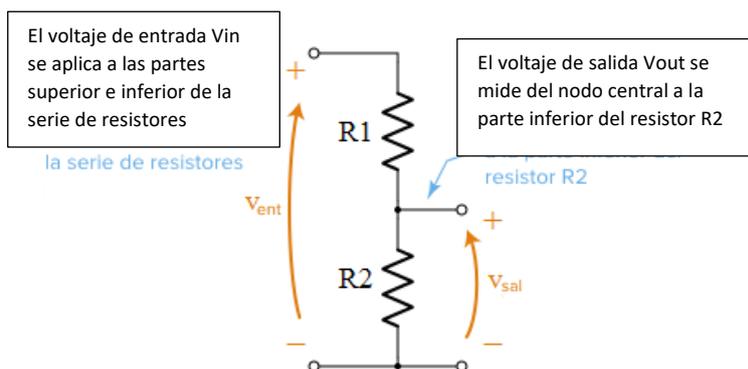


Figura 20.- Esquema de divisor de voltaje

### Protecciones

Debido a que las corrientes y voltaje a manejar son todas en corriente directa la protección tiene un factor de seguridad de 1.25 mayor a la corriente de cortocircuito, según la ecuación (3):

$$I_{max} = I_{sc} \times 1,25 \quad (3)$$

#### Donde:

- $I_{max}$  = Corriente máxima que soportar.
- $I_{sc}$  = Corriente de cortocircuito de cada panel solar.
- Factor de seguridad = 1.25

### Ley de Faraday:

La ley de Faraday relaciona la cantidad de hidrógeno producido con la corriente aplicada, según la ecuación 4 :

$$\text{Hidrógeno producido (moles)} = \frac{\text{Corriente (A)} \times \text{Tiempo (s)}}{2 \times F} \quad (4)$$

#### Donde:

- Corriente (A) = Es la corriente aplicada al electrolizador (en amperios).
- Tiempo (s) = Es el tiempo en segundos durante el cual se aplica la corriente.
- $F = 96485 \text{ C/mol}$ .

**Densidad de corriente:**

Determina el área de los electrodos que necesita para una corriente específica, que se representa a continuación en la ecuación 5:

$$\text{Área (cm}^2\text{)} = \frac{\text{Corriente (A)}}{\text{Densidad de corriente (A/cm}^2\text{)}} \quad (5)$$

**Donde:**

- Corriente (A): Corriente aplicada a los electrodos.
- Densidad de corriente (A/cm<sup>2</sup>): Amperios por centímetro cuadrado.

Para el presente proyecto se realizó un promedio de las corrientes obtenidas de las tres fuentes renovables para el dimensionamiento de los electrodos del electrolizado se tomaron los valores máximos de corriente de las tres fuentes renovables y se calculó un promedio de estas corrientes.

El valor resultante del promedio se utilizó como la corriente base para el cálculo de las dimensiones de los electrodos, a través de la fórmula de la densidad de corriente.

**Área de electrodos**

A continuación, se detalla la ecuación que determina el área de los electrodos del cátodo como del ánodo del electrolizador

$$\text{Área (cm}^2\text{)} = \frac{\text{Corriente promedio}}{\text{Densidad de corriente (}\frac{\text{A}}{\text{cm}^2}\text{)}} \quad (6)$$

**Donde:**

- Corriente promedio = corriente resultante de la suma y división de número de corrientes
- Densidad de corriente = cantidad de corriente eléctrica que fluye por unidad de área



### Número de electrodos

Teniendo en cuenta que la densidad de corriente es un valor conocido (en este caso, 0,2 A/cm<sup>2</sup>). Este cálculo asegura que los electrodos tengan el tamaño adecuado para manejar la corriente promedio sin comprometer la eficiencia del sistema. La ecuación (7) se usó para calcular el número de electrodos a usar.

$$\text{Número de electrodos} = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de un electrodo}} \quad (7)$$

### Donde:

- Área total = suma de áreas de todos los electrodos.
- Área de un electrodo = largo por ancho de un solo electrodo.

### Cantidad de solución de Electrolito (NAOH)

Es fundamental en la preparación de soluciones químicas calcular la concentración molar de una solución, la ecuación de la concentración establece que una solución es directamente proporcional a la cantidad de soluto (moles) y, a su vez, inversamente proporcional al volumen de la solución [50].

Por lo tanto, la masa de NaOH que debes disolver se calcula con la ecuación (8):

$$m = C \times V \times M \quad (8)$$

### Donde:

- C = Concentración deseada de NaOH (en moles por litro, mol/L).
- V = volumen de solución (en litros).
- M = masa molar de NaOH (aproximadamente 80 g/mol).



### Carga total

Es la cantidad de electricidad transportada por un cuerpo, y se mide en culombios (C).

La carga eléctrica se obtiene con la siguiente ecuación 9 :

$$Q = I \times t \text{ (9)}$$

#### Donde:

- I = corriente aplicada
- t = tiempo aplicado

### Moles de electrones transferidos

Los moles de electrones transferidos representan la cantidad de electrones que participan en una reacción redox. Se muestra en la ecuación 10:

$$n_e = \frac{Q}{F} \text{ (10)}$$

#### Donde:

- Q = Carga en el tiempo aplicado
- F = 96485C

### Ley de gases ideales

La ley de gases ideales describe el comportamiento de los gases en condiciones de temperatura y presión moderadas, se presenta en la ecuación 11

$$PV = nRT \text{ (11)}$$



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD

Donde:

- $P = 1$  at (presión estándar)
- $n =$  moles de hidrógeno
- $R = 0,0821$  constante de gases
- $T =$  temperatura estándar

### Erro relativo porcentual:

Esta fórmula se utiliza para calcular el error relativo porcentual es comúnmente usado para comparar un valor experimental o medido con un valor teórico.

$$Error (\%) = \frac{|valor\ medido - valor\ teorico|}{valor\ teorico} \times 100$$

Donde:

- Valor medido: valor observado experimentalmente
- Valor teórico: valor calculado mediante fórmulas ideales

### Medición de corriente generado en DC:

Para medir corriente en los paneles se utiliza el ASC712 este sensor tiene las siguientes características dependiendo al nivel de amperaje a medir y su sensibilidad:

Tabla3.- Tabla de clasificación de sensores ACS712 según su corriente

Modelo	Rango	Sensibilidad
ACS712ELCTR-05B-T	-5 a 5 A	185 mV/A
ACS712ELCTR-20A-T	-20 a 20 A	100 mV/A
ACS712ELCTR-30A-T	-30 a 30 A	66 mV/A

Sensores por usar



El ACS712 es un sensor de corriente con diferentes versiones según el rango:  $\pm 5$  A,  $\pm 20$  A y  $\pm 30$  A. A menor rango, mayor sensibilidad, lo que permite medir con más precisión corrientes pequeñas.

El tipo de conexión es la siguiente:

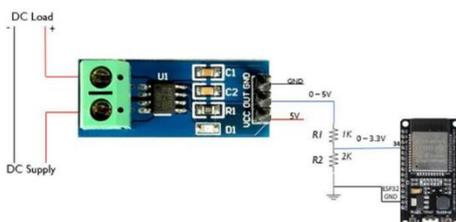


Figura 21.- Conexión del sensor ASC712 al ESP32

Con la información presente se puede sensar cuanta corriente consume el panel solar al momento de realizar la generación de hidrógeno.

Para el diseño de divisores de voltaje para sensores de corriente se tomó en consideración los parámetros técnicos de los componentes son:

- Paneles Solares: Máximo amperaje entregado **22,12 A**
- Turbina Eólica de Eje Vertical: Máximo amperaje entregado **7,2A**
- Turbina Eólica: Máximo amperaje entregado **6,12 A**

#### **Medición de voltaje generado en DC:**

Con la información recopilada de los datos registrados de valores de voltaje máximos de cada una de las fuentes renovables fotovoltaica y eólicas presentes en el edificio de la carrera de electricidad se dimensiono los divisores de voltaje óptimos para su correcta medición.

- Paneles Solares : Voltaje máximo entregado **36V**
- Turbina Eólica de Eje Vertical : Voltaje máximo entregado **27V**
- Turbina Eólica: Voltaje máximo entregado **16V**



### 3.5 partes del electrolizador

A continuación, se detalla las partes que conforman el electrolizador de manera técnica.

#### Principios de la electrolisis:

La electrólisis del agua es un proceso físico en el que, al aplicar corriente eléctrica, las moléculas de  $H_2O$  se separan en hidrógeno y oxígeno. Este procedimiento permite transformar energía eléctrica en energía química. Para llevarlo a cabo, se utiliza una solución acuosa con un electrolito en este caso, hidróxido de sodio (NaOH) que facilita el movimiento de iones entre los dos electrodos, haciendo posible la reacción de descomposición del agua

Es importante que la energía eléctrica que alimente el sistema sea de origen 100% renovable [40]. Para que el hidrogeno producido se considere verde.

El potencial eléctrico aplicado a los electrodos sumergidos en la solución debe ser mayor al 1.8V – 2,5V para que exista la destrucción de la molécula de Agua. [37]

- El  $H^+$  es un protón con carga positiva, presentes en soluciones ácidas que se involucran en la electrolisis alcalina.
- El  $H^-$  es un ion hidruro con carga negativa, que se encuentra en ciertos compuestos químicos.

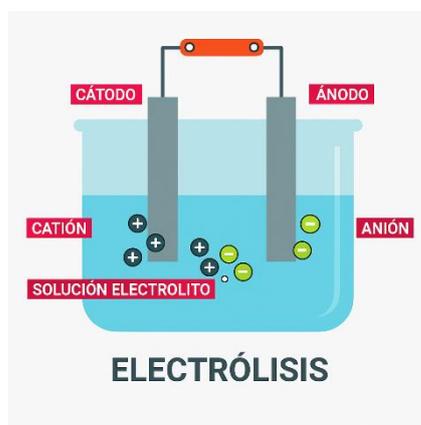
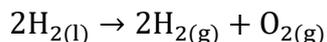


Figura 22.- Componente de la electrólisis Alcalina.

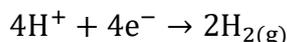


Se debe tomar en cuenta que la disposición de los electrodos en la imagen provoca que el hidrógeno no sea puro, así que cambiara esa disposición más adelante.

Según la reacción que describe la electrólisis del agua, la descomposición de dos moléculas de H<sub>2</sub>O da como resultado la formación de dos moléculas de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y una de oxígeno (O<sub>2</sub>) en estado molecular :

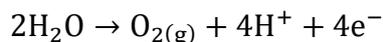


En los electrodos negativos es decir en el cátodo la reacción que se produce es la reducción en el cual los iones de hidrógeno del agua capturan a los electrones y se transforman en gas hidrógeno, por cada ion de hidrógeno necesita de un electrón para reducirse a hidrógeno atómico y dos para transformar una molécula de hidrógeno (H<sub>2</sub>):



Es decir, por cada dos electrones se produce una molécula de hidrógeno, en termino de moles cuatro moles de electrones producen dos moles de hidrógeno, un mol de hidrógeno requiere dos moles de electrones.

En los electrodos positivos es decir en el ánodo la reacción que se produce es la oxidación las moléculas de agua pierden electrones y se transforma en gas oxígeno.



La relación con la Ley Faraday indica que la constante de Faraday que un mol de electrones transporta 96485 Culombios de carga , entonces según la explicación previa se necesita dos moles de electrones para producir un mol de hidrógeno, por la tanto la ecuación de moles de hidrógeno producido es:

$$n_{\text{H}_2} = \frac{1}{2} \times n_e$$



## Principales materiales

### 3.6.1 Acero inoxidable 304

En este trabajo de grado el dispositivo se fabricó empleando electrodos de acero inoxidable 304, seleccionados debido a su resistencia a la corrosión en medios alcalinos. Los aceros inoxidables son compuestos metálicos formados principalmente por hierro (Fe), cromo (Cr) y níquel (Ni), cuya combinación confiere al material una notable resistencia a la corrosión, característica que los hace adecuados para diversas aplicaciones industriales.

Tabla4.- Tabla de propiedades de los aceros inoxidables.

Propiedades Generales de los Aceros Inoxidables				
Aceros	Resistencia Corrosión	Magnetismo	Dureza	Soldabilidad
Austeníticos	Excelente	No	Alta	Excelente
Ferríticos	Buena	Si	Media o Baja	Moderada
Martensíticos	Limitada	Si	Alta	Baja

Algunos elementos extra son agregados para modificar alguna propiedad particular como lo es el tipo de acero inoxidable 304 que forma parte de los tipos de acero Austeníticos, siendo este uno de los más comunes debido a su excelente resistencia a la corrosión siendo esta la característica que lo hace óptimo para usarlo en la electrolisis alcalina.



Figura 23.- Acero inoxidables 304



- **Sobrevoltaje de activación:** Se relaciona directamente con la dinámica presente durante la transferencia de carga en el proceso de electrólisis [39], produciendo una electrólisis abrupta.

- **Sobrevoltaje de concentración:** Este fenómeno hace alusión a la falta de condiciones de homogeneidad de la concentración del electrolito [39], afectando el comportamiento de gases presentes.

### 3.5.1 Configuración del electrolizador alcalino

A continuación, se demuestra la disposición interna del electrolizador.

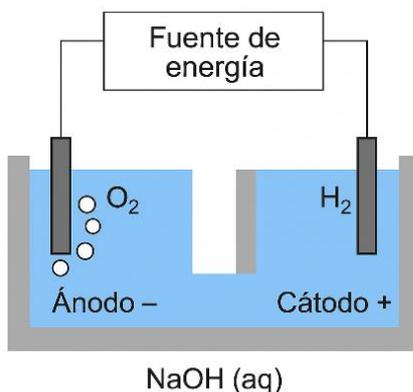


Figura 24.- Configuración tipo "U" de la estructura del electrolizador alcalino

Se eligió esta disposición del electrolizador ya que los electrodos permanecen separados evitando así una mezcla de gases entre ellos.

### Solución alcalina

Es una solución alcalina que mejora la conductividad del agua, es comúnmente usado el hidróxido de sodio con una concentración de entre el 5% al 30% [42].

La realización de estos cálculos es esencial, ya que el funcionamiento de un electrolizador está determinado por la dinámica electroquímica en los electrodos, la configuración estructural y geométrica de la celda, además del tipo de electrolito empleado en la solución.



Muy importante tener en cuenta que debido a que el electrolito es NaOH, su manejo requiere tener precauciones rigurosas ya que su naturaleza es ser corrosivo, lo que provoca una alta capacidad para destruir células y tejidos orgánicos como la piel, por esta razón se recomienda tener precaución, como el uso de guantes y en un ambiente ventilado.



Figura 25.- 40 gramo de hidróxido de sodio (NaOH)

### 3.5.2 Burbujeador

Un burbujeador es un dispositivo que se usa como una forma de protección que se coloca en la salida del hidrógeno generado en el electrolizador. Su función principal es filtrar, enfriar y evitar retrocesos peligrosos en el flujo de gas por posible exposición al fuego.

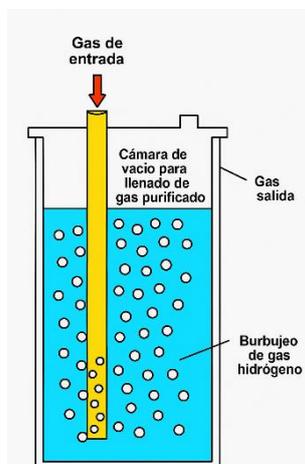


Figura 26.- Burbujeador del electrolizador alcalino



El burbujeador actúa como una barrera, al estar sumergido en agua. El hidrógeno es un gas altamente inflamable y, en un sistema de electrólisis, puede acumularse en la salida del electrolizador. Si hay una chispa en el sistema, el hidrógeno podría inflamarse y causar una explosión. Además, no solo es una medida de seguridad también filtra impurezas del hidrógeno; las impurezas del gas se disuelven en el agua del burbujeador o se quedan atrapadas en las burbujas generadas.

El gas de hidrógeno producido por el electrolizador puede arrastrar consigo pequeñas cantidades de oxígeno, esto debido a que el hidrógeno es más ligero que cualquier gas, y siendo el burbujeador como filtro y como protección.

## CAPITULO IV

### 4.1 Cálculos del dimensionamiento del sistema IoT.

Cálculos para el dimensionamiento del sistema IoT y del electrolizador alcalino.

Cálculo de la resolución del ESP32 mediante la ecuación 1.

$$\text{Resolucion en mV} = \frac{\text{Rango completo en mV}}{\text{Numero de total de pasos}} \quad (1)$$

Para un ESP32, con un ADC de 12 bits :

Rango completo en mV = 3300 mV

Número total de pasos =  $2^{12} = 4096$

$$\text{Resolución en mV} = \frac{3300 \text{ mV}}{4096} = 0.805 \text{ mV}$$

Esto significa que la señal analógica de entrada (0 - 3300 mV) se divide en 4096 pasos discretos, y cada paso equivale a 0.805 mV.

Ecuación de un divisor de voltaje:

$$V_o = V_i \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (2)$$



#### 4.1.2 Divisores de voltaje para sensores voltaje

Para realizar el dimensionamiento correcto de los sensores de voltaje se debe definir una de las resistencias de valor comercial para realizar el cálculo, es decir se ubica un  $R_2$  de un valor de mercado como  $1k\Omega$ ,  $10k\Omega$  o  $220k\Omega$  y se calcula el valor de  $R_1$ . Es necesario tomar en cuenta en el sistema a implementar los voltajes máximos a medir en las entradas analógicas por lo cual, para el sensado del voltaje de los generadores de fuentes renovables de energía se tiene los siguientes valores:

-Paneles Solares : Voltaje máximo entregado **36V**

-Turbina Eólica de Eje Vertical : Voltaje máximo entregado **27V**

-Turbina Eólica : Voltaje máximo entregado **16V**

Por lo cual el valor máximo de lectura sería 36 voltios, para cálculos prácticos se tendrá la siguiente ecuación:

$$V_{out} = V_{in} \times \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Cálculo de divisor de voltaje para el panel solar:  $V_{in} = 36V$

$$V_{out} = 36V \times \left( \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 10k\Omega} \right)$$

$$V_{out} = 3,27V$$

Cálculo de divisor de voltaje de la turbina eólica de eje vertical:  $V_{in} = 27V$

$$V_{out} = 27V \times \left( \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 10k\Omega} \right)$$

$$V_{out} = 2,45V$$

Cálculo de divisor de voltaje de la micro generación eólica:  $V_{in} = 16V$

$$V_{out} = 16V \times \left( \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 10k\Omega} \right)$$



$$V_{out} = 1,45V$$

Los resultados obtenidos con los valores de las resistencias comerciales disponibles demuestran que, en cada fuente de energía renovable, los voltajes de salidas máximos admisibles para el microcontrolador se encuentra en el rango aceptables de seguridad para el ADC del ESP32.

Por lo cual en la lectura de voltajes del ESP32, se tendrá el diagrama que se muestra en la Figura 27.

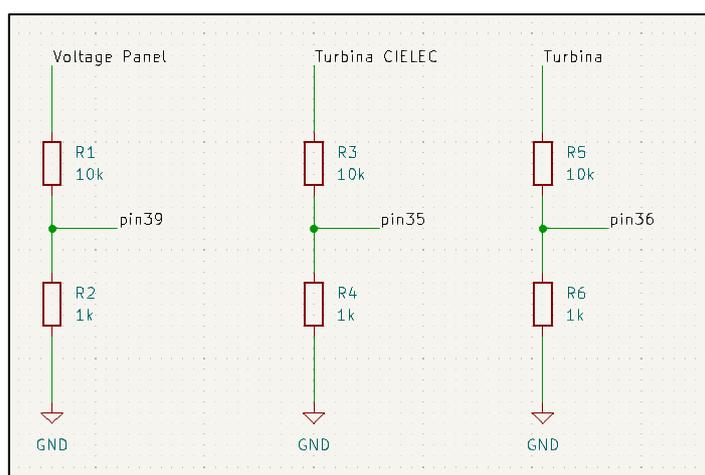


Figura 27.- Valores de los divisores de voltaje y pines del EP32

Como se observa en la figura 27 para la lectura de voltajes se usará los pines 35, 36 y 39 del Esp32 para los paneles solares, turbina eólica de eje vertical, y la micro generación eólica respectivamente.

#### 4.1.3 Divisores de voltaje para sensores de corriente

Hay que tomar en cuenta que los sensores de corriente entregan lecturas de hasta 5v en su salida, por esta razón es necesario tener divisores de voltaje por cada sensor de corriente, por lo cual para el sensor de 20A se tomara los valores R1 de 1kΩ y R2 de 2kΩ tomando como entrada 5V el Vout seria de 3,33V,y se conecta al pin33 del ESP32, este divisor se observa en la Figura 28.

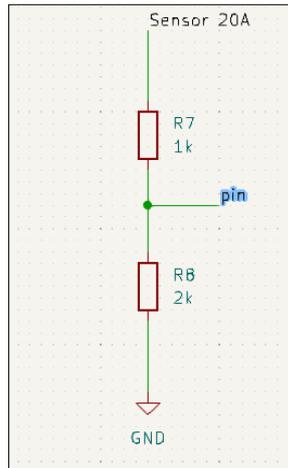


Figura 28.- Divisor de voltaje sensor de corriente de la turbina de eje vertical.

El siguiente sensor de corriente se usó para la medición de la turbina eólica y se utilizará el PIN 33 del ESP32.

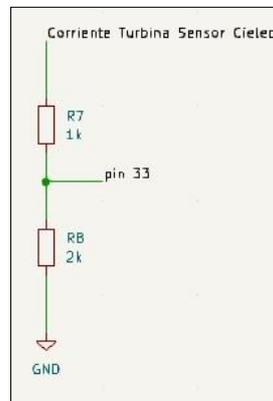


Figura 29.- Divisor de voltaje sensor de corriente de la turbina eólica.

Mientras que para la lectura de los Paneles se requiere un sensor de amperaje de 30A, pero al tratarse de mediciones más altas se requiere un divisor de voltaje con valores más altos de resistencia por lo cual para R1 es de 4,7K $\Omega$  y R2 de 6,8K $\Omega$  teniendo una entrada máxima del sensor en Vin de 5V el Vout sería 2,96V, esto se muestra en la Figura 30.

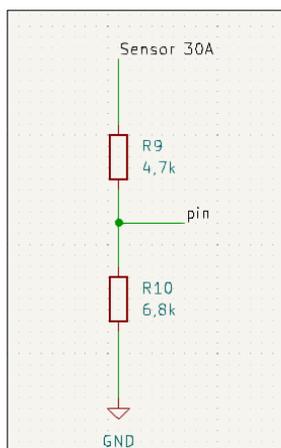


Figura 30.- Divisor de voltaje sensor de corriente de los paneles solares.

#### 4.1.4 Convertidor ADS1115

El convertido análogo - digital ADS1115 se integra en el sistema de monitoreo para mejorar la precisión en la lectura análoga del sensor de gas MQ-8 pues este conversor tiene mayor resolución que el ESP32, la resolución es de 16bits. A continuación, se presenta los pines que se usaron en la placa de monitoreo IoT.

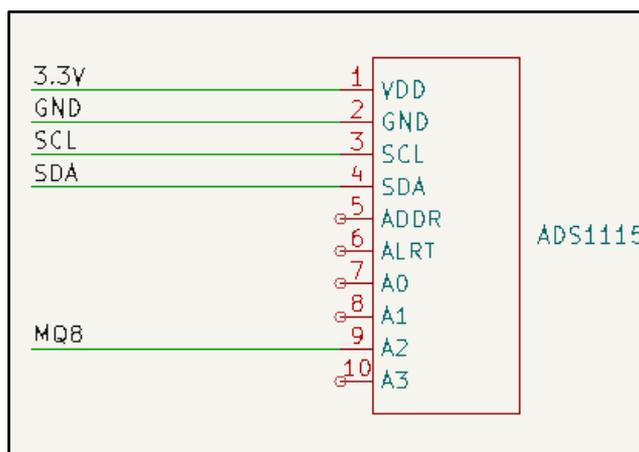


Figura 31.- Conexión del ADS y sus respectivos pines nombrados

#### 4.1.5 Configuración del relé.

El relé tiene como función el control del nivel del agua dentro del electrolizador, recibe la señal proveniente de un sensor tipo flotador que se encuentra instalado dentro del electrolizador, el flotador cierra el circuito cuando el nivel del agua del electrolizador



desciende por debajo del mínimo establecido, este nivel es el de las placas se acero inoxidable, enviando una señal en el pin de entrada del relé, como se indica en la figura32, el pin normalmente abierto se conecta a la bomba de recirculación, ubicada en el embalse que contiene la solución alcalina.



Figura 32.- Conexión de los pines del Relé

#### 4.1.6 Conexión del sensor MQ-8

EL sensor MQ8 está conectado a convertidor análogo - digital ADS115 para mejor resolución de las mediciones del gas hidrógeno, se utiliza un divisor resistivo de voltaje como se observan en la figura33 sirve para adaptar la señal de la salida del sensor a un voltaje compatible con el pin de entrada del ADS115, la alimentación del sensor es independiente de los demás elementos del sistema IoT con una fuente de 5v 3A y con GND común en todo el sistema para establecer una lectura segura. A continuación, se identifica los pines del que se usaron en esta sección.

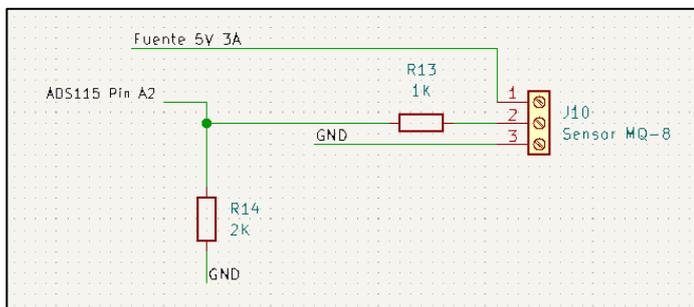


Figura 33.- Conexión del sensor MQ-8 al conversor ADS115 con su respectivo divisor de voltaje.

#### 4.1.7 Conexiones de ESP32

En la figura 34 se ilustra el diagrama de cableado del ESP32, donde se definen los pines digitales utilizados para captar las señales de los sensores de voltaje y corriente



conectados a diversas fuentes de energía renovable, como el panel fotovoltaico, la turbina eólica y el sistema de eje vertical.

Además, incluyen los pines del convertir análogo digital ADS115, A demás de la alimentación independiente para el microcontrolador.

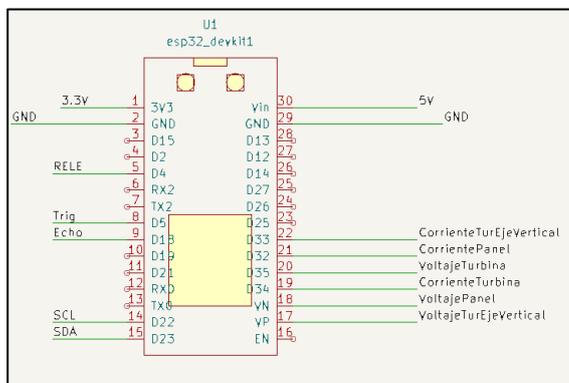


Figura 34.- Identificación de los pines del microcontrolador ESP32

#### 4.1.8 Placa de monitoreo IoT.

La figura 35 corresponde al diseño de la placa PCB del sistema IoT, desarrollada para integrar todos los sensores de voltaje y sensores de corriente con sus respectivos divisores de voltaje adecuados para el ESP32, el diseño está elaborado para optimizar el monitoreo de la generación de las fuentes renovables y producción de hidrógeno.

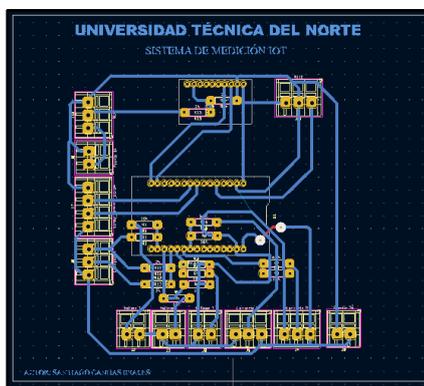


Figura 35.- Diseño de la placa baquelita de monitoreo IoT

A continuación, se presente la visión en 3D de la placa de monitoreo.

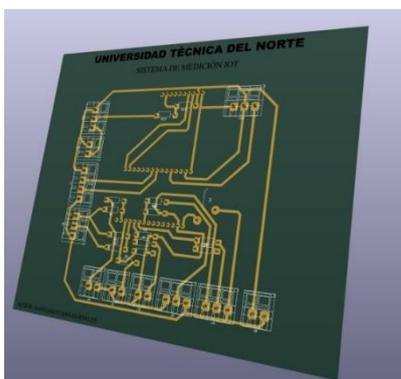


Figura 36.- Visión 3D de la Placa de monitoreo.

Se realizó las conexiones de acuerdo con los pines a usar en el ESP32 para los divisores de voltajes y sensores de corriente ACS712 como para los sensores de voltaje tomados desde la salida de los reguladores de carga de los paneles solares, En la figura 37 se presenta la placa en modo espejo con excepción del texto pues este no se verá afectado al momento del proceso, Para realizar la baquelita se usó el método del planchado.

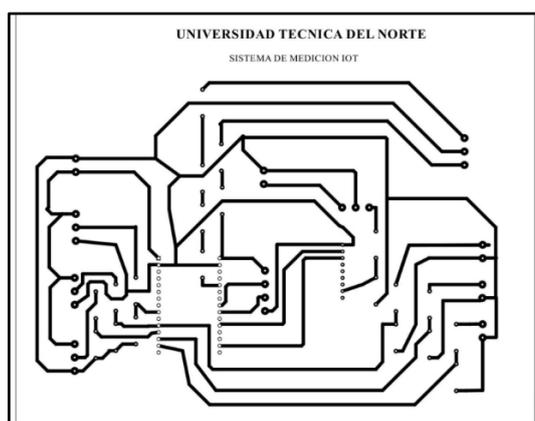


Figura 37.- Pista de placa de monitoreo en modo espejo para impresión

A continuación, se observa la máscara de componentes en modo espejo para la posterior impresión y mediante el método del planchado obtener PCB. Esta máscara, impresa sobre la cara superior de la PCB, cumple una función esencial para la correcta ubicación de cada componente electrónico, facilitando tanto el montaje como el mantenimiento del sistema.





Se selecciono el dispositivo en este caso Raspberry pi 3 B, luego al sistema operativo en este caso Raspbian y el almacenamiento la SD que tenemos insertada en la computadora.

Una vez seleccionado se presiona siguiente y se configura todo lo que se refiere a configuraciones por defecto del sistema Figura 15.

#### 4.1.10 Configuración del Raspberry Pi3B

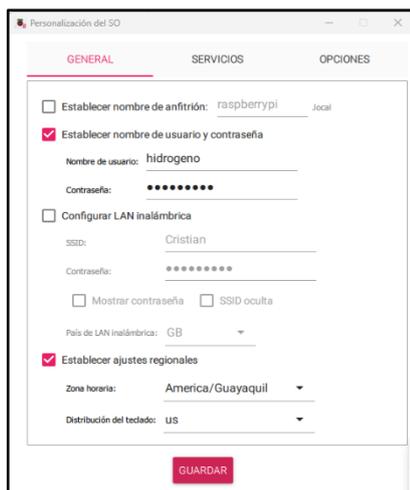


Figura 40.- Configuración básica de Raspberry Pi3B

En este caso el usuario fue hidrogeno y la contraseña hidrogeno, además se puede configurar la zona horaria en este caso Guayaquil y la red inalámbrica, luego también se configuro de manera manual, se selecciona guardar y empieza el proceso de grabado del sistema en la tarjetaSD Figura 16.



Figura 41.- Preparación del Raspberry Pi3B



**4.1.11 Preparación Raspberry**

Es necesario tener la tarjeta micro sd para la instalación de OS y se hará uso de un raspberry pi 3 B.



Figura42.-Tarjeta microSD 128GB



Figura43.- Combo completo de Raspberry pi3b+

En la figura 44 se observa la Raspberry Pi con la tarjeta SD ya insertada, la cual contiene el sistema operativo previamente instalado



Figura 44.- Raspberry con SD

Se procede a conectar los inhibidores de calor como se muestra en la Figura 45.



Figura 45.- Raspberry con inhibidores de calor



Una vez preparado el Raspberry pi3B se conecta la fuente de alimentación y el cable HDMI a un monitor para realizar la configuración inicial en donde se procederá a habilitar ciertas opciones, en la Figura17 se muestra el interfaz del sistema operativo instalado en Raspberry Pi3B.

#### 4.1.12 Instalación de Node Red

En el terminal se procede a ingresar el siguiente comando que instalara las dependencias requeridas para Node Red y también Node Red. En la Figura 46 se muestra la introducción del comando y su posterior instalación.

```

hidrogeno@raspberrypi: Node-RED update
Running Node-RED update for user hidrogeno at /home/hidrogeno on debian

This can take 20-30 minutes on the slower Pi versions - please wait.

Stop Node-RED
Remove old version of Node-RED
Remove old version of Node.js
Install Node.js 20 LTS
Clean npm cache
Install Node-RED core
Move global nodes to local
Npm rebuild existing nodes
Install extra Pi nodes
Add shortcut commands
Update systemd script

Any errors will be logged to /var/log/nodered-install.log
  
```

Figura 46.- Instalación de Node red en Raspberry pi3B

Una vez instalado Node red se procede a habilitar el servicio al arranque por medio del siguiente comando:

```
sudo systemctl enable nodered.service
```

Una vez instalado se procede a ingresar al navegador por medio de la dirección IP del servidor raspberry la cual se puede ver en la Figura18 usando el comando:



```

hidrogeno@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
hidrogeno@raspberrypi:~$ ip addr
1: lo: <LOOPBACK,UP,LOWER_UP> mtu 65536 qdisc noqueue state UNKNOWN group default
    link/loopback 00:00:00:00:00:00 brd 00:00:00:00:00:00
    inet 127.0.0.1/8 scope host lo
        valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 ::1/128 scope host noprefixroute
        valid_lft forever preferred_lft forever
2: eth0: <NO-CARRIER,BROADCAST,MULTICAST,UP> mtu 1500 qdisc pfifo_fast state DOWN group default qlen 1000
    link/ether b8:27:eb:34:dd:58 brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
3: wlan0: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc pfifo_fast state UP group default qlen 1000
    link/ether b8:27:eb:61:88:0d brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
    inet 192.168.0.110/24 brd 192.168.0.255 scope global dynamic noprefixroute wlan0
        valid_lft 6255sec preferred_lft 6255sec
    inet6 fe80::8feb:523b:2f04:4b50/64 scope link noprefixroute
        valid_lft forever preferred_lft forever
hidrogeno@raspberrypi:~$
    
```

Figura 47.- Ingreso del comando ip addr

Una vez realizado se ingresó en el navegador la ip y se puede acceder al interfaz de Node Red como se observa en la Figura 48. Para este caso 192.168.0.110:

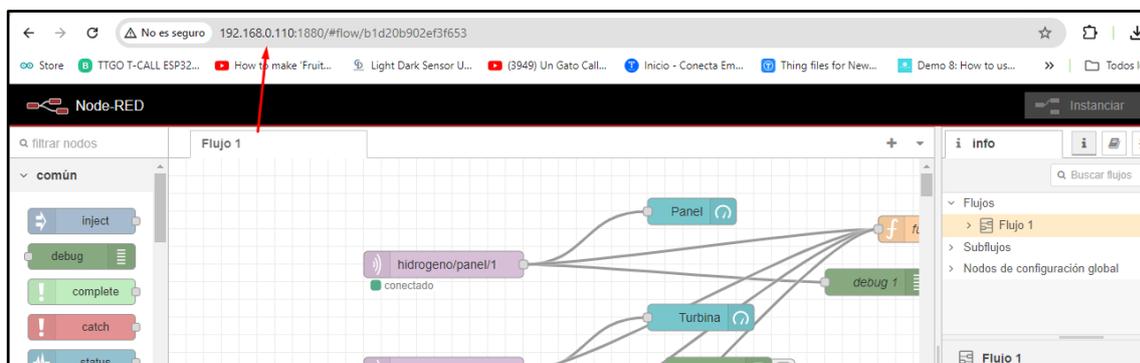


Figura 48.- Interfaz Node Red

#### 4.1.13 Instalación de broker MQTT

Es necesario instalar un bróker mqtt que para fines prácticos será mosquito esto se lo realiza por medio del siguiente proceso, primero ingresamos el siguiente comando en el terminal:

**sudo apt install mosquitto mosquitto-clients**

Como se muestra en la Figura 13 se ingresa el comando:



```

http://192.168.16.105:1880^Chidrogeno@raspberrypi:~ $ sudo apt install mosquitto
mosquitto-clients      sudo apt install mosquitto mosquitto-clients
Reading package lists... Done
Building dependency tree... Done
Reading state information... Done
The following package was automatically installed and is no longer required:
 rpi.gpio-common
Use 'sudo apt autoremove' to remove it.
The following additional packages will be installed:
 libdlt2 libmosquittol
The following NEW packages will be installed:
 libdlt2 libmosquittol mosquitto mosquitto-clients
0 upgraded, 4 newly installed, 0 to remove and 154 not upgraded.
Need to get 633 kB of archives.
After this operation, 1,883 kB of additional disk space will be used.
Do you want to continue? [Y/n]
    
```

Figura 49.- Instalación Mosquito bróker mqtt

**Programación en Node Red**

La imagen muestra la interfaz de programación visual **Node-RED**

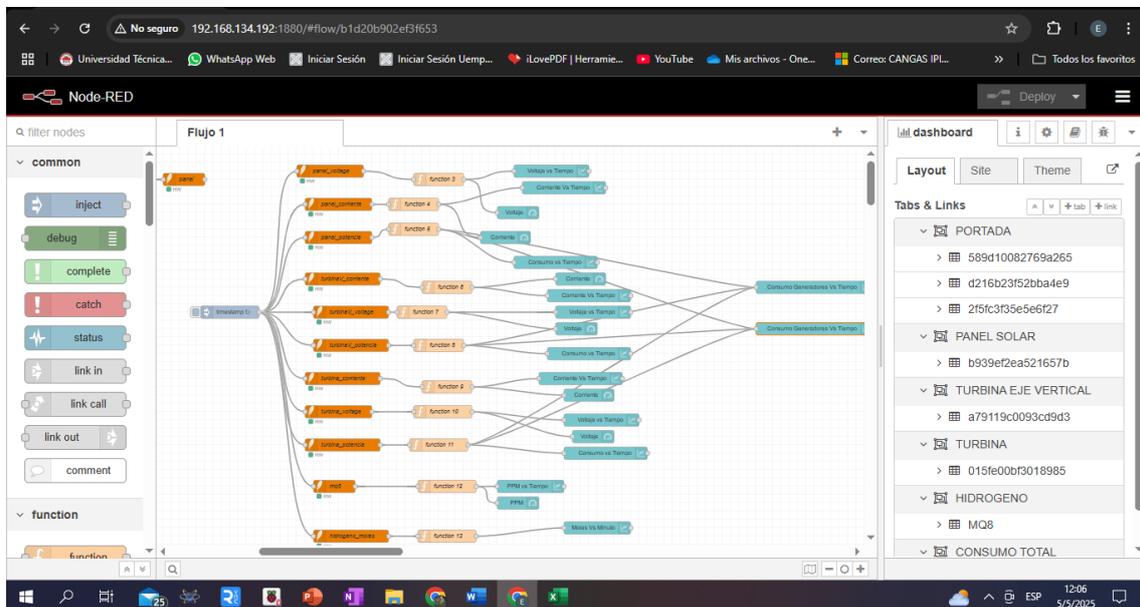


Figura 50.- Programación grafica de Node Red

En el flujo denominado Flujo 1, se observa la organización de nodos que procesan datos provenientes de sensores conectados a diferentes fuentes renovables: panel solar, turbina eólica y aerogenerador de eje vertical. Cada nodo está vinculado a funciones que permiten visualizar voltajes, corrientes, consumo energético y producción de hidrógeno en tiempo real a través del dashboard ubicado en la parte derecha de la pantalla.



#### 4.1.14 Interfaz Node Red

La Figura 52 se muestra la interfaz gráfica principal del desarrollado en Node-Red, a la izquierda se observa un menú de navegación vertical que permite acceder a distintas secciones del sistema organizadas de forma clara e intuitiva. En el área central se presenta la portada del proyecto con el título completo del trabajo de grado, Esta interfaz permite visualizar en tiempo real las variables medidas, gracias a su integración con sensores conectados a la Raspberry Pi y al sistema IoT.

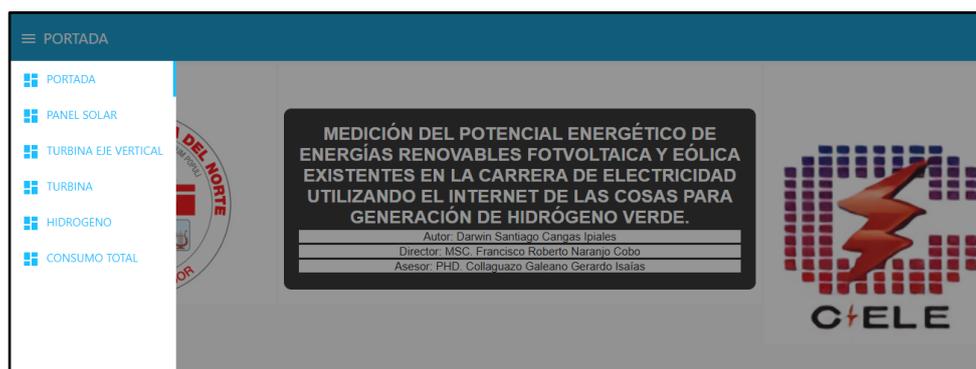


Figura 51.- Interfaz Node Red

#### Interfaz de producción de hidrógeno

La imagen 53 muestra la visualización en tiempo real de la generación de hidrógeno mediante un sistema IoT implementado en Node-RED. En el gráfico "Moles vs Minuto" se puede apreciar la fluctuación de la producción de hidrógeno en intervalos de un minuto, resultado del monitoreo continuo del sensor MQ-8. Durante las pruebas de funcionamiento realizadas, se identificaron variaciones en la concentración de hidrógeno, reflejadas en la gráfica, con un pico significativo hacia el final del intervalo, lo cual evidencia un aumento en la producción tras estabilizar el sistema de electrólisis. Estas pruebas permitieron verificar la efectividad del sistema de medición y control, así como la respuesta del electrolizador ante condiciones reales de operación.



Imagen54.- Interfaz de producción de hidrógeno

La fuente de generación renovable usada en esta prueba es la fotovoltaica, el hidrógeno producido esta esta expresado en moles debido a que en esta unidad se permite cuantificar con más precisión la cantidad molecular del hidrógeno producido.

**4.1.15 Dimensionamiento del calibre de los conductores eléctricos**

Para garantizar la seguridad del sistema en el módulo, se realizó el dimensionamiento del calibre de los cables eléctricos que transportan la corriente generada por las fuentes renovables, así como los cables empleados en el sistema de control y sensado. Se utilizó como referencia la tabla de capacidad de corriente.

Tabla5.- Tabla de amperaje soportado según su calibre(fuente: MasVoltaje)

Amperaje que soportan los cables de cobre					
Nivel de temperatura:	60°C	75°C	90°C	60°C	
Tipo de aislante:	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2	SPT	
Medida / calibre del cable	Amperaje soportado			Medida / calibre del cable	Amperaje soportado
14 AWG	15 A	15 A	15 A	20 AWG	2 A
12 AWG	20 A	20 A	20 A	18 AWG	10 A
10 AWG	30 A	30 A	30 A	16 AWG	13 A
8 AWG	40 A	50 A	55 A	14 AWG	18 A
6 AWG	55 A	65 A	75 A	12 AWG	25 A
4 AWG	70 A	85 A	95 A		
3 AWG	85 A	100 A	115 A		
2 AWG	95 A	115 A	130 A		
1 AWG	110 A	130 A	145 A		
1/0 AWG	125 A	150 A	170 A		
2/0 AWG	145 A	175 A	195 A		
3/0 AWG	165 A	200 A	225 A		
4/0 AWG	195 A	230 A	260 A		



### **Dimensionamiento de cables según las fuentes renovables.**

Para el correcto dimensionamiento se toma en cuenta las corrientes máximas de cada una de las fuentes renovables respectivamente.

-Paneles solares: Corriente máxima entregada: 22,12 A

El calibre adecuado es calibre 10 AWG, el cual soporta hasta 30 A a 75 °C, brindando un margen de seguridad incluso en cambios de temperatura.

-Turbina eólica de eje vertical: Corriente máxima entregada: 7,2 A

El calibre adecuado es 14 AWG, que soporta 20 A a 75 °C, ya que la corriente disminuye considerablemente con respecto a las de los paneles solares.

-Turbina eólica: Corriente máxima entregada: 6,12 A

También se recomienda 14 AWG por su capacidad de hasta 20 A a 75 °C.

### **Dimensionamiento de cables para señales**

Para conexiones que no transportan corrientes excesivas, como señales de los sensores ACS712, divisores de voltaje, señales digitales del relé y conexiones al microcontrolador, corrientes menores a 1 A. Se utilizó el calibre 20 AWG, que soportan entre 2 y 6 A, lo cual es suficiente para señales de control o lectura analógica y digital.

#### **4.1.16 Cálculo de protecciones**

Para la protección de la salida del regulador de carga a la entrada del módulo de sistema IoT, se sabe que para el regulador solar se necesita una protección de tipo fusible en CC comercial mayor o igual 22,52A según los cálculos, usando a las ecuaciones 3:

$$I_{max} = 18,02 \times 1,25$$

$$I_{max} = 22,52 A$$

Para el regulador de carga del regulador eólico de eje vertical:

$$I_{max} = 7,2 \times 1,25$$



$$I_{max} = 9A$$

Para el regulador de carga eólica :

$$I_{max} = 6,12 \times 1,25$$

$$I_{max} = 7,65A$$

Las protecciones se ubicaron en la entrada de la caja del sistema IoT de esta manera proteger los equipos que están dentro del mismo.

#### 4.2 Cálculos del dimensionamiento del electrolizador alcalino

El dimensionamiento se basó en el promedio de las corrientes máximas registradas, este promedio es útil, aunque la corriente de cada fuente pueda variar a lo largo del tiempo, el dimensionamiento se realiza considerando un valor alto para no causar daño a los reguladores de carga de diferente potencia.

- Paneles Solares: Máximo amperaje entregado **22,12 A**
- Turbina eólica de eje vertical: Máximo amperaje entregado **7,2A**
- Turbina de micro generación eólica: Máximo amperaje entregado **6,12A**

$$Corriente\ promedio = \frac{22,12 + 7,2 + 6,12}{3} = 11,81 A$$

##### 4.2.1 Área de Electrodo

Área individual de cada electrodo es:

$$\text{Área de un electrodo (cm}^2\text{)} = 5 \text{ (cm)} \times 8 \text{ (cm)} = 40 \text{ cm}^2$$

Con cuatro electrodos en el ánodo y cuatro el cátodo, el área disponible es:

$$\text{Área (cm}^2\text{)} = 4 \times 40 = 160 \text{ cm}^2$$



Entonces al tener el área por el ánodo y el cátodo de manera separada es de  $160 \text{ cm}^2$ , siendo un área total de  $160 \times 2 = 320 \text{ cm}^2$ , se procede a calcular el número de electrodos totales a usar, según la ecuación (7):

$$\text{Numero de electrodos} = \frac{320}{40} = 8 \text{ electrodos}$$

A continuación, se muestra los 8 electrodos a usar:



Figura55.- Ocho electrodos de acero inoxidable 304

#### 4.2.2. Fórmula de densidad de corriente

La densidad de corriente es la cantidad de corriente que fluye a través de un área específica en un material conductor, que se representa a continuación en la ecuación (5)

$$J = \frac{\text{Corriente (A)}}{\text{Area total disponible (cm}^2\text{)}}$$

Se realizó los cálculos con 2, 3 y 4 electrodos de las áreas especificadas previamente,

Con dos electrodos:



$$J = \frac{11,81 \text{ (A)}}{80(\text{cm}^2)} = 0,1476 \text{ A/cm}^2$$

Con tres electrodos:

$$J = \frac{11,81 \text{ (A)}}{120 \text{ (cm}^2)} = 0,0984 \text{ A/cm}^2$$

Con cuatros electrodos:

$$J = \frac{11,81 \text{ (A)}}{160 \text{ (cm}^2)} = 0,0738 \text{ A/cm}^2$$

Se llega a la conclusión que con una mayor área es decir con el uso de cuatro de electrodos se obtiene una mejor densidad de corriente, siendo factible ya que una menor densidad las reacciones son menos controladas y la producción de hidrógeno es intermitente con un menor consumo energético, así, equilibrando el sistema y no sobredimensionando el electrolizador, aumentando la vida útil del electrolizador.

$$J = 0,0738 \text{ A/cm}^2$$

Aplicando la ecuación (6), para la comprobación de área de electrodos a usar es la correcta respecto a la densidad de corriente aplicada.

$$\text{Área (cm}^2) = \frac{11,81 \text{ (A)}}{0,0738 \text{ A/cm}^2} = 160\text{cm}^2$$

Cubriendo el área calculada con cuatro electrodos en el ánodo y cuatro en el cátodo.

#### 4.2.3 Cálculo de la cantidad de electrolito a disolver

En este estudio se usó 2 litros de agua destilada entonces la cantidad del electrolito es:

- La fórmula para calcular la cantidad de NaOH a disolver, según la ecuación (8):



$$m = 1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 2\text{L} \times 40 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 80 \text{ g.}$$

Como resultado se obtiene que la cantidad optima disolver de electrolito en 2 litros de agua destilada es de 80gramos de NaOH. Esta solución permite una alta conductividad iónica, favoreciendo el flujo eficiente de corriente eléctrica entre los electrodos. Además, al ser una base fuerte, mejora la cinética de la reacción de electrólisis del agua, permitiendo una producción más efectiva de hidrógeno y oxígeno sin corroer significativamente los materiales del sistema.

#### 4.2.4 Ley de Faraday

La ley de Faraday relaciona la cantidad de hidrógeno producido con la corriente aplicada. Según la ecuación (4)

$$n = \frac{I \times T}{z \times F}$$

donde:

**n:** Cantidad de hidrógeno producido en moles

**I:** Corriente aplicada

**T:** tiempo de operación

**Z:** número de electrones en la reacción (hidrogeno  $z = 2$ )

**F:** Constante Faraday  $96485 \text{ C/mol}$

A continuación, se presentan los calculo según la ecuación (4) de la producción de hidrógeno.

$$\text{Hidrógeno producido (moles)} = \frac{\text{Corriente (A)} \times \text{Tiempo (s)}}{2 \times F} \quad (4)$$

Producción de hidrógeno en moles de acuerdo con las mediciones máximas en una hora por cada fuente renovables respectivamente.



Paneles Solares:

$$\text{Hidrógeno producido (moles)} = \frac{18,02A \times 3600s}{2 \times 96485 C/mol}$$

$$\text{Hidrógeno producido (moles)} = 0,335mol$$

Turbina Eólica de Eje Vertical:

$$\text{Hidrógeno producido (moles)} = \frac{7,2A \times 3600s}{2 \times 96485 C/mol}$$

$$\text{Hidrógeno producido (moles)} = 0,134mol$$

Turbina Eólica:

$$\text{Hidrógeno producido (moles)} = \frac{6,12A \times 3600s}{2 \times 96485 C/mol}$$

$$\text{Hidrógeno producido (moles)} = 0,114 mol$$

Tomando en cuenta que los valores de corriente son en circuito abierto y fueron tomados de los trabajos de grado respectivamente. A demás, las condiciones actuales de las turbinas eólicas impiden su normal generación.

#### 4.2.5 Elaboración del modulo

Se diseño un módulo físico que permitiera integrar todos los componentes eléctricos. Para iniciar la construcción del sistema de monitoreo y generación de hidrógeno verde, Se optó por una estructura metálica de dimensiones 50×45×25 cm, lo suficientemente amplia para albergar los sensores, el electrolizador, la Raspberry Pi3B, el sistema de ventilación y demás dispositivos, garantizando al mismo tiempo una ventilación adecuada y acceso fácil para La elaboración del gabinete metálico cual se



ubicó cerca del módulo principal de fuentes renovables y se organizó cada uno de los elementos del sistema.

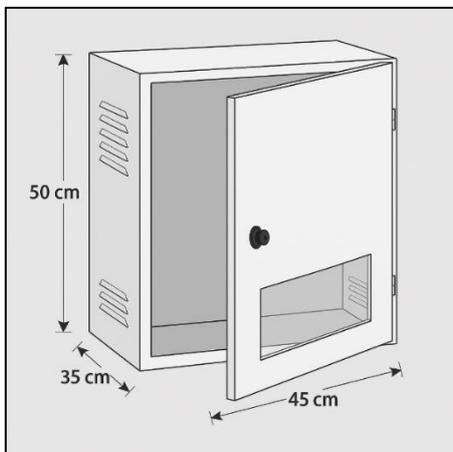


Figura 56.- Diseño del módulo metálico con dimensiones

#### 4.2.6 Medición visual de la generación de hidrógeno

A continuación, se presenta la forma en la que se observa el volumen de producción de hidrógeno, mediante una probeta invertida.

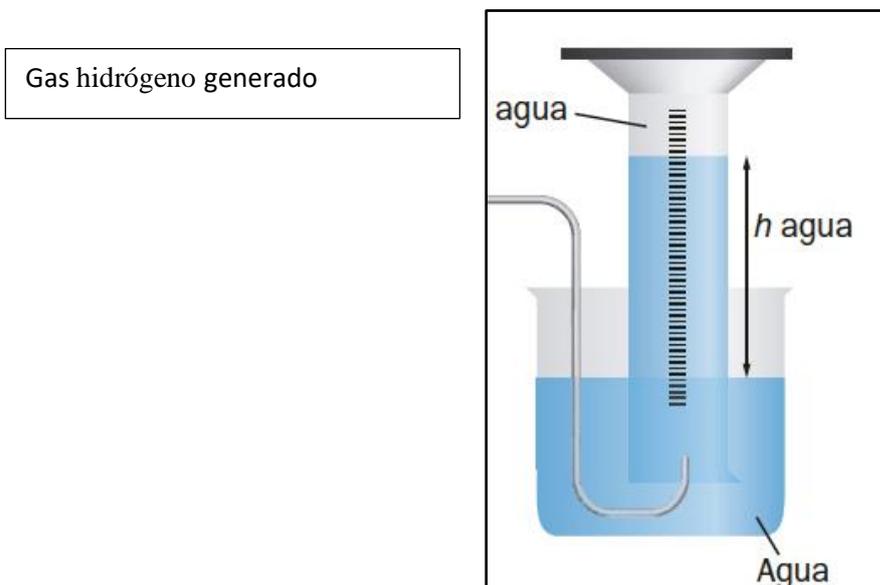


Figura 57.- Medición visual del hidrógeno verde

**Configuración inicial:**

- Se lleno una probeta graduada con agua y colocada inversamente abajo en un recipiente también lleno de agua.
- Se ubico el tubo de salida del hidrógeno generado en el electrolizador alcalino a la parte superior de la probeta (invertida). Asegurándose de que esté bien sellado para evitar fugas.

**Medición del gas:**

- A medida que el hidrógeno se genera, el agua de la probeta se desplaza hacia abajo llenándola con el gas hidrógeno en la parte superior.
- La cantidad de agua desplazada equivale al volumen de hidrógeno producido.
- Teóricamente, por cada 2 moles de  $H_2$  se genera 1 mol de  $O_2$ , entonces el volumen dentro del electrolizador el gas en el ánodo debe ser la mitad que en el cátodo ya que las cámaras de vacío son iguales.



Figura 58.- Probeta para medición visual de generación de hidrógeno verde



#### 4.2.7 Embalse de solución alcalina

Para una mejor autonomía del electrolizador se implementó un embalse con agua destilada y electrolito disuelto obteniendo una solución alcalina la cual mediante una mini bomba de agua ubicado en el embalse impresión 3D y un sensor de nivel de agua que se ubica dentro del cátodo del electrolizador permitirá que cuando el agua disminuya en electrolizador la bomba se active ya que el flotador envía una señal a un relé y este activara la bomba de agua ubicada en el embalse de solución alcalina.

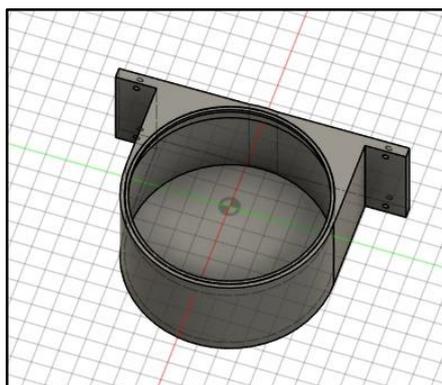


Figura 59.- Soporte de Embalse para Electrólisis Alcalina – 3D

El soporte permite fijarlo en la superficie vertical del modulo



Figura 60.- Embalse de solución alcalina



**4.2.8 Calibración del sensor MQ8 para la medición de hidrógeno.**

Se debe obtener la resistencia inicial y para esto es necesario tomar en cuenta los datos del MQ8

- El valor de la resistencia R0 se determina observando la parte posterior del sensor y localizando el número impreso en la resistencia central. En este ejemplo, se identifica la codificación "102" en formato SMD, la cual corresponde a una resistencia de 1 kΩ
- Resistencia al aire se observa en la tabla del Datasheet del sensor y se indica una curva que la cual representa el valor por defecto en un entorno libre de gas.

La fórmula para obtener la resistencia inicial de un sensor al aire es la siguiente:

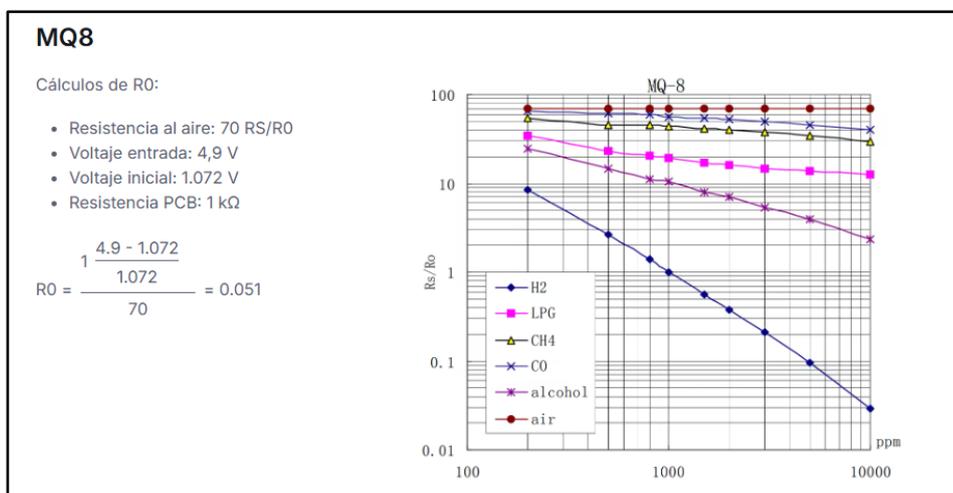


Figura 61.- Curva de detección de Hidrógeno del sensor MQ-8

Los valores del sensor MQ-8 frente al hidrógeno se obtienen calculando la curva de la gráfica presentada en la línea que indica la posición del hidrógeno, estos valores se encuentran en Datasheet del sensor y son los siguientes:

Tabla6.- Tabla de valores de la curva de detección de hidrógeno del sensor MQ-8

Elemento	Eje X	Eje Y	Curva
<b>Hidrógeno</b>	2,301030	0,932474	-1,453867



**Diagrama de Conexión Pictórico.**

Diagrama del sistema de monitoreo, gestión y adquisición de datos aplicado a la producción de hidrógeno verde mediante el proceso de electrólisis alcalina

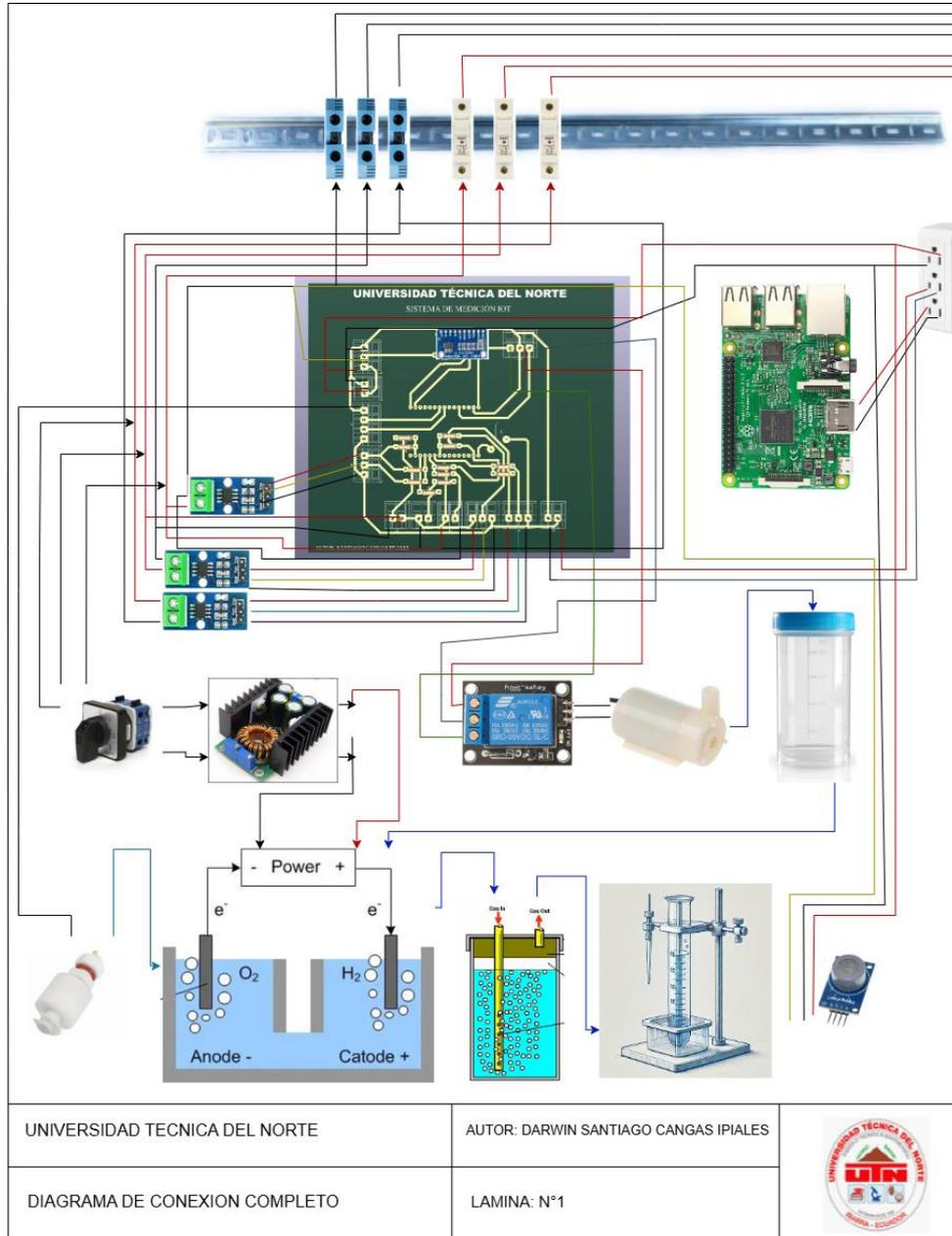


Figura 62.- Diagrama de conexión pictórico completo.



**4.3 Flujograma de la programación**

A continuación, se presenta un flujograma de la programación usada para la medición de los parámetros.

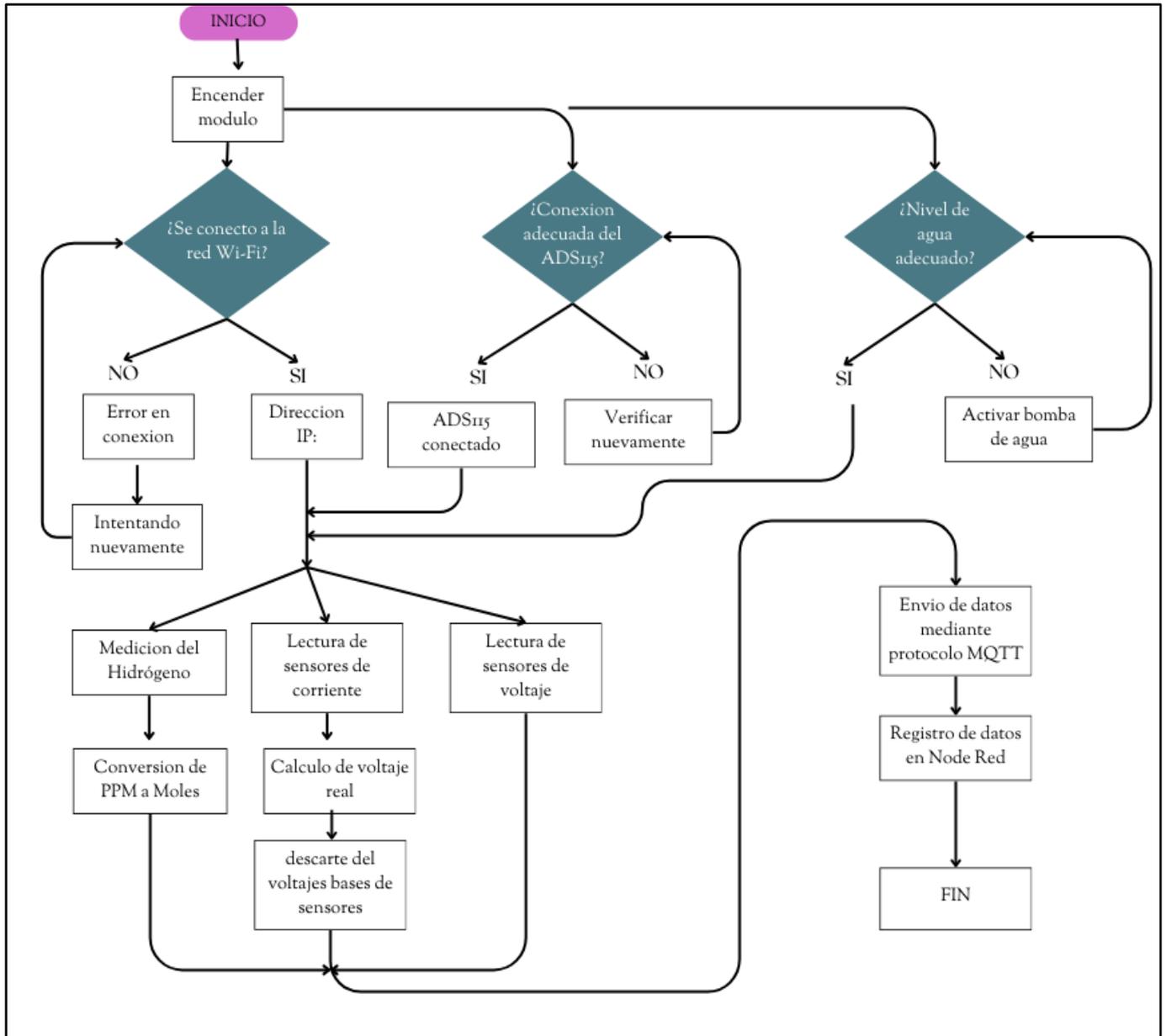


Figura63.- Flujograma de programación



**4.4 Resultados**

Se presentan a continuación los resultados correspondientes a las mediciones de corriente y voltaje, las simulaciones efectuadas en Matlab-Simulink, y el monitoreo físico del sistema, incluyendo tanto las fuentes de energía renovable como el proceso de electrólisis utilizado para la producción de hidrógeno verde.

**4.4.1 Simulación de la Producción de Hidrógeno en Matlab**

Se realizaron simulaciones para estimar la producción de hidrógeno utilizando la ley de Faraday. A partir de la corriente suministrada por una fuente renovable, en este caso con los paneles solares que al conectarse al electrolizador existe un medición de corriente de 4,46 A.

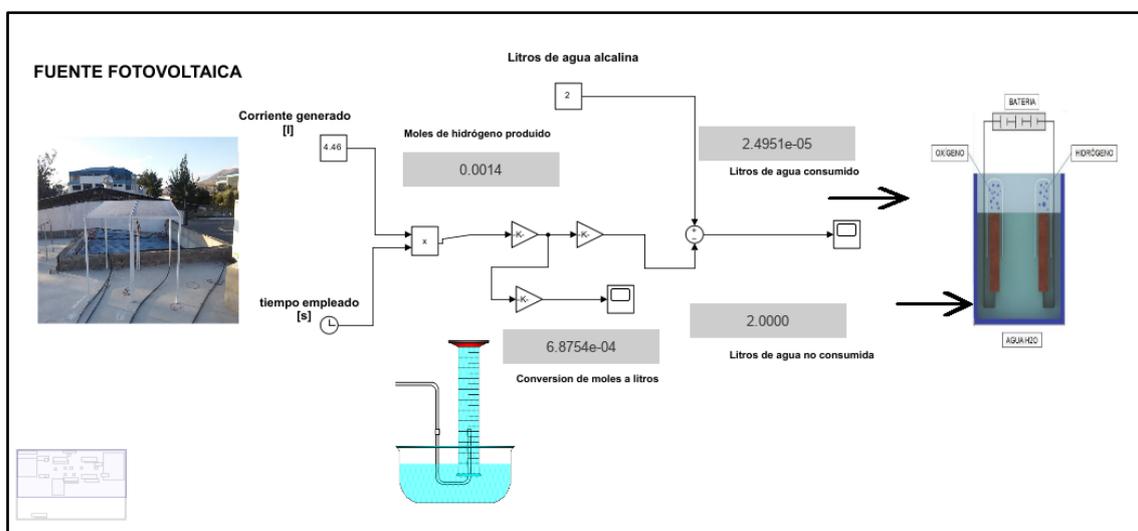


Figura 64.- Simulación de producción de hidrógeno con paneles solares

Se empleó una corriente de 4,45 amperios durante un intervalo de tiempo definido para generar hidrógeno. Como resultado del proceso, se obtuvo un valor de 0,0014 moles de hidrógeno, además se simuló el consumo de agua alcalina, registrando un total de  $2,495 \times 10^{-5}$  litros consumidos del volumen inicial de 2 litros, lo cual evidencia la eficiencia y bajo consumo hídrico del sistema, estos resultados permiten comprender el rendimiento del sistema fotovoltaico en condiciones reales.



#### 4.4.1.1 Cálculo de carga eléctrica

Con la corriente proporcionada de cada una de las fuentes renovables fotovoltaica y eólicas, se calcula la cantidad de moles de hidrógeno producido usando la carga suministrada.

La Carga suministrada se obtiene mediante la ecuación (9), conociendo la corriente que produce la fuente renovable es de 4,46A y un tiempo de un minuto, se debe tener en cuenta que el tiempo se debe expresar en segundos.

$$Q = 4,46A \times 60s = 267,6C.$$

#### 4.4.1.2 Cálculo de moles de electrones transferidos

Cálculo de los moles de electrones transferidos, mediante la ecuación (10)

$$n_e = \frac{Q}{F}$$

$$n_e = \frac{267,6}{96485} = 0,0002774 \text{ Moles de electrones.}$$

#### 4.4.1.3 Cálculo de moles de hidrógeno

Los moles de hidrógeno representan la cantidad de partículas (moléculas H<sub>2</sub>) en una muestra:

$$n_{H_2} = \frac{1}{2} \times 0,0002774 = 0,00139 \text{ moles de } H_2$$

El cálculo de los 0.00139 moles de H<sub>2</sub> fue verificado y coincide con los valores esperados.

#### 4.4.1.4 Cálculo de conversión de gas hidrógeno a volumen

El cálculo de conversión a volumen del gas producido es importante para la verificación visual mediante la probeta que se encuentra físicamente en el módulo, para este fin se aplica la ley de gases ideales, que se presenta en la ecuación (11).

$$PV = nRT$$

Donde se despeja la variable volumen:

$$V = \frac{nRT}{P}$$

Reemplazando los valores previamente calculados :



$$V = \frac{0,00139 \times 0,0821 \times 298}{1} = 33,93 \text{ ml}$$

Al convertirlo a volumen usando la ecuación de gases ideales, se obtiene 33.93 mL de hidrógeno gaseoso producido.

Donde el resultado de la simulación proporciona un valor de 0,0014 moles de hidrógeno y la producción medida físicamente con el electrolizador muestra 0,00139 moles de hidrógeno, con una diferencia de 0,00001 moles de diferencia, verificando así los resultados analíticamente, mediante simulaciones y en la salida del electrolizador alcalino.

#### 4.4.1.5 Cálculo de cantidad de agua consumida:

Un mol de agua equivale a 18 gramos y un gramo de agua es un mL, por lo tanto, 18 gramos de agua = 18 mL = 0.018 L.

A continuación, se realiza los cálculos para obtener la cantidad de agua consumida

Considerando los datos iniciales:

- Cantidad de agua del electrolizador:  $V_{h_2o(inicial)} = 2L$
- Moles de hidrógeno producidos:  $n_{H_2} = 0,0139 \text{ moles}$
- Factor de conversión: 0,018L de agua

La cantidad de moles de agua consumidos es igual a los moles de hidrógeno producidos:

$$n_{H_2O} = n_{H_2} = 0,3360 \text{ moles}$$

#### Conversión de moles a litros de agua:

$$V_{H_2O(consumido)} = n_{H_2} \times 0,018$$

$$V_{H_2O(consumido)} = 0,0139 \times 0,018$$

$$V_{H_2O(consumido)} = 0,0002502 \text{ Litros}$$

#### Cantidad de agua restante:

$$V_{H_2O(restante)} = V_{H_2O(inicial)} - V_{H_2O(consumido)}$$

$$V_{H_2O(restante)} = 2L - 0,0002502 L$$



$$V_{H2O(restante)} = 1,99974L$$

**4.4.1.6 Interpretación del resultado**

Para aplicaciones experimentales, este resultado muestra que incluso con una corriente moderada y poco tiempo, se obtiene una cantidad medible de hidrógeno, confirmando de esta manera los cálculos son correctos y coherentes con la teoría de electrólisis.

**4.4.2 Monitoreo del potencial energético de los paneles solares.**

A continuación, se presentan la generación del voltaje y corriente del comportamiento proveniente de las distintas fuentes renovable, en este caso se monitoreó el voltaje y corriente generado por los paneles solares, en dos escenarios:

- **Medición del potencial energético sin conexión al electrolizador.**

En el primer escenario se hace referencia a que los paneles solares no estaban conectados al electrolizador durante el monitoreo.

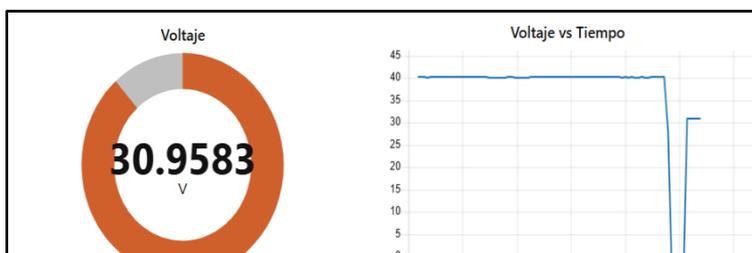


Figura 65.- Monitoreo de voltaje de panales solares sin carga

La gráfica muestra el comportamiento del voltaje sin la conexión del electrolizador alcalino, observándose una producción de 30,95V en un día ligeramente soleado con tendencia estable en los últimos minutos, lo cual indica una buena generación solar, debido a una buena irradiancia solar constante.



Figura 66.- Monitoreo de la corriente de panel solares sin carga.



En la figura 62 muestra la medición de corriente que se la realiza sin conexión al electrolizador bajo esta condición, no circula corriente eléctrica, ya que no existe un consumidor de energía o carga que cierre el circuito. Por esta razón, como se observa en la figura, únicamente se registra un valor de voltaje generado por los paneles, mientras que la corriente es nula.

- **Medición del potencial con conexión al electrolizador**

A continuación, se presenta en la figura 65 el monitoreo de voltaje y corriente de la fuente renovable fotovoltaica.

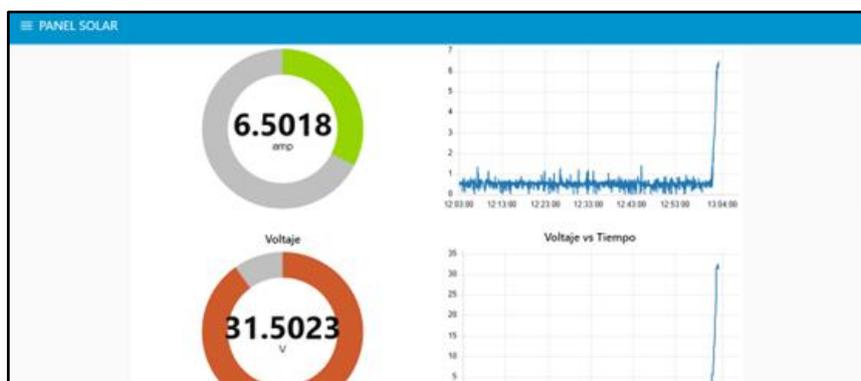


Figura 67.- Monitoreo de voltaje y corriente de los paneles solares conectados al electrolizador alcalino

En las gráficas se observa el comportamiento eléctrico de los paneles solares al momento de conectar el electrolizador alcalino. Se evidencia un incremento inmediato de la corriente, alcanzando aproximadamente 6,5018A, lo cual indica que el electrolizador empieza a consumir energía para iniciar el proceso de electrólisis. Este aumento de corriente es característico de la activación de una carga significativa en el sistema. Simultáneamente, se registra una ligera caída en el voltaje, comportamiento esperable cuando una fuente de energía enfrenta una demanda elevada. Esta disminución de voltaje confirma que el sistema fotovoltaico está entregando potencia al electrolizador, el cual actúa como una resistencia electroquímica constante.



**4.4.3 Monitoreo del potencial energético del aerogenerador de eje vertical**

Las fuentes renovables eólicas que se encuentran en los laboratorios debido al no existir mantenimiento alguno afectan significativamente su eficiencia y por esta razón no producen el voltaje mínimo de entrada de los reguladores de carga para que exista la rectificación de la corriente para usarla en el electrolizador, debido a lo que se procedió a simular el voltaje máximo de entrada de 27V con una fuente externa DC. El objetivo es evaluar el potencial de generación en ausencia de consumo, y posteriormente, la respuesta del sistema al ser sometido a una carga real, como lo es el proceso de electrólisis para la producción de hidrógeno.

- **Medición del potencial sin conexión al electrolizador**

En el primer escenario sin conexión del electrolizador durante el monitoreo.

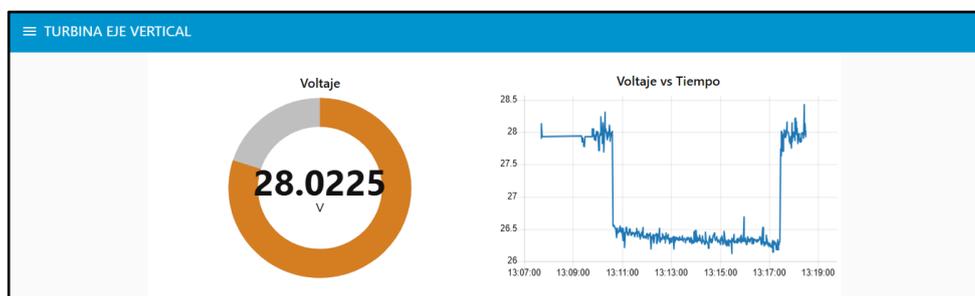


Figura 68.- Monitoreo de voltaje de aerogenerador de eje vertical sin carga.

En la primera imagen, correspondiente al escenario sin carga, se observa que el aerogenerador genera un voltaje estable de aproximadamente 28V al no estar conectado el electrolizador como consecuencia, no hay circulación de corriente, lo que se espera cuando el sistema opera en vacío. Esta medición permite verificar el voltaje máximo disponible del aerogenerador se encuentra en condiciones favorables.

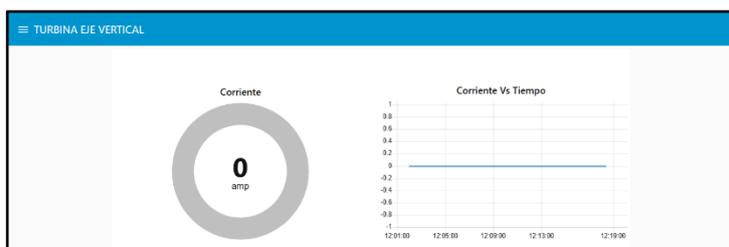


Figura 69.- Monitoreo corriente de aerogenerador de eje vertical conectado al electrolizador alcalino.



En la segunda imagen, aunque se indica que el aerogenerador no está conectado al electrolizador alcalino, los datos reflejan que la corriente permanece en 0 A, y el voltaje no muestra un descenso notable. Este comportamiento es normal pues no existe flujo de corriente alguno para ser medido, al no conectarse una carga real, por esta razón el sistema presenta un voltaje continuo y una corriente de consumo de cero.

**- Medición del potencial con conexión al electrolizador**

En el segundo escenario corresponde a la conexión del electrolizador durante el monitoreo.

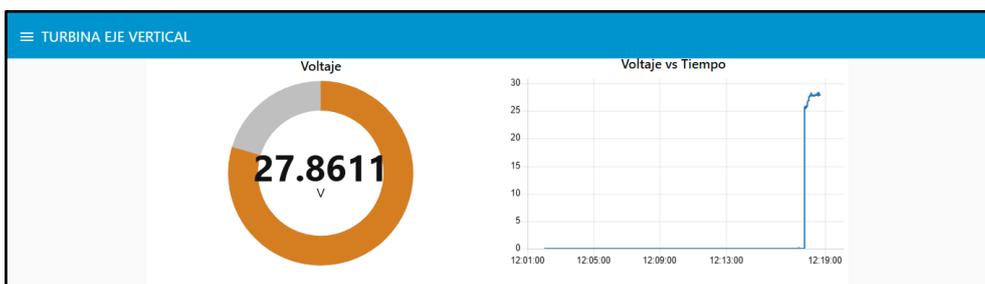


Figura 70.- Monitoreo de voltaje del aerogenerador de eje vertical con carga

Durante el periodo donde el sistema se encuentra estable y el electrolizador permanece conectado, se observa que el voltaje entregado por el aerogenerador se mantiene alrededor de 27.8 V a 28 V. Este valor indica que el sistema logra iniciar con éxito el suministro eléctrico al electrolizador, cumpliendo con un voltaje aceptable para iniciar la electrólisis alcalina, La turbina sí logra alcanzar un nivel de voltaje operativo adecuado.



Figura 71.- Monitoreo de voltaje de aerogenerador de eje vertical con carga.



En la sección constante de la curva de corriente, se identifica una corriente sostenida ligeramente superior a 4 A, con poca fluctuación en el consumo de corriente, justo antes de que se desconecte el electrolizador. Este valor indica una entrega de potencia eléctrica real por parte del aerogenerador, que coincide con el inicio del proceso de electrólisis.

Se puede concluir que el aerogenerador de eje vertical logra generar un voltaje y una corriente funcionales para activar el proceso de electrólisis. Las condiciones de operación son breves pero efectivas, y el sistema cumple su propósito.

#### 4.4.4 Monitoreo del potencial energético de la turbina eólica

La generación eólica no abastece energía mínima pues de igual manera la falta de mantenimiento especialmente en los alabes no permite el correcto funcionamiento de la turbina y esto afecta directamente su producción, por esta razón se procedió a simular su voltaje máximo de entrada con una fuente de voltaje continua.

##### - Medición del potencial sin conexión al electrolizador

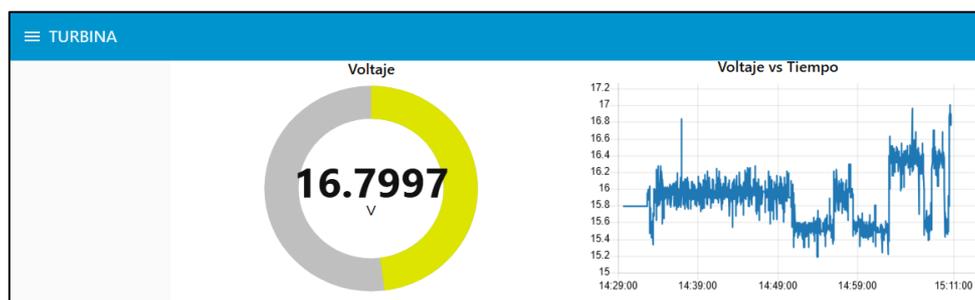


Figura72.- Monitoreo de voltaje de la turbina eólica sin carga.

La figura 72 muestra la medición de voltaje generada por una turbina eólica de eje vertical sin carga, es decir, sin conexión a ningún dispositivo de consumo. En estas condiciones, se observa un voltaje promedio en torno a 16.79 V, con ligeras oscilaciones en el tiempo, el voltaje medido representa la capacidad máxima de generación del aerogenerador sin interferencias resistivas o externas

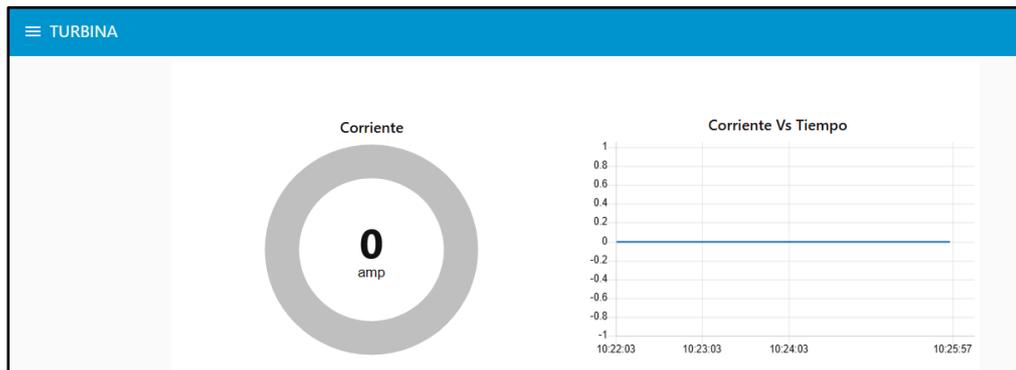


Figura 73.- Monitoreo de corriente de la turbina eólica sin carga.

Al igual que las demás mediciones de corriente con ausencia de carga no se registra valores de corriente a demás esto indica que los sensores de corriente no generan ruido ni falsas mediciones cumpliendo con una buena calibración de los sensores de corriente ACS712.

- **Medición del potencial con conexión al electrolizador**

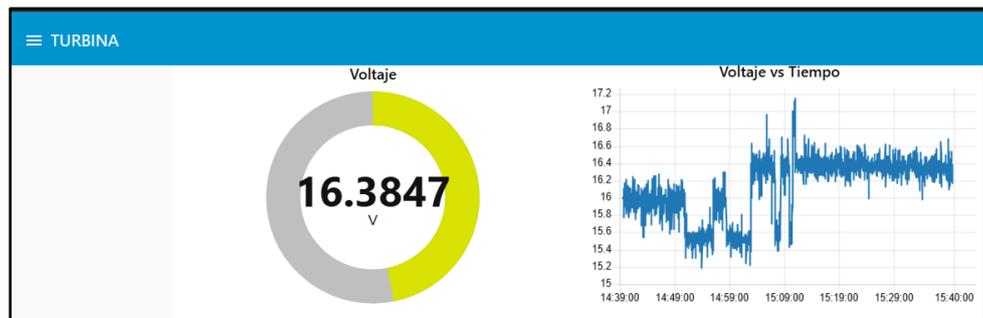


Figura 74.- Monitoreo de voltaje de la turbina eólica con carga.

En esta figura 74 se muestra el comportamiento del voltaje de salida de la turbina eólica al estar conectada a una carga resistiva-química, el voltaje promedio registrado es de 16.3847 V, muy similar al valor sin carga, Se observa una ligera caída de tensión en comparación con el estado sin conexión, lo cual es normal debido a la demanda de corriente por parte del electrolizador.



Figura 75.- Monitoreo de corriente de la turbina eólica con carga.

Durante el monitoreo, se observa que la corriente entregada por la turbina eólica se estabiliza alrededor de los 2,5 A. Aunque esta magnitud es moderada comparada con otras fuentes como los paneles solares, permite una producción sostenida de hidrógeno en valores bajos pero constantes, como se evidencia más adelante en la gráfica 81 de "Moles vs Minuto".

#### 4.5 Monitoreo de la generación de hidrógeno verde.

A continuación, se presenta los resultados del monitoreo de la generación de hidrógeno verde mediante las diferentes fuentes renovables integradas en el sistema. Se empleó un sensor MQ-8 para cuantificar el hidrógeno producido..

##### 4.5.1 Monitoreo de generación de hidrógeno de los paneles solares

En esta sección se analiza la capacidad de generación de hidrógeno a partir del potencial energético suministrado por paneles solares. Se estudia el comportamiento del sistema en condiciones reales, evaluando tanto la respuesta del sensor ante la irradiancia solar.

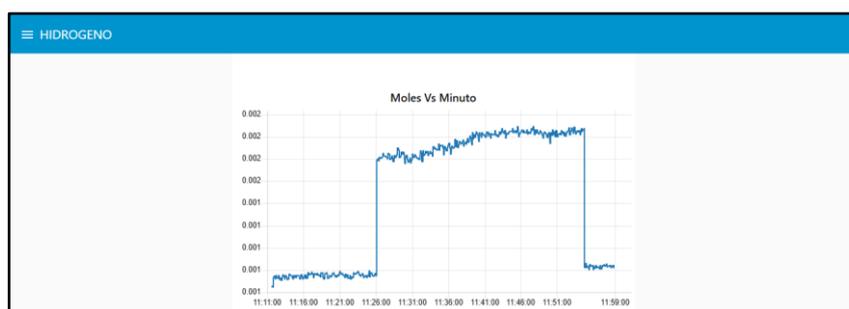


Figura 76.- Monitoreo de generación de hidrógeno de los paneles solares



Durante el período de prueba, se evidenció una producción constante de corriente con valores cercanos a los 6,5 A, y un voltaje promedio en torno a los 31V. Estos parámetros eléctricos fueron suficientes para activar el electrolizador alcalino, lo cual se refleja directamente en la curva de producción de hidrógeno en moles por minuto, donde se observa un aumento sostenido desde el minuto 11:20 hasta el 11:50, alcanzando un valor muy cercano a los 0.00201 moles/minuto, que concuerda con la simulación de Matlab.

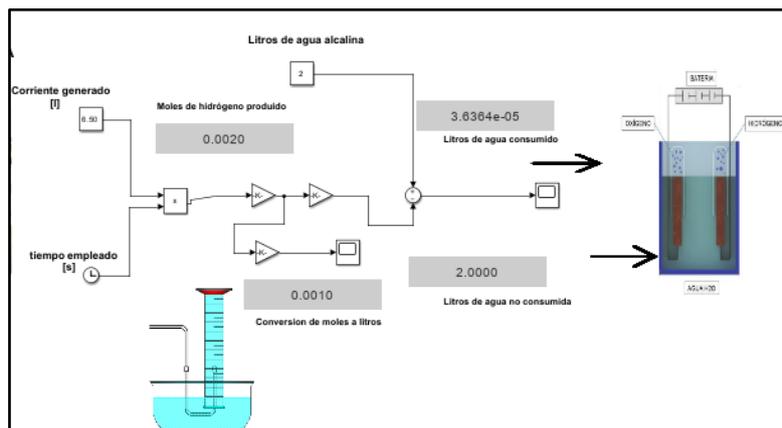


Figura 77.-Simulacion en Matlab de generación de Hidrógeno de los paneles solares. El vínculo identificado entre el incremento de la corriente y la cantidad de hidrógeno generado evidencia que el sistema fotovoltaico fue capaz de aportar la energía suficiente para mantener activo el proceso de electrólisis, lo que valida su rendimiento y funcionalidad en un entorno real de operación. Estos resultados refuerzan la viabilidad del uso de energía solar para la producción continua de hidrógeno verde.

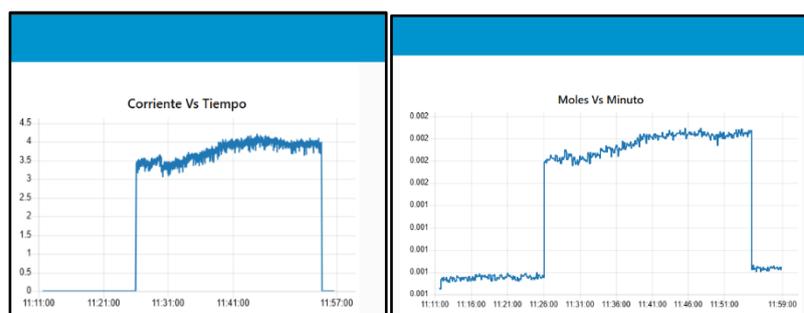


Figura 78.- Comparación entre gráficos de corriente y generación de hidrógeno



Es claro que el comportamiento de la gráfica de “corriente vs tiempo” es similar a la gráfica “moles vs minuto” pues la producción de hidrógeno depende directamente de la corriente. Aunque el voltaje se mantiene estable en gran parte del intervalo observado, existe una leve caída a lo largo del tiempo, lo cual podría deberse a la disminución de irradiancia solar.

**4.5.2 Monitoreo de generación de hidrógeno del aerogenerador de eje vertical**

En este apartado se evalúa el desempeño del sistema cuando es energizado por el aerogenerador de eje vertical, teniendo en cuenta que está generando 28 voltios y 4,3A

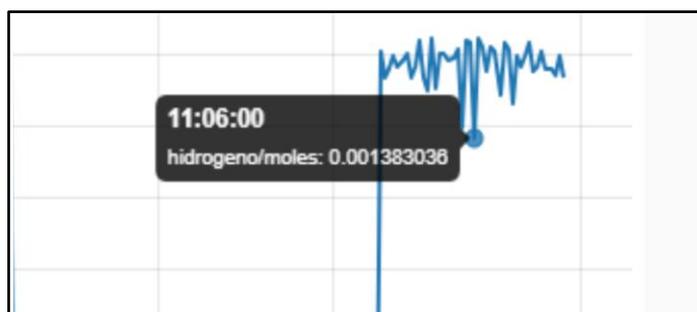


Figura 79.- Producción de hidrógeno con aerogenerador de eje vertical.

En la figura se pudo observar un comportamiento estable en la producción de hidrógeno, la corriente medida es de 4,30A y mediante la simulación en Matlab se procede a ingresar ese valor de corriente y en un tiempo de un minuto para validar los datos de la medición con el sensor.

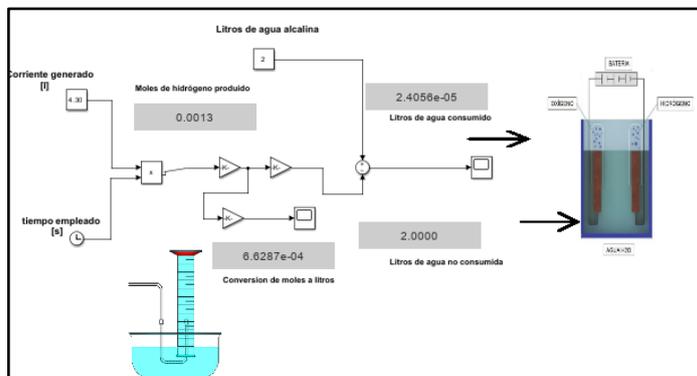


Figura 80.- Simulación en Matlab de generación de Hidrógeno del aerogenerador de eje vertical



La simulación proporciona un valor de producción de 0,0013 moles de hidrógeno, validando el diseño del sistema de control y medición, así como la viabilidad del proceso bajo condiciones ideales de generación renovable.

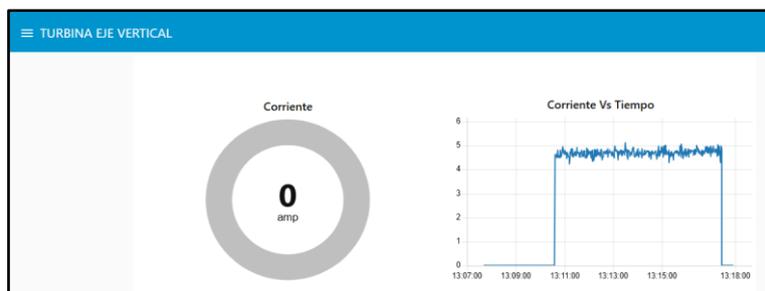


Figura 81.-Gráfica de corriente vs tiempo de la turbina de eje vertical

La gráfica de corriente vs tiempo muestra un comportamiento característico de activación controlada mediante una fuente DC. Estrictamente similar a la producción de hidrógeno, comportándose de acuerdo con la ley de Faraday ,inicialmente la corriente es nula, indicando que el sistema no estaba energizando el electrolizador. Posteriormente se conectó el electrolizador mediante el selector en la posición de “turbina de eje vertical”, se observa un ascenso abrupto hasta aproximadamente 4,4A valor que se

Finalmente, la caída abrupta de la corriente a cero representa finalización de la prueba, lo cual coincide con el comportamiento observado en la generación de hidrógeno.

#### 4.5.3 Monitoreo de generación de hidrógeno de la turbina eólica

En este apartado se evalúa la producción de hidrógeno utilizando una microturbina eólica convencional. Se presentan los datos obtenidos bajo condiciones controladas.

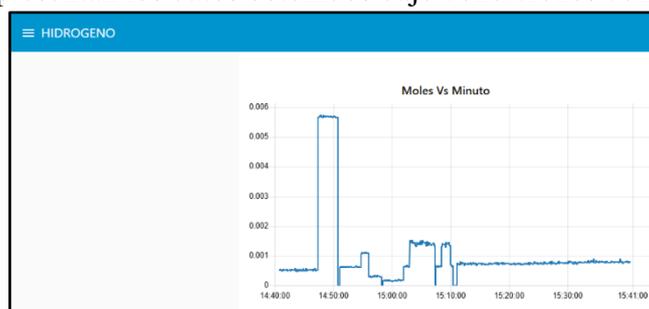


Figura 82.- Gráfica de corriente vs tiempo de la turbina.



En la figura se puede apreciar que la turbina eólica alcanza un régimen constante cercano a los 2.4A durante un intervalo sostenido. Esta estabilización permite un comportamiento más predecible del proceso de electrólisis, lo cual se traduce en una producción de hidrógeno también estable, aunque moderada. En ese periodo, la generación de hidrógeno, expresada en moles por minuto, mantiene una tendencia casi lineal y continua, lo que confirma que incluso con corrientes relativamente bajas, si estas se mantienen constantes, es posible obtener una producción eficiente y medible de hidrógeno. Este resultado resalta la importancia de la estabilidad del suministro eléctrico por sobre la magnitud de los picos momentáneos. A continuación, su simulación.

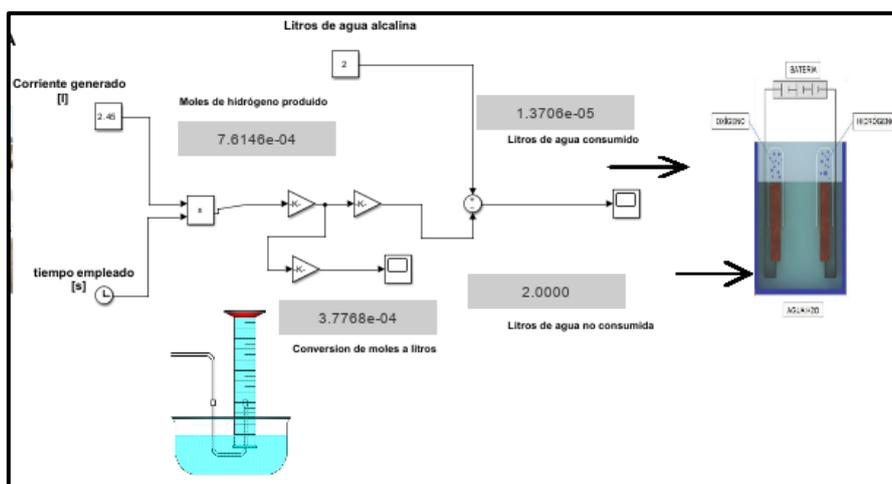


Figura 83.- Simulación en Matlab de generación de Hidrógeno de turbina eólica

Durante la fase de estabilización del sistema, el voltaje registrado por la turbina eólica se mantiene alrededor de los 16.3 a 16.5 V con pequeñas fluctuaciones, como se observa en la gráfica de Voltaje vs Tiempo. Este nivel de voltaje, aunque inferior al de otras fuentes como los paneles solares, resulta suficiente para sostener el proceso de electrólisis.

El voltaje constante permite que la corriente fluya de manera estable, lo que se refleja en una generación continua de hidrógeno. Aunque el volumen producido no es alto debido a la corriente limitada, la estabilidad del voltaje es crucial para evitar interrupciones en la reacción química. Si el voltaje hubiera sido intermitente o muy variable, la producción se habría visto fragmentada, afectando la eficiencia global del proceso. En



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD

resumen, el voltaje actúa como un habilitador del proceso, asegurando que la energía suministrada sea continua y útil para separar las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno.

#### 4.6 Evaluación experimental de la producción de hidrógeno mediante variación de parámetros eléctricos

Se realizaron pruebas con una fuente DC regulable, variando el voltaje y la corriente para analizar el comportamiento del sistema.

- Se evaluó la cantidad de hidrógeno generada (en moles) a intervalos de 1 y 20 minutos.
- Se utilizó un sensor MQ-8 conectado al convertidor ADS1115 para registrar los valores compararlos con los resultados esperados.

Tabla 7.- Tabla de Evaluación Experimental de la Producción de Hidrógeno Mediante Variación de Parámetros Eléctricos.

FUENTE				ELECTROLIZADOR				
Voltaje [V]	corriente [A]	tiempo [m]	H2 (mol)/20min	observaciones	hora	votaje en bornes	corriente en bornes [A]	H2 (mol)1min
3V	0.02A	20m	0.0032	no produce reaccion	11:40-12:00	1.54v	0.51A	0.00015851
4.5V	0.15A	20m	0.0046	ligera reaccion pero no la suficiente	12:00-12:20	3.61V	0.74A	0.00022999
5V	0.20A	20m	0.0045	mayor produccion en el catodo, pero no mucho en anodo	12:20-12:40	4v	0.73A	0.00022688
5.5V	0.35A	20m	0.0060	aumenta ligeramente la reaccion de electrolisis	12:40-13:00	4v	0.97A	0.00030148
6v	0.40A	20m	0.0064	muy poca reaccion en el anodo	13:00-13:20	5V	1.03A	0.0003212
7v	0.52A	20m	0.0066	no existe burbujeo pero la reaccion es ligeramente mas veloz	13:20-13:40	5.88V	1.06A	0.00032945
8V	0.64A	20m	0.0040	aun no existe burbujeo	13:40-14:00	6.7V	0.64A	0.00019891
9V	0.84A	20m	0.0520	ligero aumento en la reaccion	14:00-14:20	8V	0.84A	0.00026107
10V	1.07A	20m	0.0067	reaccion de electrolisis aumentada un poco	14:20-14:40	9.22V	1.07A	0.00033246
11V	1.12A	20m	0.0070	un poco de aumento de electrolisis en anodo y catodo	14:40-15:00	9.4V	1.12A	0.00034810
12V	1.27A	20m	0.0079	mayor aumento en el catodo donde se produce hidrógeno	15:00-15:20	10.3V	1.27A	0.00039472
13V	1.45A	20m	0.0090	mantiene el mismo comportamiento anterior	15:20-15:40	11.2V	1.45A	0.00045066
14V	1.64A	20m	0.0102	el anodo reacciona un poco mas que la anterior	15:40-16:00	12.2V	1.64	0.00050971
15V	1.83A	20m	0.0106	aumento en el proceso de la electrolisis	16:00-16:30	13.2V	1.70A	0.00052858
16V	2A	20m	0.0122	comienza le burbujeo un burbujeo cada 8segundos	16:30-17:00	13.9V	1.96A	0.00060942
17V	2.17A	20m	0.0124	burbujeo cada 5 segundos	17:00-17:30	14.77V	2A	0.00062186
18V	2.41A	20m	0.0137	burbujeo cada 3 segundos	17:30-18:00	15.77V	2.2A	0.00068404
19V	2.58A	20m	0.0149	burbujeo cada 2 segundos	18:00-18:30	16.63V	2.40A	0.00074623
20V	2.80A	20m	0.0174	burbujeo ligeramente continuo	18:30-19:00	18.16V	2.80A	0.00087060
21V	3A	20m	0.0198	la corriente se mantiene estable en la fuente	19:00-19:30	18.35V	3.18A	0.00098875
22V	3.17A	20m	0.0206	los electrodos tienen un ligero calor pero no excesivo	19:30-20:00	19.22V	3.32A	0.00103228
23V	3.40A	20m	0.0222	burbujeo constante	20:00-20:30	20.35	3.57A	0.0011002
24V	3.70A	20m	0.0234	burbujeo constante	20:30-21:00	21.21V	3.76A	0.00116909
25V	3.94A	20m	0.0245	burbujeo constante	21:00-21:30	22.16V	3.94A	0.00122506
26V	4.20A	20m	0.0258	burbujeo constante	21:30-22:00	23V	4.15A	0.00129036
27V	4.45A	20m	0.0271	burbujeo constante	22:00-22:20	23.92V	4.35A	0.00135254
28V	4.67A	20m	0.0280	burbujeo constante	22:20-22:40	24.90V	4.51A	0.00140229
29V	4.85A	20m	0.0294	burbujeo constante	22:40-23:00	25.40V	4.73A	0.00147069
30V	5.20A	20m	0.0315	Burbujeo con burbujas mucho mayor	23:00-23:30	26V	5.06A	0.00157330

A continuación, se presenta de manera grafica el comportamiento de la corriente aplicada y su generación de hidrógeno.

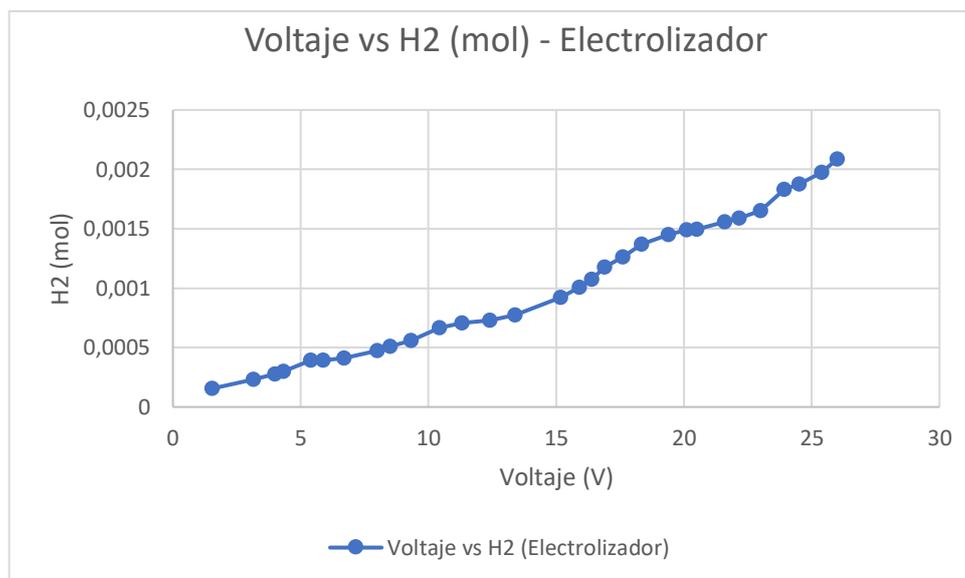


Figura 84.-Gráfico de la curva de hidrógeno vs voltaje

La primera observación de la curva se aprecia un crecimiento no lineal y moderado, la curva muestra un aumento suave de moles de H<sub>2</sub> conforme sube el voltaje. Esto indica que el voltaje no tiene una relación directamente proporcional con la cantidad de hidrógeno producido. Al inicio de la gráfica, se puede observar que a bajos voltajes la producción de hidrógeno es mínima o casi nulo esto es normal pues se debe a que la electrólisis requiere un voltaje mínimo para iniciar la reacción 1.23V en condiciones ideales.

Un muy importante tomar en cuenta que a más voltaje no implica más hidrógeno si la corriente no acompaña. En sistemas reales, subir demasiado el voltaje puede causar calentamiento excesivo y pérdidas energéticas, por esta razón de optimizará el sistema con un convertidor DC-DC como se mostrará más adelante.

### Producción de hidrógeno VS Corriente

En la figura 80 se observa la curva del comportamiento entre la producción de hidrógeno y la corriente aplicada.

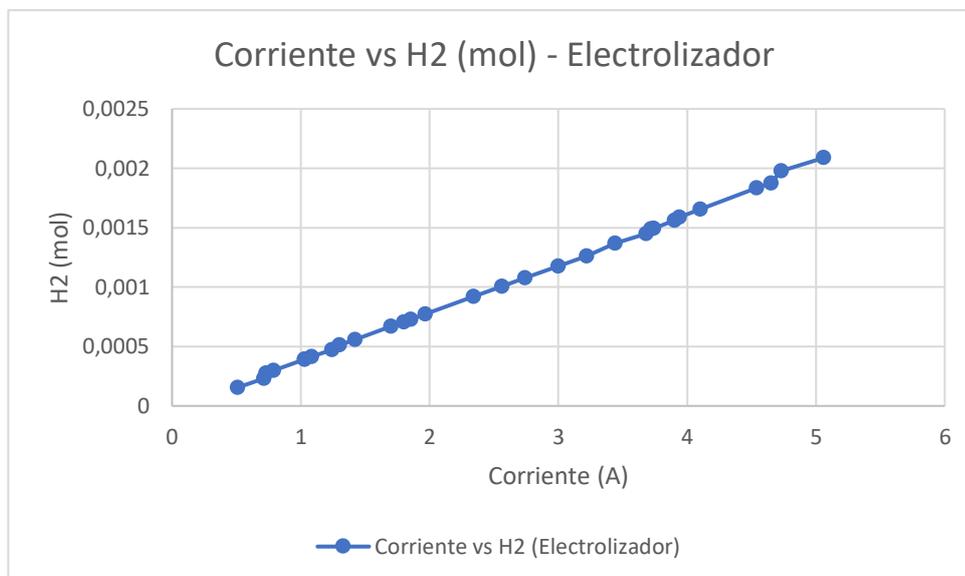


Figura 85.- Grafico de la curva de hidrógeno vs corriente

La curva de moles de hidrógeno vs corriente muestra un crecimiento más marcado, directo y lineal que la curva de moles de hidrógeno vs corriente, significa que el aumento de la corriente tiene un impacto más significativo y directo en la producción de hidrógeno, esto se debe a que, según la ley de Faraday, "la masa de sustancia liberada en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por la celda" (Faraday, 1834). En este contexto, un aumento de la corriente implica un incremento en la cantidad de electrones disponibles para romper las moléculas de agua, lo que conlleva a una mayor producción de gas hidrógeno. La pendiente lineal de la gráfica confirma esta relación directa, lo que permite utilizar la corriente como parámetro clave para estimar y controlar la generación de hidrógeno en tiempo real. Esta característica es fundamental en sistemas de monitoreo y control basados en IoT.

#### 4.7 Resultados de la medición visual.

La medición visual de la generación de gas hidrógeno se realiza a través de un dispositivo de recolección, como una probeta invertida sumergida en agua. Este método facilita la verificación empírica del hidrógeno producido en tiempo real, complementando las lecturas de sensores con una evidencia tangible y directa del proceso electroquímico.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

Tabla 8.- Tabla de datos Experimentales de Producción de Hidrógeno con la probeta

Corriente	Voltaje	Temperatura °C	temperatura °K	Tiempo (m)	Tiempo (s)
0,56	5	31,95	305,1	6:45,40	405,67
1,28	10	56,9	330,05	4:34,01	274,01
2	15	62	330,15	2:53,00	172,70
3,1	20	67	340,16	1:49,78	109,78
4	25	71	344,14	1:24,00	84,09
4,7	30	73	346	1:11,00	71,15

La tabla muestra una clara tendencia inversamente proporcional con relación al tiempo de producción de hidrógeno y el aumento de corriente, es decir que a menor corriente el tiempo requerido para generar 50 ml de hidrógeno es considerablemente mayor, por ejemplo, con una corriente de 0,56A el tiempo empleado es de 405,67s y con un valor de corriente de 4,70 el tiempo disminuye considerablemente a 71,15s. Esta relación es coherente con la ley de Faraday, donde la cantidad de gas hidrógeno verde producido es directamente proporcional a la corriente aplicada. la influencia del voltaje se relaciona con el aumento de corriente respetando la ley de Faraday pues al igual que la corriente aumenta el voltaje de igual forma, la temperatura es un indicador que el sistema es más eficiente a temperaturas altas disminuyen la resistencia interna del hidróxido y aceleran las reacciones de electrólisis siendo directamente proporcional con el volumen de gas medido.

A continuación, se presenta el cálculo de la demostración de los resultados experimentales.

Tabla 9.- Tabla para demostración de resultados experimentales

Corriente	Voltaje	Temperatura °C	temperatura °K	Tiempo (m)	Tiempo (s)
0,56	5	31,95	305,1	11:16.12	676.12

Cálculo de la carga eléctrica:

$$Q = I \times t = 0,56 \times 676,12$$



$$Q = 378,6272 \text{ Coulombs}$$

Cálculo de los moles de hidrógeno:

$$n = \frac{Q}{2F} = \frac{378,6272}{2 \times 96485}$$

$$n = 0,001962 \text{ moles de hidrógeno}$$

Cálculo de volumen de hidrógeno generado en volumen:

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{0,001962 \times 0,0821 \times 305,10}{1}$$

$$V = 0,04915 \text{ Litros} = 49,15 \text{ ml}$$

El resultado se aproxima mucho a los 50ml de la probeta, esto representa una diferencia de menos de 1 mililitro, es decir, una cantidad muy pequeña.

El error entre la medición visual y los cálculos es de menos del 2 % , a continuación, se presenta los cálculos que lo demuestran.

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{valor medido} - \text{valor teorico}|}{\text{valor teorico}} \times 100\%$$

$$\text{Error (\%)} = \frac{|49,15 - 50|}{50} \times 100 = 1,7\%$$

La diferencia entre el valor teórico y el valor medido en la medición visual se debe a diversos factores como pérdidas de gas durante el transporte a través de la manguera lo más probable variaciones como la temperatura pues a mayor temperatura, los gases ocupan más volumen. Estos factores afectan la precisión del volumen observado frente al calculado teóricamente.

#### 4.7.1 Comportamiento térmico

A continuación, se observa en la gráfica el comportamiento del electrolizador con respecto a la temperatura según la corriente aplicada

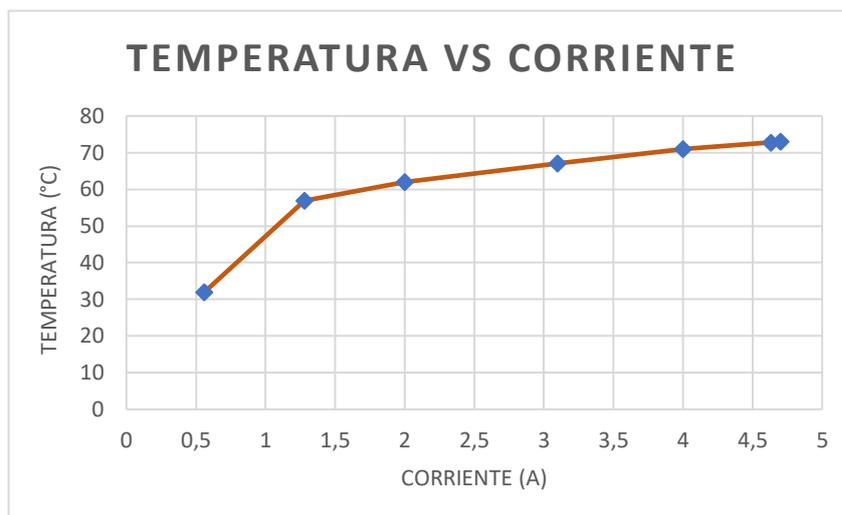


Figura 86.-Comportamiento térmico del electrolizador en función de la corriente aplicada.

La gráfica muestra una tendencia ascendente entre la corriente aplicada (A) y la temperatura del electrolito durante el proceso de electrólisis. Este comportamiento es coherente con el principio de efecto Joule, según el cual el paso de corriente por un medio conductor genera calor proporcional

Al incrementarse la corriente, se incrementa también la generación de calor dentro del electrolizador, lo que eleva la temperatura de la solución electrolítica. A partir de aproximadamente 3,1 A, la curva de temperatura empieza a aplanarse, indicando una disminución en la pendiente. Esto sugiere que el sistema se aproxima a un punto de saturación o equilibrio térmicos con su entorno, y que mayores incrementos de corriente no resultan en aumentos significativos de temperatura. Superar los 73 °C este valor alcanzado con 4,7A podría representar un riesgo, ya que a temperaturas superiores podría generarse degradación del electrolito o daño en los electrodos.

#### 4.7.2 Optimización de generación de hidrógeno

Configuración óptima del convertidor DC-DC para maximizar la producción de hidrógeno y preservar la vida útil del electrolizador, con los registros obtenidos se puede llegar a un punto de optimización de generación de hidrógeno.

Tabla 10.- Tabla de parámetros para optimizar la producción de hidrógeno



Configuración	Producción de H <sub>2</sub>	Burbujeo	Temperatura	Riesgo térmico	Observación técnica
36 V – 5.93 A	Muy alta	Excesivo	>75 °C	Alto	Riesgo de saturación y estrés térmico
27 V – 4.63 A	Alta	Constante	≈72.7 °C	Medio-alto	Mayor estrés térmico sin ganancia significativa
23 V – 4 A	Alta	Constante	≈71 °C	Bajo	Punto óptimo balanceado
10 V – 1.28 A	Baja	Irregular	<60 °C	Bajo	Baja eficiencia de electrólisis

El análisis de las gráficas de las figuras de voltaje vs moles y de hidrógeno demuestra que, a partir de los 20 V, la eficiencia de producción comienza a estabilizarse. No obstante, al sobrepasar los 24 V, se incrementa el riesgo de acumulación térmica y degradación del electrolito. Por ello, 23 V representa un equilibrio ideal, entregando suficiente potencial eléctrico para disociar las moléculas de agua sin someter al sistema a sobrecarga. La corriente es el principal factor que determina la cantidad de hidrógeno generado (según la Ley de Faraday). En las gráficas de corriente vs moles, se aprecia que a partir de 3 A, la producción se vuelve eficiente. Sin embargo, por encima de 4.5 A comienzan a observarse efectos indeseables como sobrecalentamiento, burbujeo excesivo y riesgo de corrosión acelerada de los electrodos. Así, 4 A mantiene un burbujeo constante, controlado y seguro.

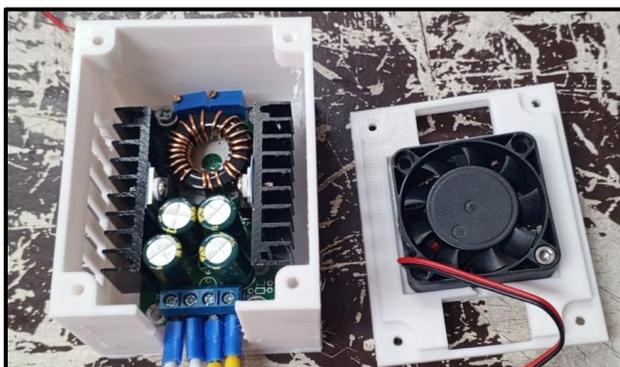


Figura 87.-Convertidor DC-DC Buck calibrado y con carcasa en impresión 3D



Los registros muestran que, a 71 °C, la cinética de la reacción de electrólisis es óptima, permitiendo alta eficiencia sin degradación del electrolito. Temperaturas superiores a 75 °C pueden acelerar la evaporación del agua, aumentar la resistencia del sistema y reducir la estabilidad de los materiales internos. La configuración de 23 V y 4 A mantiene esta temperatura de forma estable y sin picos peligrosos.

**4.7.3 Estimación energética del hidrógeno verde.**

Con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica de la producción de hidrógeno verde, en la Tabla 11 se realizaron estimaciones de generación en distintos periodos horarios a lo largo del día, se presenta los resultados obtenidos, diferenciando los intervalos según las condiciones ambientales típicas de irradiancia solar y velocidad del viento considerando la corriente generada por cada fuente

Tabla 11.- Tabla de distribución horaria de la generación de hidrógeno según condiciones ambientales de viento y radiación solar.

<b>Periodo horario</b>	<b>Comportamiento típico del viento</b>	<b>Generación de hidrógeno en moles</b>
06:00 - 08:00	Vientos suaves Apto para aerogeneradores verticales (baja velocidad)	Aerogenerador de eje vertical: 0,0257 Turbina eólica: 0,0175
08:00 – 10:00	Mantiene suave	Aerogenerador de eje vertical: 0,0467 Turbina eólica: 0,0335
10:00 – 17:00	Vientos moderados	Aerogenerador de eje vertical:0,534 Turbina eólica: 0,2856
17:00 – 19:00	Baja velocidad	Aerogenerador de eje vertical: 0,0335 Turbina eólica:0,066
19:00 - 06:00	Baja velocidad, mucha turbulencia	Aerogenerador de eje vertical: 0,1287 Turbina eólica: 0,0877
<b>Paneles solares</b>		
<b>Periodo horario</b>	<b>Comportamiento típico de irradiancia solar</b>	<b>Generación de hidrógeno en moles</b>
06:00 – 08:00	Muy baja, no recomendable	0,0746



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD

08:00 – 10:00	Baja irradiancia,	0,4104
10:00 – 14:00	Incremento progresivo	0,64361
14:00 – 19:00	Inicio de horas solares pico	1,7163
19:00 - 06:00	No existe radiación solar por la noche	0

Con el objetivo de estimar la energía aprovechable obtenida a través de la producción de hidrógeno, se determinó la cantidad de moles generados por cada tipo de fuente renovable y se calculó su equivalencia en kilovatios-hora (kWh), utilizando como base la energía libre de Gibbs. En la tabla 12 se presentan los resultados correspondientes a los paneles solares, el aerogenerador de eje vertical y la turbina eólica, lo que permite visualizar y comparar el aporte energético que cada sistema brinda al proceso de electrólisis

Tabla 12.- Tabla de producción total de hidrógeno verde.

Fuente renovable	Generación de hidrógeno (moles)	Energía (KWh)
Paneles solares	2,8449	0,1873
Aerogenerador de eje vertical	0,7686	0,0506
Turbina eólica	0,4903	0,0323
Total	4,1038	0,2702

A continuación, se demuestra mediante la simulación en Matlab los resultados globales de la generación de hidrógeno, como comprobación de los resultados:

En la Figura 88 se observa la generación de moles de hidrógeno producido a partir de los paneles fotovoltaicos.

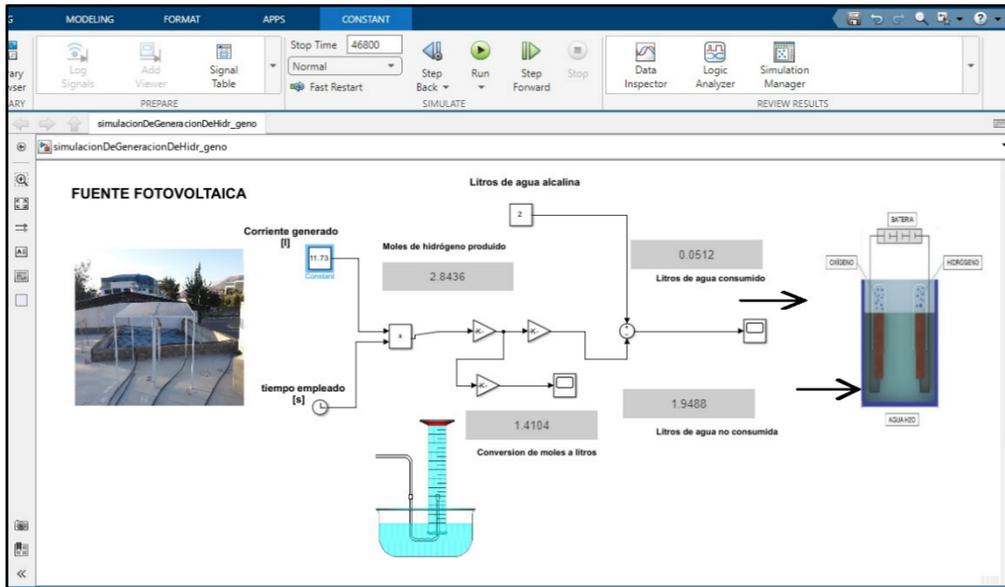


Figura 88.- Generación total de los paneles solares

En la Figura 89 se observa la generación de moles de hidrógeno producido a partir de la turbina de eje vertical.

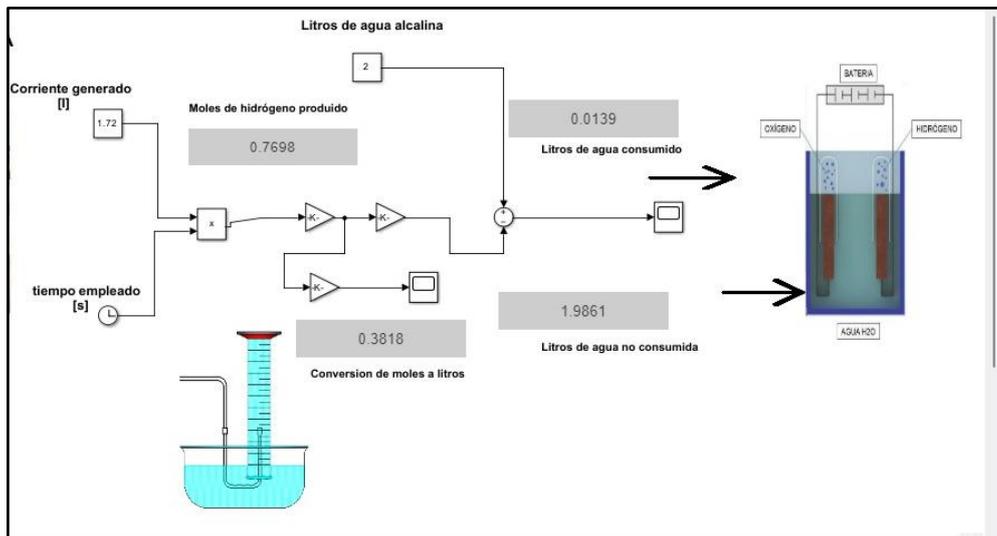


Figura 89 Generación total de la turbina de eje vertical

En la Figura 90 se observa la generación de moles de hidrógeno producido a partir de la turbina eólica.

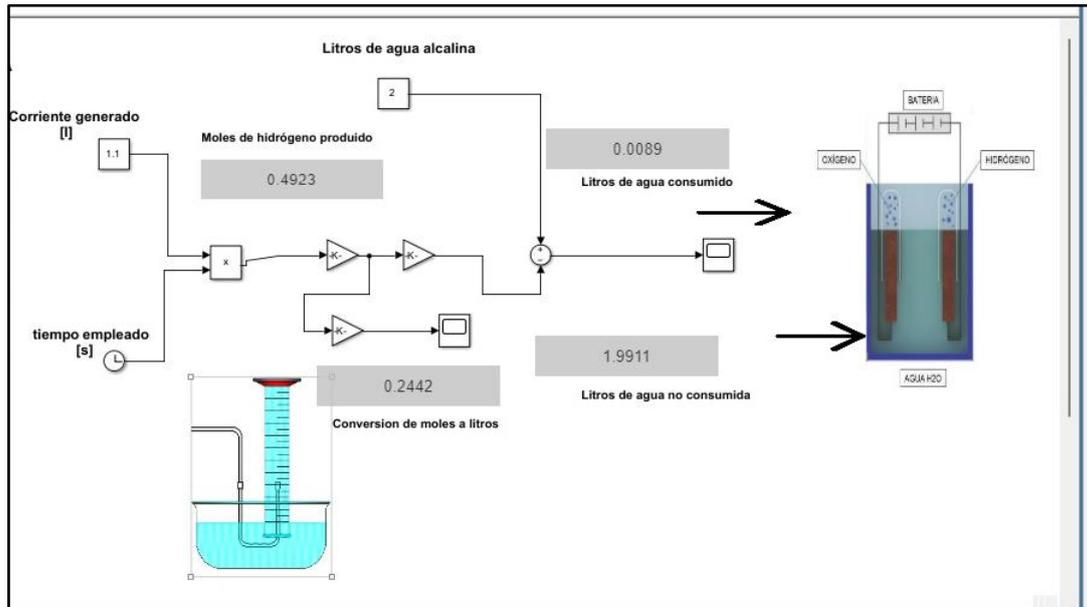


Figura 90.- Generación total de la turbina eólica

A continuación, se detalla la eficiencia de cada una de las fuentes renovables fotovoltaica y las turbinas eólicas utilizadas en este estudio.

La energía útil proveniente de hidrógeno producido de los paneles fotovoltaicos es de:

$$E_{H_2} = 0,1873KWh$$

Potencia fotovoltaica:

$$E = 0,26KWh$$

Cálculo de la eficiencia:

$$Eficiencia = \left( \frac{E_{H_2}}{E_{disponible}} \right) \times 100$$

$$Eficiencia = \left( \frac{0,1873}{0,26} \right) \times 100 = 72,04\%$$

En cuanto al aerogenerador de eje vertical la eficiencia según su producción de hidrógeno es de:



Energía útil proveniente del hidrógeno generado

$$E_{H_2} = 0,0506 \text{ KWh}$$

Potencia instalada:

$$P = 0,25 \text{ KWh}$$

Cálculo de la eficiencia:

$$\text{Eficiencia} = \left( \frac{0,0506}{0,25} \right) \times 100 = 20.24\%$$

Este comportamiento se debe a las condiciones del viento entre pérdidas mecánicas e internas actuales.

Mediante el mismo criterio de análisis ahora con la turbina eólica siendo esta de menor potencia se obtiene que:

Energía útil proveniente del hidrógeno generado.

$$E_{H_2} = 0,0323 \text{ KWh}$$

Potencia máxima instalada de la turbina:

$$P = 0,1933 \text{ KWh}$$

Cálculo de la eficiencia:

$$\text{Eficiencia} = \left( \frac{0,0323}{0,1944} \right) \times 100 = 16.62\%$$



Durante el proceso experimental, el convertidor tipo Buck fue calibrado para entregar una tensión constante de 25 V y una corriente de 4 A, con el fin de proteger el sistema ante posibles sobrecalentamientos en el electrolizador.

### **Conclusiones**

- El sistema presenta una eficiencia baja cuando el potencial de las energías renovables no es lo suficiente, lo cual evidencia que no es viable ni rentable en pequeña escala bajo estas condiciones. Las pérdidas acumuladas por conversión eléctrica, eficiencia del electrólisis, almacenamiento y posibles resistencias internas hacen que el proceso no sea eficiente energéticamente.

-Mediante el diseño del electrolizador se pudo concluir que la electrólisis se mantiene constante a partir de 5,5 V y 0,35 A, con un burbujeo moderado desde 20 V y 2,8 A, operando de forma segura hasta corrientes cercanas a 4 A sin presentar inestabilidades térmicas ni eléctricas. A través de pruebas externas se determinó que, a una temperatura de 71 °C y con una configuración de 23 V y 4 A, la reacción se mantiene estable, logrando una producción aproximada de 0,0022 moles de hidrógeno por minuto, lo que evidencia la tolerancia y seguridad del sistema en condiciones controladas.

- El hidrógeno se presenta como un vector energético con gran potencial, ya que permite almacenar energía renovable de forma limpia y reutilizable. A diferencia de las baterías, que tienen una vida útil limitada y eventualmente se desechan causando un impacto ambiental, el hidrógeno puede conservarse sin degradarse y utilizarse cuando sea necesario. Aunque en este estudio la eficiencia fue baja debido a la escala y a las condiciones del sistema, se reconoce su valor como alternativa sostenible frente a otras formas de almacenamiento que generan residuos contaminantes

### **Recomendaciones**

- Establecer un protocolo de operación entre 5,5 V a 23 V y hasta 4 A, dado que este rango garantiza estabilidad térmica y eléctrica, y optimiza la producción de hidrógeno sin riesgos operativos. En futuros ajustes y diseños, priorizar el control de la corriente sobre



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

el voltaje, asegurando que esta sea el parámetro principal en el diseño de estrategias de producción de hidrógeno, tal como lo indica la ley de Faraday.

- Implementar un sistema de monitoreo automatizado de temperatura y corriente mediante IoT que alerte o module la entrada de energía si la temperatura del electrolizador supera los 71 °C, prolongando la vida útil del electrolizador

-Para aplicaciones experimentales de baja producción como el módulo desarrollado, se recomienda almacenar el hidrógeno en estado gaseoso a presiones moderadas, utilizando tanques tipo I de acero o aluminio, ya que son seguros, accesibles y adecuados.

**Referencias bibliográficas.**

[1] K. Altayib and I. Dincer, "Development of an integrated hydropower system with hydrogen and methanol production," *Energy*, vol. 240, p. 122780

doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122780>

[2] L. Contreras-Vásquez, "Factibilidad de producción de Hidrógeno verde en el Ecuador," *Investigación y Desarrollo*, vol. 16, no. 1, 12/12 2022

doi: <https://doi.org/10.31243/id.v16.2022.1805>

[3] W. C. Nadaleti, G. Borges dos Santos, and V. A. Lourenço, "The potential and economic viability of hydrogen production from the use of hydroelectric and wind farms surplus energy in Brazil: A national and pioneering analysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 3. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.199>

[4] A. Clerici and S. Furfari, "Challenges for green hydrogen development," in 2021 AEIT International Annual Conference (AEIT), 4-8 Oct. 2021 2021, pp. 1-6.

doi: <https://doi.org/10.23919/AEIT53387.2021.9627053>

[5] A. Kovač, M. Paranos, and D. Marciuš, "Hydrogen in energy transition: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 16, pp. 10016-10035, 2021/03/03/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256>.

[6] A. Theresia, "Powering The World With Hydrogen," *Konfrontasi: Jurnal Kultural, Ekonomi dan Perubahan Sosial*, vol.5,no. 2, 07/01 2018, doi: <https://doi.org/10.33258/konfrontasi2.v2i2.71>

[7] M. Melaina, M. Penev, and D. Heimiller, "Resource Assessment for Hydrogen Production: Hydrogen Production Potential from Fossil and Renewable Energy Resources," United States, 2013-09-01 2013. [Online]. Disponible: <https://www.osti.gov/biblio/1260322>



[8] “Modelo NREL simplificó el análisis de producción de hidrógeno” H2 News, 30 Diciembre, 2022 [Online]. doi: <https://h2news.cl/2022/12/30/modelo-nrel-simplifico-el-analisis-de-produccion-de-hidrogeno/>

[9] Tian, Li “Almacenamiento químico de energía eólica: producción de hidrógeno” Disposit Digital , doi: <http://hdl.handle.net/2445/180149>

[10] Nawaf H. Al Hajri , Rahaf Naji Al Harthi , Gopi Krishna P. y Rajababu N. “IoT and Machine Learning based Green Energy Generation using Hybrid Renewable Energy Sources of Solar, Wind and Hydrogen Fuel Cells” E3S Web Conf. Volume 472, 2024 International Conference on Renewable Energy, Green Computing and Sustainable Development, 05 January 2024, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447201008>

[11] Sin autor “Global CO2 emissions in 2019” CC. 11 de febrero de 2020, disponible: <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>

[12] Freddy J. Vélez Medina “METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL POTENCIAL SOLAR EN LA REGIÓN SUR DEL ECUADOR” disponible: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/23556/1/Freddy%20Jos%C3%A9%20V%C3%A9lez%20Medina.pdf>

[13] Ministerio del ambiente “PROYECTO EÓLICO GARCÍA MORENO ” proyectos energéticos Ecuador Septiembre 2020.

<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15530/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-253.pdf>

[14] Ministerio de energía y recursos naturales no renovables “Proceso público de selección-bloque de energía renovable no convencional (ernc) 200 mw” *Atlas Eólico del Ecuador*

<https://proyectos.energiayminas.gob.ec/descargaDocumento.php?nombre=FichaBloqueERNCP EGarciaMoreno.pdf&path=bloqueErnc>



[15] Elizabeth Connelly, Michael Penev, Anelia Milbrandt, Billy Roberts, Marc W. Melaina and Nicholas Gilroy “Resource Assessment for Hydrogen Production” US Department of Energy; National Renewable Energy Laboratory.

<https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper1728>

[16] Muhammet Kayfeci , Mutlucan Bayat “Hydrogen Production ” 2019

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-production>

[17] Jun Chi A, Hongmei Yu “Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production” Review (Special Issue of Photocatalysis for Solar Fuels)

[https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)

[18] Morlanes Sanchez, N. “Obtención de hidrógeno mediante reformado catalítico de nafta con vapor de agua” (2008). (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València). <https://riunet.upv.es/handle/10251/2185>

[19] Ministerio de la transición ecológica y el reto demográfico “Proyectos tractoros para una transición energética justa e inclusiva: Hidrógeno Renovable” Manifestación de interés: Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

<https://www.miteco.gob.es/es/energia/participacion/2023-y-anteriores/detalle-participacion-publica-k-359.html>

[20] Aldo Daconte “Preliminary results of an IoT-based prototype monitoring system for physicochemical parameters and water level in an aquifer: Case of Santa Marta, Colombia,” ScienceDirect

<https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.237>

[21] Younes L, Asmaa El Fahli b, Abdellah Chehri c, Adila Elmaghraoui b, Mohamed “Monitoring Solar Energy Production based on Internet of Things with Artificial Neural Networks Forecasting” Younes Ledmaoui a, Asmaa El Fahli b, Abdellah Chehri c, Adila Elmaghraoui b, Mohamed.



<https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.09.095>

[22] Jiménez Sáez, Fredy Ladisla “Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil”

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175586>

[23] Enoc Alejandro García Rivera “la renovada regulación constitucional de los hidrocarburos nacionales the renewed constitutional regulation of national hydrocarbons”

Revista Mexicana de Derecho Constitucional.

<https://doi.org/10.1016/j.rmhc.2016.03.015>

[24] Leon Hibbard , Stuart M.V. Gilfillan “Constraining the hydrogen storage capacity of natural gas storage sites in the United States” International Journal of Hydrogen Energy

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.342>

[25] Dias, Joelmir Augusto Costa “Reforma autotérmica do metano: estudo do Processo e de catalisadores” Repositorio institucional ufscar

<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/19509>

[26] Rivera V. Griselda Argelia <sup>a</sup>, Yasuhiro Matsumoto-Kuwabara <sup>b</sup>, Baquero-Parra Rafael <sup>c</sup> “Análisis para la obtención de hidrógeno a partir de biogás proveniente de la fermentación de bebidas naturales Analysis for Obtaining Hydrogen from Biogas by Means of the Fermentation of Natural Beverages”

<https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.009>

[27] Flores Calleñaupa, Fiorella Katy, Madueño Cereceda, Kathiza Annais “Aplicación de Biofotólisis para la Producción de Hidrógeno. Revisión Sistemática, 2022” Lima Este [1152]

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/104888>



[28] Elliott Humberto Luna Nevárez “Fermentación oscura para la producción de hidrógeno” Revista Científica De Ingenierías Y Arquitectura, 1(1), 22–29.

<https://doi.org/10.56643/rcia.v1i1.152>

[29] Baltazar Ortega, Pablo Martin “Diseño de un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen 1.5 L en la ciudad de Huancayo” Universidad Continental 2020

<https://hdl.handle.net/20.500.12394/8444>

[30] Touriño, Isabel Lado. "Hidrógeno como nuevo vector energético: presente y futuro." UE Steam Essentials 21. Universidad Europea, 2021.

[https://universidadeuropea.com/resources/media/documents/13\\_SteamUE\\_HIDROGENO.pdf](https://universidadeuropea.com/resources/media/documents/13_SteamUE_HIDROGENO.pdf)

[31] Rosa María Rodríguez, Gabriel Da Silva, Laura Urbina “Estudio del proceso de electrólisis para la producción de Hidrógeno Verde, a partir del agua de mar”

<https://doi.org/10.62876/tekhn.v25i3.5542>

[32] Maria J. Viguera, Helmut Georg “Gobierno y sociedad” 2024

<https://www.britannica.com/place/Spain/Government-and-societyv>

[33 ] International Renewable Energy Agency 2023 “Green hydrogen cost reduction”

<https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>

[34] Edison Patricio Cruceira F. “Implementación de un sistema de generación solar fotovoltaica con integración a la red eléctrica en el edificio de la carrera de ingeniería eléctrica de la universidad técnica del norte.”

<https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10103/2/04%20MEL%20076%20TRABAJO%20GRADO.pdf>



[35] Potosi Tana Freddy Leandro “Construcción de un prototipo de generador eólico de baja potencia con eje vertical en el edificio de la carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte”

<https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11555>

[36] Melo Paillacho, Cristian Anderson “ Implementación de un sistema de microgeneración eólica con integración a la red eléctrica en el edificio de la carrera de electricidad en la Universidad Técnica del Norte”

<https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10108>

[37] Marcelo F. Miranda Millacoy “Diseño, fabricación y caracterización de un electrolizador alcalino para la producción de hidrógeno verde a partir de energía solar fotovoltaica”

<https://repositorio.uoh.cl/bitstream/handle/611/73/Marcelo%20Miranca%20Millacoy%200-%20Tesis%20version%20final%20%28repositorio%20UOH%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[38] Luis Miguel Soriano Bermúdez “ Potencial de los sistemas Power-To-Power para el almacenamiento de energía de origen renovable”

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/93815/fichero/TFG-3815+SORIANO+B%C3%89RMUDEZ%2C+LUIS+MIGUEL.pdf>

[39] Juan Rafael López Ramírez “ Modelo dinámico de un electrolizador alcalino”

<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4703/fichero/Modelo+dim%C3%A1nico+de+un+electrolizador+alcalino.pdf>

[40] Lenntech ”Electrólisis” disponible:

<https://www.lenntech.es/electrolisis.htm>.

[41] Joan Ramón Morante “El almacenamiento de la electricidad ”

<https://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2015/12/9-.Juan-Ram%C3%B3n-Morante-almacenamiento-energia-electrica-Madridweb.pdf>



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

[42] Oscar Azueta Sosa “Diseño y caracterización de electrolizador alcalino para enriquecimiento de diésel”

<https://risisbi.uqroo.mx/bitstream/handle/20.500.12249/1941/TP315.2018-1941.pdf>

[43] Jorn Branus y Thomas Turek “Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review”

<https://doi.org/10.3390/pr8020248>



## ANEXOS

**A. Código de Programación ESP32**

En esta sección se presenta el código usado para la medición y envío de datos mediante el protocolo MQTT a Raspberry pi3B+.

```

/*
UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE
TESIS: MEDICIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE ENERGÍAS RENOVABLES
FOTOVOLTAICA Y EÓLICA
EXISTENTES EN LA CARRERA DE ELECTRICIDAD UTILIZANDO EL INTERNET DE LAS
COSAS PARA GENERACIÓN
DE HIDRÓGENO VERDE.
AUTOR: DARWIN SANTIAGO CANGAS IPIALES
Director: Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo Msc
Asesor: Phd. Collahuazo Galeano Gerardo Isaías
FECHA: 30 de Abril de 2025
*/
#include <WiFi.h> //Libreria para activar el Wifi en el Esp32
#include <PubSubClient.h> //Libreria para conectar con el servidor MQTT
#include <Wire.h> // Libreria para conectar el conversor ADS1115
#include <Adafruit_ADS1X15.h> //Libreria para manejar el conversor
analogo digital ADS1115

#define GAS_H2                (0) //Variable fija del MQ8 para
hidrogeno
#define RL_VALUE              (10) // Resistencia de carga en
kilo ohms interna del MQ8
#define CALIBARAION_SAMPLE_TIMES (50) // Muestras que se toma para
calibracion
#define CALIBRATION_SAMPLE_INTERVAL (500) // Intervalo entre muestras
durante calibración
#define READ_SAMPLE_INTERVAL (50) // Intervalo entre muestras
en operación normal
#define READ_SAMPLE_TIMES (5)

unsigned long previousMillis = 0; // Variable para almacenar el último
tiempo de medición
const long interval = 1000; // Intervalo de medición en milisegundos (1
segundo)

```



```

const char* ssid = "Santiago"; //Nombre de la red de wifi local a la
que se conectara el raspberry
const char* password = "123456788"; //Clave de la red wifi local
const char* mqttServer = "192.168.134.192"; //Direccion ip que tiene el
raspberry dentro de la red local
const int mqttPort = 1883; //Puerto de conexion para el servidor
mqtt
const float F = 96485.0; // Constante de Faraday (C/mol)
unsigned long tiempoInicial = 0; // Almacena el tiempo inicial
float molesH2 = 0.0; // Moles de H2 producidas

WiFiClient espClient; //Se le asigna un nombre al esp32 dentro de la
red
PubSubClient client(espClient); //se inicializa en esp32 como cliente
para el envio de datos por medio de mqtt
Adafruit_ADS1115 ads; // Crear una variable para nombrar el modulo
ads1115

#define SensorNivel 5 // Pin para el Trigger

//Resistencias para los divisores de corriente 30A
float R1Corriente30A = 6800.0; //Valor de la resistencia R1 del divisor
del voltaje para el sensado de la corriente del CorrientePanel o sensor
de 30 Amperios
float R2Corriente30A = 10000.0; //Valor de la resistencia R2 del divisor
del voltaje para el sensado de la corriente del CorrientePanel o sensor
de 30 Amperios
//Resistencias para los divisores de corriente 30A
float R1Corriente20A = 1000.0; //Valor de la resistencia R1 para la
corriente del sensor de 30 Amperios
float R2Corriente20A = 2000.0; //Valor de la resistencia R2 para la
corriente del sensor de 30 Amperios
//Resistencia para divisor de voltaje
float R1Voltage = 10000.0; //Valor de la resistencia R1 para el voltaje
de los generadores electricos
float R2Voltage = 1000.0; //Valor de la resistencia R2 para el voltaje de
los generadores electricos
//Pines analogicos utilizados para sensado de corriente en ESP32
const int CorrientePanel = 32; // Entrada Corriente Panel Solar
const int CorrienteTurEjeVertical = 33; //Entrada Corriente Turbina Eje
Vertical
const int CorrienteTurbina = 34; //Entrada Corriente Turbina
//Pines analogicos utilizados para sensado de voltajes en ESP32

```



```

const
int VoltagePanel = 39; // Entrada Voltaje Panel Solar VN
const int VoltajeTurEjeVertical = 36; //Entrada voltaje turbina eje
vertical

const int VoltageTurbina = 35; //Entrada Voltaje Turbina
const int Bomba = 4; //pin de la bomba de agua
const float multiplier = 0.1875; // Escala de conversion para el ADS1115
dato que se encuentra en el datashet
float H2Curve[3] = {2.3, 0.93, -1.44}; //Valores para el calculo de ppm
para hidrogeno en base a la curva del mq8 disponible en el datashet
float Ro = 16.44; //Variable obtenida despues de calibrar el sensor mq8
const int numLecturas = 10; //constante para depurar los valores de los
sensores y reducir lecturas con ruido o erroneas
//Inicializando el funcionamiento WiFi
void setupWiFi() {

    Serial.begin(9600);
    delay(10);
    Serial.print("Conectando a la red ");
    Serial.println(ssid);

    WiFi.begin(ssid, password);

    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }

    Serial.println("");
    Serial.println("WiFi conectado");
    Serial.print("Dirección IP: ");
    Serial.println(WiFi.localIP());
}

//Metodo para reconectar el cliente MQTT en caso de perder la conexion

void reconnect() {
    while (!client.connected()) {
        Serial.print("Intentando conexión MQTT1...");
        if (client.connect("ESP32Client")) {
            Serial.println("conectado");
        } else {
            Serial.print("Error en conexión, rc=");
            Serial.print(client.state());

```



```

        Serial.println(" Intentando nuevamente en 10 segundos");
        delay(10000);
    }
}
}

//Metodo para depurar el numero de lecturas en los sensores en base a
variable numLecturas

float CorrientePromedio(int PinADC) {
    float sum = 0;
    for (int i = 0; i < numLecturas; i++) {
        int ValorADC = analogRead(PinADC);
        float VoltageADC = ValorADC * (3.3 / 4095.0);
        sum += VoltageADC;
        delay(10);
    }
    return sum / numLecturas;
}

void setup() {
    tiempoInicial = millis();
    setupWiFi(); //llama al metodo para activar el wifi
    client.setServer(mqttServer, mqttPort); // activa la funcionalidad de
cliente mqtt
    //Sensor nivel agua
    pinMode(SensorNivel, INPUT_PULLUP);
    if (!ads.begin()) {
        Serial.println("No se pudo encontrar un ADS1115, verifica la
conexión."); //rRealiza un verificacion de la conexion del sensor
analogico a digital ads1115
        while (1);
    }
    Serial.println("ADS1115 encontrado y listo.");
    //Salida para bomba
    pinMode(Bomba, OUTPUT);
    digitalWrite(Bomba, HIGH);
}

void loop() {
    if (!client.connected()) {
        reconnect();
    }
}

```



```

client.loop();

Serial.print("H2: ");
float S_Hidrogeno = MQGetGasPercentage(MQRead()/Ro,GAS_H2); // Realiza
la lectura del sensor MQ8 y lo divide
Serial.print(MQGetGasPercentage(MQRead()/Ro,GAS_H2)); //Realiza el
calculo de ppms de hidrogeno
Serial.print(" ppm\n");
if(S_Hidrogeno<70){
  S_Hidrogeno=0;
}

char StringCMQ8[10]; // Ajusta el tamaño según sea necesario del string
para almacenar la variable
dtostrf(S_Hidrogeno, 4, 2, StringCMQ8); // 2 es el total de dígitos, 4
es la cantidad de decimales
client.publish("hidrogeno/mq8", StringCMQ8); //envia el dato al
servidor mqtt con la direccion hidrogeno/panel/corriente correspondiente
a la corriente del CorrientePanel

//Obtener la corriente del panel
float LecturaCPanelADC = CorrientePromedio(CorrientePanel);
Serial.print("valor leído panel ");
Serial.println(LecturaCPanelADC);
float LecturaCPanelDiv = (LecturaCPanelADC * 1.82); //Calcula el valor
real del voltaje tomando en cuenta el divisor
Serial.println(LecturaCPanelDiv);
float CPanel = (LecturaCPanelDiv - 2.62) / 0.066; //Se resta 2,06 que
es el voltaje de base que tiene el sensor de corriente(valor encontrado
en el datashet)
Serial.print("Corriente_Panel");
Serial.println(LecturaCPanelDiv);
Serial.println(CPanel);
if(CPanel<=0){
  CPanel=0;
}

//Lectura voltaje Panel
float LecturaVPanelADC = CorrientePromedio(VoltagePanel);
float VPanel = (LecturaVPanelADC * 11.04);
Serial.print("Voltage_Panel ");
Serial.println(LecturaVPanelADC);
Serial.println(VPanel);

```



```

float PPanel = VPanel*CPanel;

char StringCPanel[10]; // Ajusta el tamaño según sea necesario del
string para almacenar la variable
dtostrf(CPanel, 2, 4, StringCPanel); // 2 es el total de dígitos, 4 es
la cantidad de decimales
client.publish("hidrogeno/panel/corriente", StringCPanel); //envia el
dato al servidor mqtt con la direccion hidrogeno/panel/corriente
correspondiente a la corriente del CorrientePanel

char StringVPanel[10]; // Ajusta el tamaño según sea necesario
dtostrf(VPanel, 2, 4, StringVPanel); // 2 es el total de dígitos, 4 es
la cantidad de decimales
client.publish("hidrogeno/panel/voltage", StringVPanel); //envia el dato
al servidor mqtt con la direccion hidrogeno/panel/voltage correspondiente
al voltaje del CorrientePanel

char StringPPanel[10]; // Ajusta el tamaño según sea necesario
dtostrf(PPanel, 2, 4, StringPPanel); // 2 es el total de dígitos, 4 es
la cantidad de decimales
client.publish("hidrogeno/panel/potencia", StringPPanel); //envia el
dato al servidor mqtt con la direccion hidrogeno/panel/voltage
correspondiente al voltaje del CorrientePanel

//Lectura de turbina EjeVertical
//Lectura Corriente turbina Eje Vertical
float LecturaCTurbinaV = CorrientePromedio(CorrienteTurEjeVertical);
float LecturaCTurbinaVDiv = (LecturaCTurbinaV * 1.858); //Calcula el
valor real del voltaje tomando en cuenta el divisor
float CTurbinaV = ( LecturaCTurbinaVDiv - 2.635) / 0.066; //Se resta
2,06 que es el voltaje de base que tiene el sensor de corriente(valor
encontrado en el datashet)
Serial.print("Corriente_entrada");
Serial.println(LecturaCTurbinaV);
Serial.print("Corriente_V");
Serial.println(LecturaCTurbinaVDiv);
Serial.print("Corriente_turbina_V");
Serial.println(CTurbinaV);
if(CTurbinaV<=0){
    CTurbinaV=0;
}
//Lectura voltaje Turbina

```



```

float
LecturaVTurbinaVertical = CorrientePromedio(VoltajeTurEjeVertical);
float VTurbinaV = (LecturaVTurbinaVertical * 11.78); //Calcula el valor
real del voltaje tomando en cuenta el divisor
Serial.print("Voltaje turbina");
Serial.println(LecturaVTurbinaVertical);
Serial.println(VTurbinaV);

float PTurbinaV = CTurbinaV * VTurbinaV;

char StringCTurbinaV[10]; // Ajusta el tamaño según sea necesario del
string para almacenar la variable
dtostrf(CTurbinaV, 2, 4, StringCTurbinaV); // 2 es el total de dígitos,
4 es la cantidad de decimales
client.publish("hidrogeno/turbinaV/corriente", StringCTurbinaV);
//envia el dato al servidor mqtt con la direccion
hidrogeno/panel/corriente correspondiente a la corriente del
CorrientePanel

char StringVTurbinaV[10]; // Ajusta el tamaño según sea necesario del
string para almacenar la variable
dtostrf(VTurbinaV, 2, 4, StringVTurbinaV); // 2 es el total de dígitos,
4 es la cantidad de decimales
client.publish("hidrogeno/turbinaV/voltage", StringVTurbinaV); //envia
el dato al servidor mqtt con la direccion hidrogeno/panel/corriente
correspondiente a la corriente del CorrientePanel

char StringPTurbinaV[10]; // Ajusta el tamaño según sea necesario del
string para almacenar la variable
dtostrf(PTurbinaV, 2, 4, StringPTurbinaV); // 2 es el total de dígitos,
4 es la cantidad de decimales
client.publish("hidrogeno/turbinaV/potencia", StringPTurbinaV); //envia
el dato al servidor mqtt con la direccion hidrogeno/panel/corriente
correspondiente a la corriente del CorrientePanel

//Lectura de turbina
//Lectura Corriente
float LecturaCTurbina = CorrientePromedio(CorrienteTurbina);
float LecturaCTurbinaDiv = (LecturaCTurbina * 1.60); //Calcula el
valor real del voltaje tomando en cuenta el divisor
float CTurbina = (LecturaCTurbinaDiv - 2.78) / 0.066; //Se resta 2,06
que es el voltaje de base que tiene el sensor de corriente(valor
encontrado en el datashet)
Serial.print("Corriente");

```



```

Serial.println(LecturaCTurbina);
Serial.println(LecturaCTurbinaDiv);
if(CTurbina<=0){
    CTurbina=0;
}
//Lectura voltaje Turbina
float LecturaVTurbina = CorrientePromedio(VoltageTurbina);
float resistencia= (R1Voltage + R2Voltage) / R2Voltage;
float VTurbina = (LecturaVTurbina * 11.76); //Calcula el valor real del
voltaje tomando en cuenta el divisor
Serial.println(LecturaVTurbina);
Serial.println(VTurbina);
Serial.println(resistencia);
float PTurbina = CTurbina * VTurbina;

char StringCTurbina[10]; // Ajusta el tamaño según sea necesario del
string para almacenar la variable
dtostrf(CTurbina, 2, 4, StringCTurbina); // 2 es el total de dígitos, 4
es la cantidad de decimales
client.publish("hidrogeno/turbina/corriente", StringCTurbina); //envia
el dato al servidor mqtt con la direccion hidrogeno/panel/corriente
correspondiente a la corriente del CorrientePanel

char StringVTurbina[10]; // Ajusta el tamaño según sea necesario del
string para almacenar la variable
dtostrf(VTurbina, 2, 4, StringVTurbina); // 2 es el total de dígitos, 4
es la cantidad de decimales
client.publish("hidrogeno/turbina/voltage", StringVTurbina); //envia el
dato al servidor mqtt con la direccion hidrogeno/panel/corriente
correspondiente a la corriente del CorrientePanel

char StringPTurbina[10]; // Ajusta el tamaño según sea necesario del
string para almacenar la variable
dtostrf(PTurbina, 2, 4, StringPTurbina); // 2 es el total de dígitos, 4
es la cantidad de decimales
client.publish("hidrogeno/turbina/potencia", StringPTurbina); //envia
el dato al servidor mqtt con la direccion hidrogeno/panel/corriente
correspondiente a la corriente del CorrientePanel

int sensorVal = digitalRead(SensorNivel);
if (sensorVal == HIGH) {
    digitalWrite(Bomba, HIGH); // Enciende el relé
    Serial.println("¡Relé Encendido!");
}

```



```

    }
else {
    digitalWrite(Bomba, LOW); // Apaga el relé (HIGH lo apaga)
    Serial.println("Relé Apagado.");
}

unsigned long tiempoActual = millis(); // Obtiene el tiempo actual

// Verifica si ha pasado 1 minuto
if (tiempoActual - tiempoInicial >= 6000) {
    // Calcula las moles de H2 producidas
    float tiempoSegundos = 60000 / 1000.0; // Convierte el intervalo a
segundos
    float corrienteTotal = CTurbinaV+CPanel+CTurbina;
    molesH2 = (corrienteTotal * tiempoSegundos) / (2 * F);
    Serial.print("corriente");
    Serial.println(corrienteTotal);
    // Muestra el resultado en el monitor serial
    Serial.print("Moles de H2 producidas en el último minuto: ");
    Serial.println(molesH2, 6); // 6 decimales de precisión

    // Reinicia el tiempo inicial para el próximo intervalo
    tiempoInicial = tiempoActual;
    char StringMoles[14]; // Ajusta el tamaño según sea necesario del
string para almacenar la variable
    dtostrf(molesH2, 3, 9, StringMoles); // 2 es el total de dígitos, 4
es la cantidad de decimales
    client.publish("hidrogeno/moles", StringMoles);
}
}

//Metodo para calcular los ppm segun datashet mq8 para hidrogeno
int MQGetGasPercentage(float rs_ro_ratio, int gas_id) {
    if (gas_id == GAS_H2) {
        return MQGetPercentage(rs_ro_ratio, H2Curve); // Realiza el calculo
de ppm en base a la curva del datashet para hidrogeno
    }
    return 0;
}

//Operacion para calculo de curva mq8
int MQGetPercentage(float rs_ro_ratio, float *pcurve) {

```



```

    return (pow(10, ((log(rs_ro_ratio) - pcurve[1]) / pcurve[2]) +
pcurve[0]));
}

//Realiza la lectura del sensor en base al MQ8 con el puerto A2 del
ADS1115
float MQRead() {
    float rs = 0;

    for (int i = 0; i < READ_SAMPLE_TIMES; i++) {
        int16_t adcValue = ads.readADC_SingleEnded(2); // Leer el canal A2
del ADS1115
        rs += MQResistanceCalculation(adcValue);
        delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
    }

    return rs / READ_SAMPLE_TIMES;
}

//Metodo para calibrar el MQ8, solo se lo realiza por una vez y luego se
ocupa el valor obtenido para Ro

float MQResistanceCalculation(int16_t adcValue) {
    // Convertir el valor ADC a voltaje

    float voltage = (adcValue * multiplier) / 1000.0; // Convertir a
voltios

    float voltage_real = (voltage*(R1Corriente20A + R2Corriente20A) /
R2Corriente20A);
    //Serial.print(voltaje); Serial.print(" Voltaje real ");
Serial.println(voltaje_real);
    // Calcular la resistencia del sensor
    return (RL_VALUE * (3.3 - voltage_real) / voltage_real); // 3.3V es el
voltaje de alimentación
}

}

```

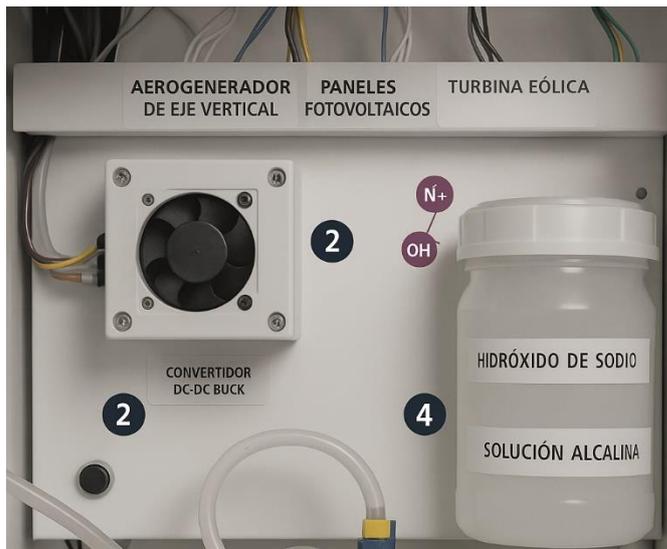


### B. Secciones del modulo

A continuación, se presenta la primera sección que consta de la conexión a los fusibles correspondiente a las entradas positivas de cada una de las fuentes renovables fotovoltaicas y eólicas.



La segunda sección constante de la implementación de convertidor DC-DC BUCK y del embalse de la solución alcalina.

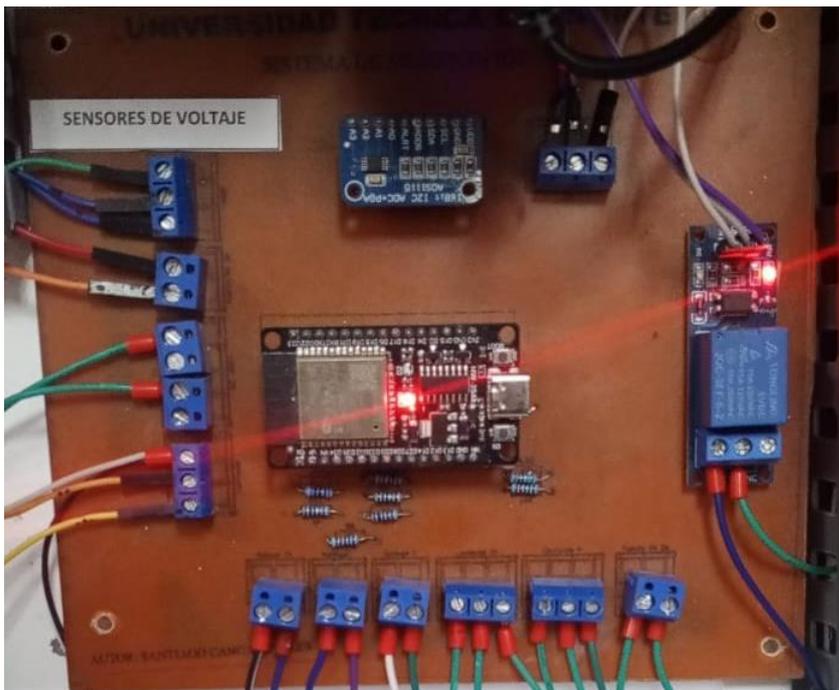




La tercera sección hace referencia a la posición del electrolizador, burbujeador y la probeta que corresponde a la medición visual.



Placa de monitoreo





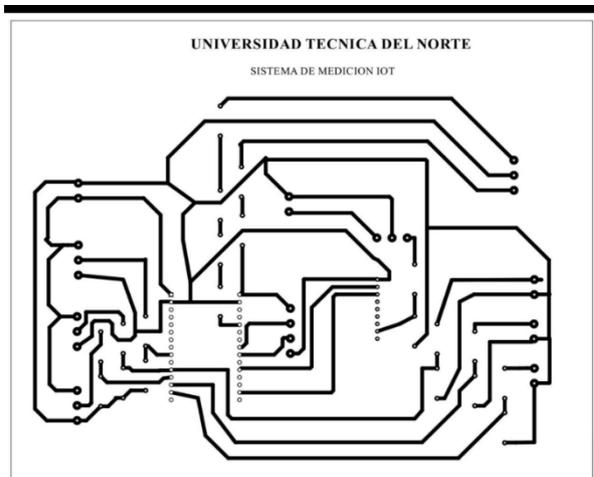
**C. Ubicación del módulo**

En la imagen se presenta la ubicación exacta en el laboratorio de máquinas eléctricas

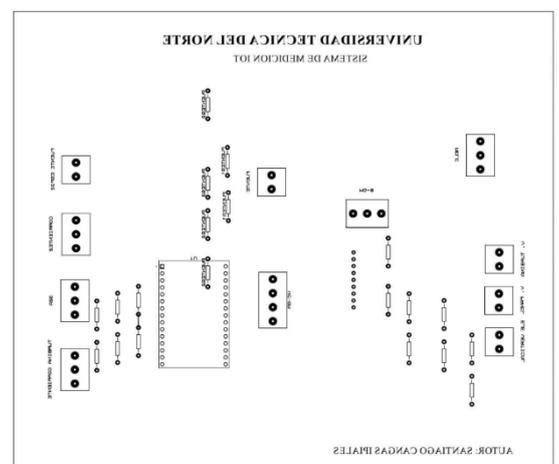


**E. Fotos del procedimiento:**

**Circuito del sistema IoT**



**Mascara de componentes.**





Elaboración del electrolizador alcalino:



Probeta para medición visual de H<sub>2</sub>

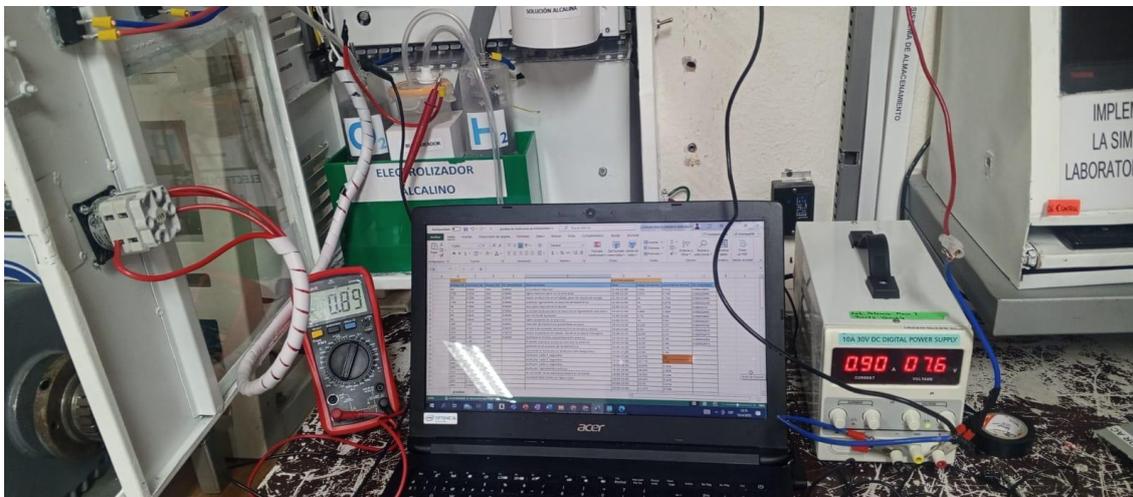


Montaje del sistema de electrólisis alcalina dentro del módulo de medición IoT

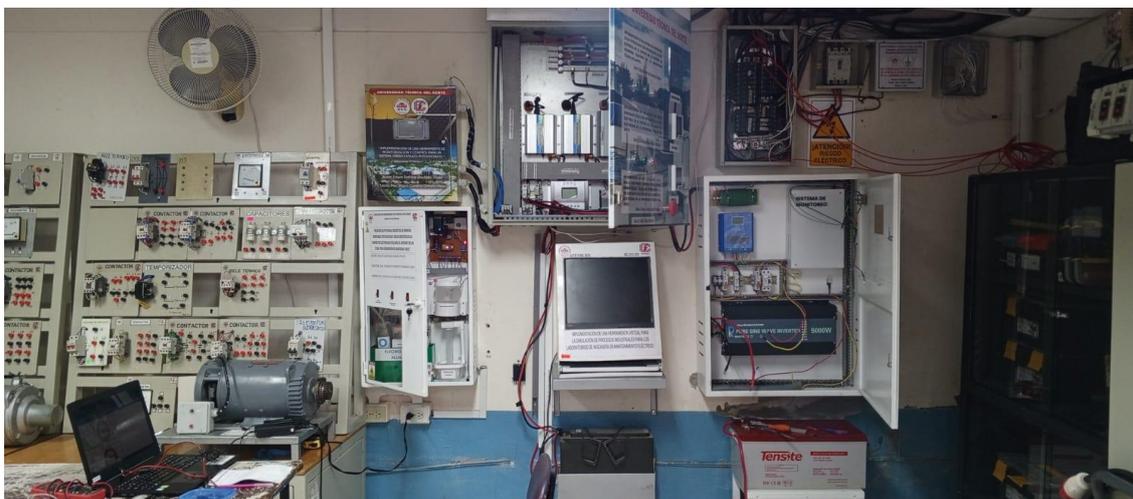




Pruebas de funcionamiento y registro de datos



Pruebas con conexión al tablero principal de las fuentes de energías renovables





# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



### MANUAL DE USUARIO DEL MODULO DEL TRABAJO DE GRADO:

MEDICIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE ENERGÍAS RENOVABLES FOTOVOLTAICA Y EÓLICA EXISTENTES EN LA CARRERA DE ELECTRICIDAD UTILIZANDO EL INTERNET DE LAS COSAS PARA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE.

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

#### AUTOR :

Darwin Santiago Cangás Ipiales

#### DIRECTOR :

MSc. Francisco Roberto Naranjo Cobo

Ibarra- Ecuador, 2025



**Tabla de contenido de manual de usuario**

Objetivo General .....	155
Introducción.....	155
Equipos y Materiales.....	156
Ubicación del modulo .....	156
1 Procedimiento de Uso.....	157
1.1 Encender el módulo principal.....	157
1.2 Raspberry pi 3B .....	158
1.3 Sensores de corriente:.....	158
1.4 Ventilación forzada.....	158
1.5 Placa de monitoreo .....	160
1.6 Verificación previa .....	160
1.7 Ingreso a Nod Red: .....	161
1.8 Visualización de voltaje y corriente generado de cada fuente renovable. ....	162
1.9 Visualización de generación de hidrógeno .....	163
2. Procedimiento de Apagado del Módulo.....	164
2.1 Apagar el sistema de electrólisis: .....	164
2.2 Ubicar en la posición OFF los interruptores de las fuentes renovables:.....	164
2.3 Apagar le interruptor general:.....	164



## **Objetivo General**

Explicar el uso correcto del módulo desarrollado para medir los parámetros eléctricos (voltaje, corriente) de fuentes renovables y gestionar la producción de hidrógeno mediante electrólisis alcalina, transmitiendo los datos vía IoT para su visualización en Node-RED.

## **Introducción.**

El módulo desarrollado consiste en un sistema IoT para la medición y control de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis alcalina.

Su propósito es monitorear en tiempo real los parámetros eléctricos (voltaje y corriente) de fuentes renovables como paneles solares y turbinas eólicas, utilizando sensores específicos (ACS712 y divisores ubicados en la placa de monitoreo y gestionar el proceso de generación de hidrógeno a partir de agua destilada con electrolito (NaOH). El sistema se basa en el microcontrolador ESP32, que recolecta los datos de medición y los transmite a través del protocolo MQTT hacia un servidor local Node-RED instalado en una Raspberry Pi 3B, donde se visualizan los datos de manera gráfica.

Además, el módulo incluye un sistema automático de gestión de nivel de agua con bomba y sensor, y un burbujeador de seguridad para filtrar e impedir retrocesos peligrosos del gas de hidrógeno generado.

Entre las principales funciones están:

- Medición de corriente y voltaje en las fuentes renovables.
- Estimación de producción de hidrógeno basado en los parámetros eléctricos.
- Control automático del nivel de agua en el electrolizador.
- Seguridad activa mediante burbujeador de gas.
- Visualización de datos en una plataforma Node red.



### Equipos y Materiales.

- ESP32 (Microcontrolador)
- Raspberry Pi 3B (Servidor de datos)
- 3 Sensor de corriente ACS712
- Divisor de tensión para medición de voltaje
- Sensor de gas MQ-8
- Sistema de electrólisis con celdas de acero inoxidable 304
- Embalse de solución alcalina
- Burbujeador de seguridad
- Mini bomba de agua y sensor de nivel

### Ubicación del módulo

Módulo de trabajo de grado esta ubica en el edificio de la carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte, en los laboratorios de máquinas eléctricas



*Ilustración 1 posición del módulo en el laboratorio de máquinas eléctricas*



Identificación de los elementos del módulo:



Ilustración 2 módulo de trabajo de grado

**Procedimiento de Uso**

**1.1 Encender el módulo principal.**

Accionar el interruptor general es el primer paso para encender el Módulo, esta acción permitirá energizar las 3 fuentes que alimentan el Raspberry pi3B, la placa de monitoreo, los 2 ventiladores que corresponden a la ventilación forzada y el sensor de gas hidrógeno Mq8 ubicado en la parte inferior derecha del electrolizador.



Ilustración 3 interruptor general



## 1.2 Raspberry pi 3B

La Raspberry Pi 3B cumple la función de servidor local de procesamiento, almacenamiento y visualización de datos dentro del sistema IoT desarrollado. Recibe los datos enviados por el microcontrolador ESP32 a través del protocolo MQTT, los procesa utilizando la plataforma Node-RED y permite su visualización en tiempo real mediante dashboards interactivos.



Ilustración 4 Raspberry pi3B

## 1.3 Sensores de corriente:

Los tres sensores de corriente ACS712 permiten medir el flujo de corriente que entregan los paneles solares y las turbinas eólicas hacia el sistema. Su función es capturar datos precisos de consumo y generación eléctrica en tiempo real. Estos valores son esenciales para calcular la eficiencia energética y estimar la producción de hidrógeno en el proceso de electrólisis.

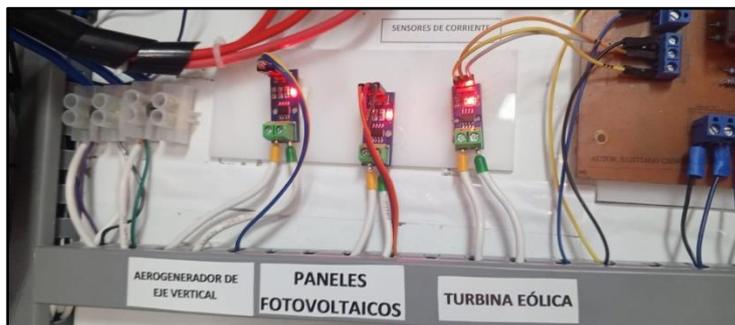


Ilustración 5 sensores de corriente ACS712

## 1.4 Ventilación forzada

La ventilación forzada tiene la función de hacer circular constantemente el aire en el área de operación del electrolizador, evitando la acumulación de gas hidrógeno que, por su alta inflamabilidad, podría representar un riesgo de explosión. Además, ayuda a



mantener una temperatura adecuada en los componentes electrónicos y eléctricos, mejorando la seguridad y la eficiencia del sistema.



Ilustración 6 ventilador del convertidor Buck



Ilustración 7 ventilador general

Se toma en cuenta que los ventiladores son energizados con un convertidor Boost el mismo que fue calibrado a una salida de 12V con una entrada de 5V proveniente de la fuente alimentación del sensor de medición de gas hidrógeno MQ8.

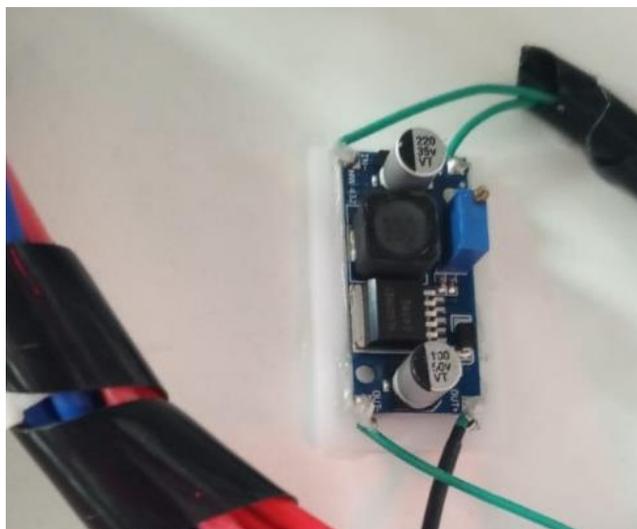


Ilustración 8 convertidor boost



### 1.5 Placa de monitoreo

La placa de monitoreo tiene la función de capturar, procesar y enviar los datos eléctricos de voltaje y corriente medidos en las fuentes renovables hacia el microcontrolador ESP32. Permite realizar lecturas estables y precisas, protegiendo los sensores y mejorando la fiabilidad de la transmisión de datos para la supervisión y control de la producción de hidrógeno.

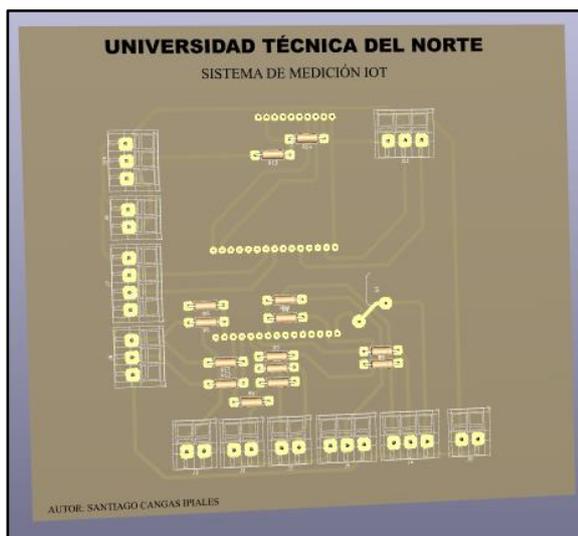
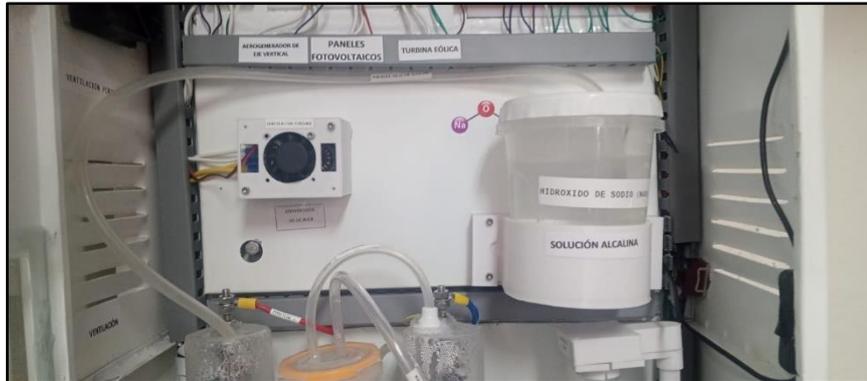


Ilustración 9 placa de monitoreo

### 1.6 Verificación previa

Asegurar una buena conexión Wi-Fi. Ya que Raspberry pi3B se conectará automáticamente a la red verificar que el embalse este siempre el embalse con solución alcalina adecuada (agua destilada + NaOH) y verificar niveles de agua del burbujeador con agua destilada debe estar sumergida la manguera proveniente del cátodo importante para purificar el gas.



*Ilustración 10 embalse de solución alcalina*



*Ilustración 11 nivel de agua del electrolizador*

## 1.7 Ingreso a Node Red:

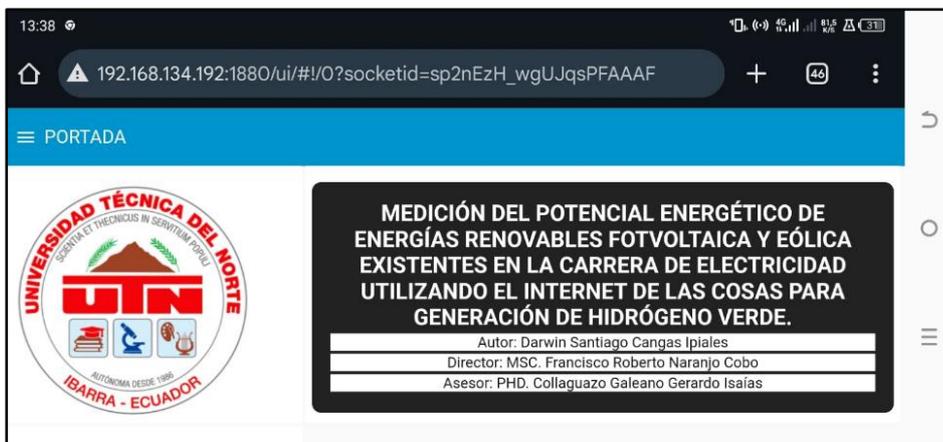
Para acceder a Node-RED, se debe ingresar desde un navegador web escribiendo la dirección IP local de la Raspberry Pi 3B seguida del puerto asignado, generalmente :1880. Por ejemplo:

<http://192.168.134.192:1880>

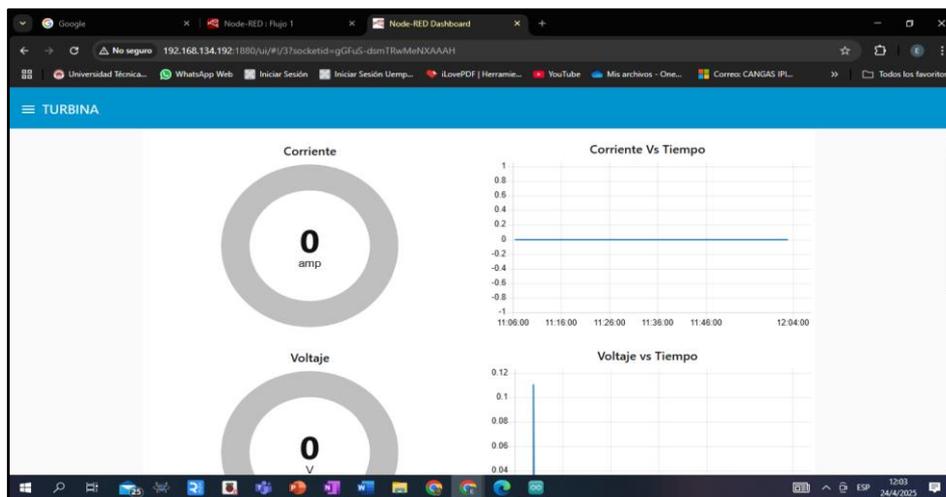


Una vez en la interfaz de Node-RED, el usuario puede visualizar los flujos de datos en tiempo real, configurar nuevos procesos de monitoreo o revisar los registros históricos de voltaje, corriente y producción de hidrógeno.

El acceso puede ser desde una computadora o un celular.



*Ilustración 12 ingreso a Nod Red desde el celular*



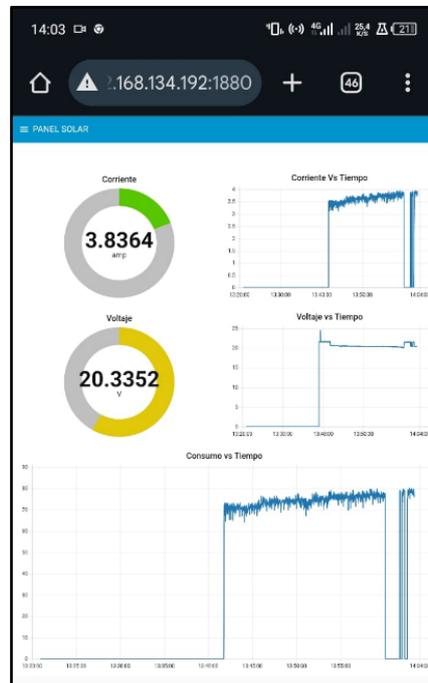
*Ilustración 13 ingreso a Nod Red desde computadora*

### 1.8 Visualización de voltaje y corriente generado de cada fuente renovable.

Para las respectivas visualizaciones de la generación renovable del momento, una vez ingresado a Nod Red se procede a encender los interruptores de los fuentes renovables



ya sea de independientemente o tocas al mismo tiempo, a continuación se presenta la información al activar los paneles solares, y el electrolizador.



*Ilustración 14 funcionamiento del electrolizador con paneles solares*

## 1.9 Visualización de generación de hidrógeno

La visualización de la generación de hidrógeno se realiza mediante un flujo programado en Node-RED, donde se muestran en tiempo real los valores medidos de voltaje y corriente de las fuentes renovables, junto con la cantidad estimada de hidrógeno producido. Esta información se presenta en gráficos dinámicos y paneles de control que permiten analizar el comportamiento del sistema, identificar tendencias y evaluar la eficiencia de la producción de hidrógeno verde de manera sencilla y accesible.

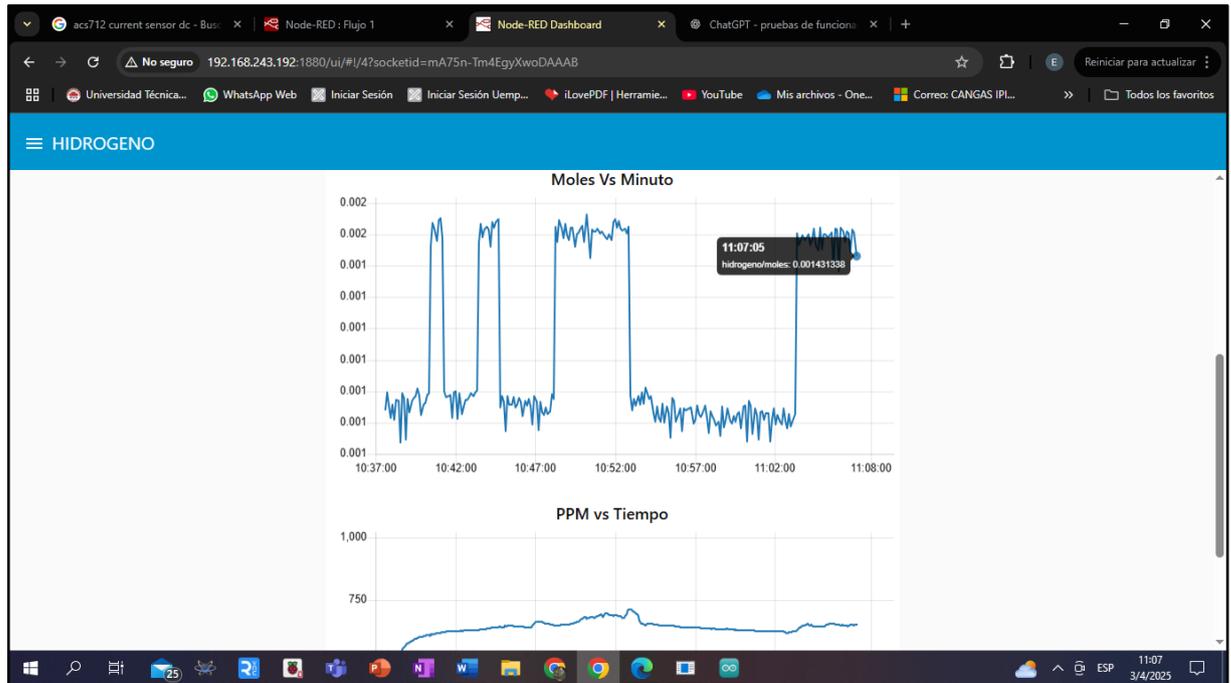


Ilustración 15 monitoreo de generación de hidrógeno

## 2. Procedimiento de Apagado del Módulo

Para desconectar el módulo se procede a ubicar el selector en la posición cero si se estaba usando el electrolizador posteriormente apagar los interruptores de las fuentes renovables y finalmente apagar el interruptor general, que desconectara todo el sistema IoT, a continuación, se detalla el paso a paso:

### 2.1 Apagar el sistema de electrólisis:

- Ubicar en la posición cero el selector.
- Verificar que no se estén generando burbujas de hidrógeno.

### 2.2 Ubicar en la posición OFF los interruptores de las fuentes renovables:

- Asegurarse que los tres interruptores estén en la posición de apagado.

### 2.3 Apagar le interruptor general:

- Asegurarse que todo el sistema IoT este apagado.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



### MANUAL TÉCNICO DEL MODULO DEL TRABAJO DE GRADO:

MEDICIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE ENERGÍAS RENOVABLES FOTOVOLTAICA Y EÓLICA EXISTENTES EN LA CARRERA DE ELECTRICIDAD UTILIZANDO EL INTERNET DE LAS COSAS PARA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE.

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

**AUTOR :**

Darwin Santiago Cangás IpiALES

**DIRECTOR :**

Ing. Francisco Roberto Naranjo Cobo MSc.



Objetivo General .....	167
Objetivo Específicos .....	167
Introducción .....	167
1 Procedimiento y análisis de datos .....	167
1.1 Configuración del raspberry pi3B+ .....	168
1.2 Preparación Raspberry .....	170
1.3 Instalación de Node Red.....	170
1.4 Instalación de broker MQTT .....	172
2 Diagnóstico de fallas comunes .....	173
2.1 Detección de falla.....	173
2.2 Error en conexión MQTT .....	174
2.3 IP de la red.....	174
2.4 Error detección del ADS115.....	175
2.5 Nivel de agua bajo en el burbujeador.....	175
2.6 nivel de agua del electrolizador.....	176
3 Procedimiento de mantenimiento preventivo: .....	177
3.1 Revisión de Conexiones Eléctricas.....	177
3.2 Mantenimiento de Electrolizador.....	177
3.4 Procedimiento seguro para desechar solución de NaOH .....	178
4 Seguridad .....	178



### **Objetivo General**

Desarrollar y mantener en condiciones óptimas el sistema IoT de monitoreo y producción de hidrógeno verde mediante electrólisis alcalina, asegurando su funcionamiento continuo, seguro.

### **Objetivo Específicos**

1. Establecer procedimientos técnicos de diagnóstico y solución de fallas en los sensores, microcontroladores y subsistemas del módulo.
2. Definir protocolos de mantenimiento preventivo para prolongar la vida útil de los componentes y garantizar la estabilidad operativa del sistema.
3. Implementar normas de seguridad para el manejo adecuado de soluciones alcalinas, componentes electrónicos y gases generados en el proceso de electrólisis.

### **Introducción**

Este manual técnico está diseñado para guiar en el diagnóstico, mantenimiento y operación segura del sistema IoT para la producción de hidrógeno verde. El sistema integra tecnologías de medición de parámetros eléctricos, transmisión de datos, electrólisis alcalina y almacenamiento de datos locales mediante plataformas abiertas como Node-RED y Raspberry Pi 3B. Este documento proporciona directrices claras para solucionar posibles fallas, realizar mantenimientos preventivos, y adoptar medidas de seguridad que permitan una operación continua y eficiente

## **1 Procedimiento y análisis de datos**

Instalación Raspbian (Raspberry Pi OS ):

Para la instalación de raspbian se debe tomar en cuenta los materiales necesarios los cuales son:



- Raspberry Pi
- Memoria SD

Una vez tenemos los materiales nos dirigimos a la página de descarga en donde tendremos que descargar el programa Raspberry pi imager que se muestra en la Figura 1. Con el link de descarga <https://www.raspberrypi.com/software/>

Se procede a descarga de Raspberry pi imager una vez descargado se procede a insertar la memoria sd en la maquina y arrancar el programa como se muestra en la figura 14.

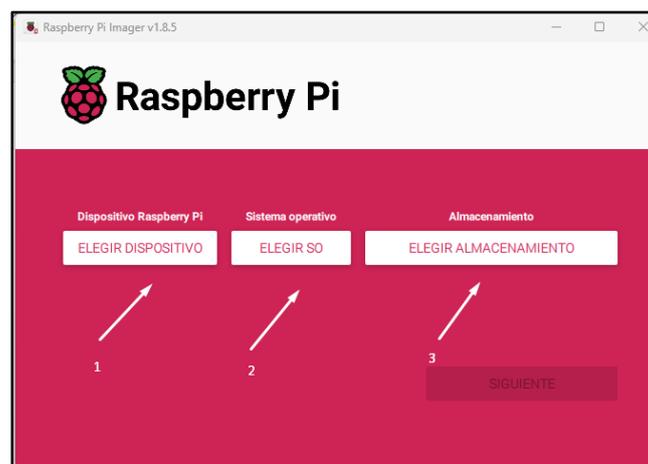
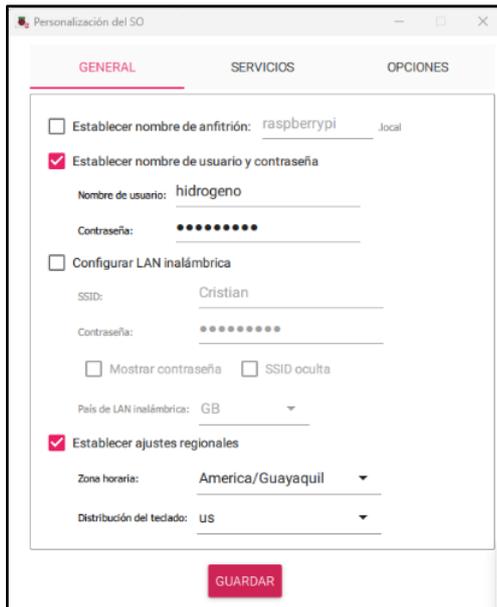


Figura23.- Interfaz Raspberry pi imager

Se selecciona el dispositivo en este caso raspberry pi 3 b, luego el sistema operativo en este caso raspbian y el almacenamiento la sd que tenemos insertada en la computadora.

Una vez seleccionado se presiona siguiente y se configura todo lo que se refiere a configuraciones por defecto del sistema Figura15.

### 1.1 Configuración del raspberry pi3B+



*Ilustración 16 configuraciones iniciales*

En este caso el usuario será hidrógeno y la contraseña hidrogeno, además se puede configurar la zona horaria en este caso Guayaquil y la red inalámbrica, luego también se puede configurar de manera manual se selecciona guardar y empieza el proceso de grabado del sistema en la sd, Figura 16



*Figura25.- Preparación del Raspberry Pi3B*



## 1.2 Preparación Raspberry

Es necesario tener la tarjeta micro sd para la instalación de OS y se hará uso de un raspberry pi 3 B+



Figura27.- Combo completo de Raspberry pi3b+

Se procede a conectar los inhibidores de calor como se muestra en la Figura 18.



Figura29.- Raspberry con inhibidores de calor

Una vez preparado se conecta la fuente de alimentación y el cable HDMI a un monitor para realizar la configuración inicial en donde se procederá a habilitar ciertas opciones.

## 1.3 Instalación de Node Red

En el terminal se procede a ingresar el siguiente comando que instalara las dependencias requeridas para node red y también node red:



En la Figura 17 se muestra la introducción del comando y su posterior instalación.

```

hidrogeno@raspberrypi: Node-RED update
Running Node-RED update for user hidrogeno at /home/hidrogeno on debian

This can take 20-30 minutes on the slower Pi versions - please wait.

Stop Node-RED
Remove old version of Node-RED
Remove old version of Node.js
Install Node.js 20 LTS
Clean npm cache
Install Node-RED core
Move global nodes to local
Npm rebuild existing nodes
Install extra Pi nodes
Add shortcut commands
Update systemd script

Any errors will be logged to /var/log/nodered-install.log

```

Ilustración 17 Instalación de Node red en Raspberry pi3B

Una vez instalado Node red se procede a habilitar el servicio al arranque por medio del siguiente comando:

```
sudo systemctl enable nodered.service
```

Una vez instalado se procede a ingresar al navegador por medio de la dirección IP del servidor raspberry la cual se puede ver en la Figura18 usando el comando:

```

hidrogeno@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
hidrogeno@raspberrypi:~$ ip addr
1: lo: <LOOPBACK,UP,LOWER_UP> mtu 65536 qdisc noqueue state UNKNOWN group default
   link/loopback 00:00:00:00:00:00 brd 00:00:00:00:00:00
   inet 127.0.0.1/8 scope host lo
       valid_lft forever preferred_lft forever
   inet6 ::1/128 scope host noprefixroute
       valid_lft forever preferred_lft forever
2: eth0: <NO-CARRIER,BROADCAST,MULTICAST,UP> mtu 1500 qdisc pfifo_fast state DOWN group default qlen 1000
   link/ether b8:27:eb:34:dd:58 brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
3: wlan0: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc pfifo_fast state UP group default qlen 1000
   link/ether b8:27:eb:61:88:0d brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
   inet 192.168.0.110/24 brd 192.168.0.255 scope global dynamic noprefixroute wlan0
       valid_lft 6255sec preferred_lft 6255sec
   inet6 fe80::8feb:523b:2f04:4b50/64 scope link noprefixroute
       valid_lft forever preferred_lft forever
hidrogeno@raspberrypi:~$

```

Figura31.- Ingreso del comando ip addr



Una vez realizado se ingresa en el navegador la ip y podemos acceder al interfaz de node red como se observa en la Figura 12. Para este caso 192.168.0.110:

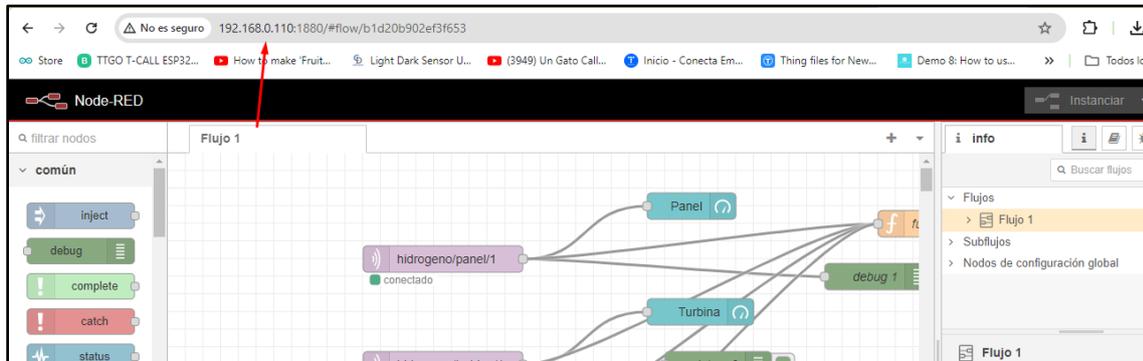


Figura32.- Interfaz Node Red

### 1.4 Instalación de broker MQTT

Es necesario instalar un bróker mqtt que para fines prácticos será mosquito esto se lo realiza por medio del siguiente proceso, primero ingresamos el siguiente comando en el terminal:

**sudo apt install mosquitto mosquitto-clients**

Como se muestra en la Figura 13 se ingresa el comando:

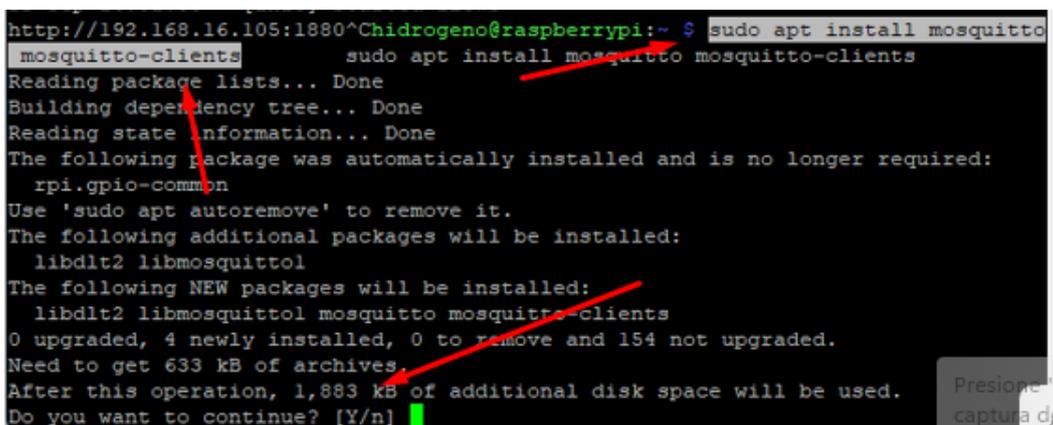


Ilustración 18 Instalación Mosquito bróker mqtt



## 2 Diagnóstico de fallas comunes

A continuación, se describen las posibles falas que puede llegar a suceder y como resolverlas.

### 2.1 Detección de falla

Con ayuda de la programación pre subida al microcontrolador ESP32 indicara la falla presente en el monitor serial.

Proceder a conectar el ESP32 mediante un cable USB de la placa de monitoreo a una computadora con ARDUINO.IDE.

programacion\_\_tesis | Arduino IDE 2.3.5

Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda

DOIT ESP32 DEVKIT V1

```

programacion__tesis.ino
57 const int VoltajeTurEjeVertical = 36; //Entrada voltaje turbina eje vertical
58 const int VoltageTurbina = 35; //Entrada Voltage Turbina

```

Salida Monitor Serie X

Mensaje (Intro para mandar el mensaje de 'DOIT ESP32 DEVKIT V1' a 'COM8')

Nueva línea 9600 baud

```

corriente1.42
Moles de H2 producidas en el último minuto: 0.000441
H2: 627 ppm
valor leído panel 1.42
2.59
Corriente_Panel2.59
0.71
Voltage_Panel 0.00
0.00
Corriente_entrada1.40
Corriente_V2.60
Voltage turbina0.00
0.00
Corriente1.66

```

Ilustración 19 monitor serial

Seleccionar el dispositivo: DOIT ESP32 DEVKIT V1

Abrir el monitor serial y observar la falla que impide el normal funcionamiento ya que el código tiene integrado un sistema de detección de posibles fallas para continuar con el funcionamiento correcto.



## 2.2 Error en conexión MQTT

El programa intentara conectarse cada 10 segundos. Al no lograr conectarse se debe verificar el IP de la red en la que se está conectado .



Ilustración 20 intento de conexión MQTT

## 2.3 IP de la red.

Para observar la IP de la red hay dos opciones conectando el Raspberry pi3B a un monitor mediante un cable HDMI , conectar un mouse y un teclado externo al Raspberry pi3B. y conectar a una red Wifi conocida y observar su IP.



Ilustración 21 IP de la red



Copiar el IP en el código de Arduino y cargarlo en el microcontrolador ESP32

```

16
17 const char* ssid = "Santiago"; //Nombre de la red de wifi local a la que se conectara el raspberry
18 const char* password = "123456788"; //Clave de la red wifi local
19 const char* mqttServer = "192.168.134.192"; //Direccion ip que tiene el raspberry dentro de la red local
20 const int mqttPort = 1883; //Puerto de conexion para el servidor mqtt
21 const float F = 96485.0; // Constante de Faraday (C/mol)
22 unsigned long tiempoInicial = 0; // Almacena el tiempo inicial
23 float molesH2 = 0.0; // Moles de H2 producidas
~^

```

Ilustración 22 ingresar el IP en la línea de código 19

Solución: copiar el nuevo IP en la programación, compilar y subir el código al ESP32.

## 2.4 Error detección del ADS115

En el monitor serial debe aparecer si el convertidor ACD “ ADS115 encontrado y listo” entonces se procederá al siguiente proceso, como se indica en la imagen a continuación.

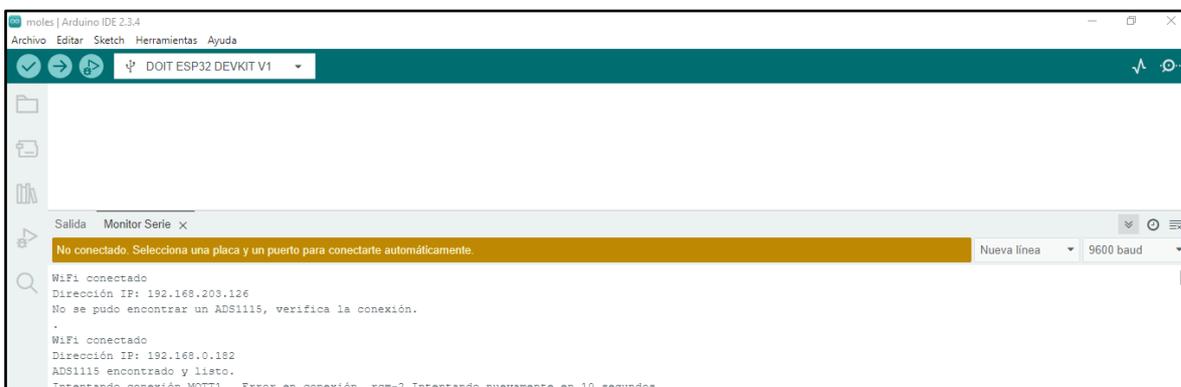


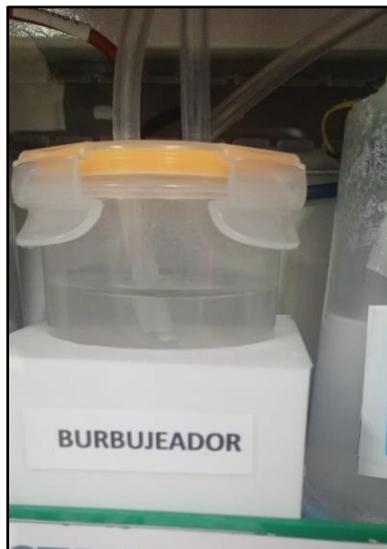
Ilustración 23 mensaje de correcta conexión ADS115

Si el mensaje por lo contrario indica que el conversor analógico digital no fue encontrado esto quiere decir que hay un Fallo en cableado

Solución : Revisar conexiones y reemplazar ADS115 si es necesario.

## 2.5 Nivel de agua bajo en el burbujeador

El burbujeador actúa como una barrera de seguridad contra retrocesos de llama y para filtrar impurezas del gas hidrógeno



*Ilustración 24 burbujeador*

Si el nivel de agua en el burbujeador baja:

Problemas que puede causar:

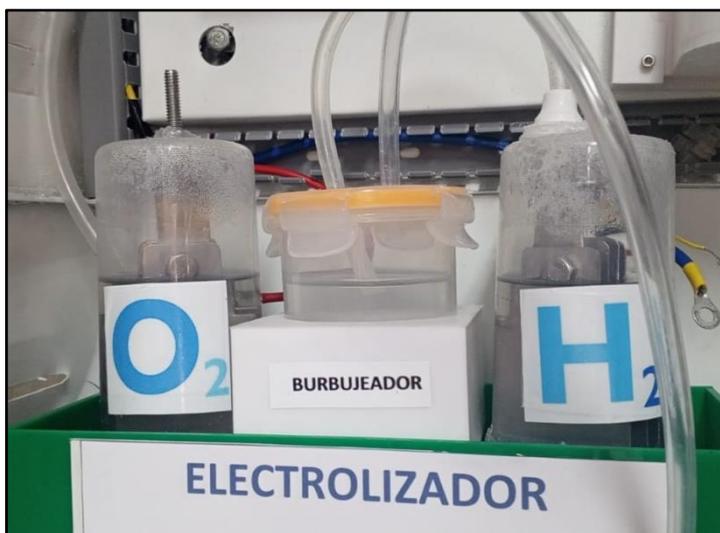
- Pérdida de la protección contra retrocesos de llama (peligro de explosión).
- Disminución de la filtración de impurezas en el hidrógeno.
- Salida libre de gas sin control ni resistencia.

Solución:

- Detener la producción de hidrógeno de inmediato.
- Rellenar el burbujeador con agua destilada hasta alcanzar el nivel adecuado, cubriendo la entrada del tubo de hidrógeno al menos 2–3 cm bajo el agua.

## 2.6 nivel de agua del electrolizador

El electrolizador necesita mantener un volumen constante de agua con electrolito para garantizar la eficiencia de la electrólisis.



*Ilustración 25 nivel de agua correcto del electrolizador*

Problemas que puede causar:

- Reducción de la producción de hidrógeno y oxígeno.
- Sobrecalentamiento de las placas electrolíticas (por falta de contacto adecuado con el agua).
- Riesgo de daños en los electrodos.

Solución:

- Activar el sistema automático de recarga (bomba de embalse) si existe.

### **3.- Procedimiento de mantenimiento preventivo:**

#### **3.1 Revisión de Conexiones Eléctricas**

- Inspeccionar todos los cables de conexión de los sensores ACS712, divisores de tensión, MQ-8 y conexiones al ESP32.
- Verificar que no existan cables sueltos, pelados o sulfatados.
- Ajustar y reemplazar conectores dañados o sueltos.
- Confirmar continuidad de líneas eléctricas con multímetro

#### **3.2 Mantenimiento de Electrolizador**



- Apagar completamente el módulo antes de realizar cualquier tipo de mantenimiento.
- Retirar la manguera del electrolizador.
- Desconectar el cableado que llega al electrolizador como son: el cátodo el cable negativo como se indica en su etiquetado lo mismo con el positivo que conecta al ánodo del electrolizador, y las conexiones de la bomba de agua.
- Retirar el electrolizador del módulo y el burbujeador.
- Acumular el agua del electrolizador en un recipiente plástico posteriormente mezclar con vinagre para neutralizar el pH.
- Retirar los electrodos
- Verificar que no presenten corrosión o deformaciones físicas.
- Limpiar los electrodos y el embace manualmente con agua destilada y un cepillo de cerdas suaves para eliminar residuos sólidos o incrustaciones.

### 3.4 Procedimiento seguro para desechar solución de NaOH

- En el electrolizador existe 2 litros de agua destilada con 80 g de NaOH.
- Neutralizar lentamente con vinagre blanco usando aproximadamente 300–400 ml de vinagre.
- Confirmar pH cercano a 7 con cintas detectoras de ph.
- Desechar con abundante agua en el desagüe común.

### 4.- Seguridad

- Uso obligatorio de guantes y gafas al manipular NaOH.
- Supervisar posibles fugas de gas hidrógeno.
- Ventilar adecuadamente el área de operación.
- Neutralizar adecuadamente soluciones de NaOH antes de su eliminación.