



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO  
FUNCIONANDO CON MEZCLAS ENRIQUECIDAS EN OXÍGENO E HIDRÓGENO  
OBTENIDOS MEDIANTE ELECTRÓLISIS DEL AGUA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Automotriz

**AUTORES: MILTON DAVID BASTIDAS MOLINA**  
**KEVIN MAURICIO CHAUCA SUNTAXI**  
**TUTOR: CARLOS DAVID ÁLVAREZ BASANTES**

Quito - Ecuador

2022

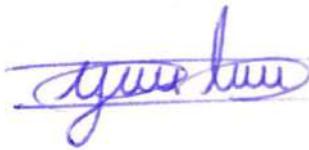
## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Milton David Bastidas Molina con documento de identificación N° 1718321035 y Kevin Mauricio Chauca Sntaxi con documento de identificación N° 1722243951 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 22 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Milton David Bastidas Molina

1718321035



---

Kevin Mauricio Chauca Sntaxi

1722243951

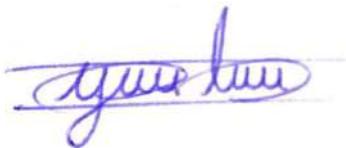
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Milton David Bastidas Molina con documento de identificación N° 1718321035 y Kevin Mauricio Chauca Suntaxi con documento de identificación N° 1722243951, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Análisis termodinámico de un motor de encendido provocado funcionando con mezclas enriquecidas en oxígeno e hidrógeno obtenidos mediante electrólisis del agua”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Automotrices, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Quito, 22 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Milton David Bastidas Molina

1718321035



Kevin Mauricio Chauca Suntaxi

1722243951

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos David Álvarez Basantes con documento de identificación N° 0604240796, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UN MOTOR DE ENCENDIDO PROVOCADO FUNCIONANDO CON MEZCLAS ENRIQUECIDAS EN OXÍGENO E HIDRÓGENO OBTENIDOS MEDIANTE ELECTRÓLISIS DEL AGUA, realizado por Milton David Bastidas Molina con documento de identificación N° 1718321035 y Kevin Mauricio Chauca Suntaxi con documento de identificación N° 1722243951, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción: Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 22 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Ing. Carlos David Álvarez Basantes, Msc  
0604240796

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo lo queremos dedicar a las personas que, en transcurso de nuestros años de estudios, nos brindaron respaldo y apoyo para poder llegar a estas instancias de nuestra carrera, en especial queremos mencionar a nuestros padres quienes fueron las principales fuentes de inspiración para poder superar las adversidades día tras día con su amor, paciencia y esfuerzo pudimos llegar a cumplir nuestro sueño.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradecemos a Dios, quien nos bendijo con sabiduría, salud y energía todos los días a cada uno de nuestros compañeros docentes y familiares.

A nuestras familias por habernos apoyado en esta decisión, ya que fueron los pilares para no rendirnos y salir adelante con este sueño que se está realizando.

A la universidad y sus educadores quienes nos supieron instruir y formar profesionales de excelencia a lo largo de nuestra estadía en las aulas, talleres y patios. A nuestro tutor, quien con paciencia y su rectitud como docente nos ha guiado en este último peldaño para conseguir nuestra meta.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
PROBLEMA.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos .....	4
CAPÍTULO 1.....	5
1.  MARCO TEÓRICO .....	5
1.1  El oxígeno .....	5
1.2  El hidrógeno.....	5
1.3  Propiedades del hidrógeno.....	6
1.3.1  Poder calorífico.....	6
1.3.2  Punto de inflamabilidad.....	7
1.3.3  Rango de inflamabilidad.....	8
1.3.4  Temperatura de autoignición.....	9
1.4  Electrolisis del agua .....	10
1.5  El oxihidrógeno H(OH) .....	11
1.5.1  Aplicación del oxihidrógeno en motores de combustión interna .....	12
CAPÍTULO 2.....	13
2.  ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA SELECCIÓN DE MATERIALES EN CELDAS DE HIDRÓGENO.....	13
2.1  Celdas electrolíticas .....	13
2.1.1  Celda alcalina .....	13
2.1.2  Celda membrana de intercambio protónico PEM.....	14
2.1.3  Celda membrana de intercambio aniónico (AEM).....	15
2.1.4  Celda óxido sólido.....	16

2.1.5	Celda húmeda.....	18
2.1.6	Celda seca.....	19
2.2	Diseño de la celda seca de hidrógeno.....	21
2.2.1	Diseño de partes y piezas de la celda seca de hidrógeno en inventor.....	21
CAPÍTULO 3.....		25
3.	ESTUDIO DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO APLICADA EN UN VEHÍCULO CITROEN C-ELYSEE.....	25
3.1	Pruebas en el laboratorio.....	25
3.1.1	Montaje de un sistema generador de hidrógeno.....	25
3.1.2	Equipos utilizados durante las pruebas de laboratorio.....	26
3.1.3	Procedimiento para preparación de solución acuosa.....	28
3.1.4	Ensayos realizados para la obtención de oxihidrógeno.....	30
3.2	Pruebas en el vehículo.....	32
3.2.1	Instalación de un sistema generador de gas oxihidrógeno en el vehículo.....	32
3.2.2	Análisis de gases.....	34
3.2.3	Prueba en ruta (descripción prueba de ruta).....	35
3.3	Pruebas sobre dinamómetro de chasis.....	39
3.3.1	Equipos utilizados durante las pruebas de dinamómetro de chasis.....	39
3.3.2	Procedimiento realizado para la toma de datos en el rodillo inercial.....	41
CAPÍTULO 4.....		44
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	44
4.1	Resultados de pruebas de laboratorio análisis sobre ciclo otto convencional.....	44
4.1.1	Prueba con una solución de hidróxido de potasio de 6,493g.....	45
4.1.2	Prueba con una solución de hidróxido de potasio de 7.173 g.....	46
4.2	Resultados de las pruebas sobre el vehículo.....	48
4.2.1	Pruebas en el analizador de gases.....	48
4.2.2	Pruebas en ruta.....	50

4.3	Resultados de las pruebas en el dinamómetro .....	51
4.3.1	Pruebas de torque y potencia .....	51
4.3.2	Comparación de resultados de torque y potencia .....	53
	CONCLUSIONES .....	55
	RECOMENDACIONES .....	56
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
	ANEXOS .....	62
	Anexo 1.....	62
	Anexo 2.....	63
	Anexo 3.....	70
	Anexo 4.....	77
	Anexo 5.....	84
	Anexo 6.....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Rangos de inflamabilidad.....	8
Figura 1.2: Electrólisis.....	10
Figura 2.1: Electrolizador alcalino .....	14
Figura 2.2: Diagrama de disposición electrolizar PEM.....	15
Figura 2.3: Diagrama de disposición electrolizador tipo AEM.....	16
Figura 2.4: Diagrama de disposición electrolizador tipo SOWE .....	17
Figura 2.5: Batería de ácido sólido .....	19
Figura 2.6: Diagrama de disposición.....	19
Figura 2.7: Diseño de celda seca de hidrógeno .....	21
Figura 2.8: Placa de electrodo .....	22
Figura 2.9: Placa neutra .....	22
Figura 2.10: Aislante .....	23
Figura 2.11: Cubiertas de la celda .....	23
Figura 2.12: Elementos de sujeción.....	24
Figura 3.1: Montaje de sistema de oxihidrógeno .....	25
Figura 3.2: Fuente de alimentación corriente continua .....	26
Figura 3.3: Balanza analítica digital .....	27
Figura 3.4: Balanza analítica .....	27
Figura 3.5: Balanza de precisión .....	28
Figura 3.6: Peso de hidróxido de potasio .....	28
Figura 3.7: Peso de agua destilada.....	29
Figura 3.8: Introducción de solución acuosa en tanque de almacenamiento.....	29
Figura 3.9: Medición de masa inicial del globo .....	30
Figura 3.10: Almacenamiento de gas oxihidrógeno en el globo .....	31
Figura 3.11: Medición de gas oxihidrógeno .....	31
Figura 3.12: Terminales para conexión relé y switch de arranque.....	32
Figura 3.13: Instalación de celda de hidrógeno .....	33
Figura 3.14: Instalación de celda de hidrógeno.....	33
Figura 3.15: Analizador de gases QGA 6000.....	34
Figura 3.16: Conexión de sonda de acero inoxidable en salida de tubo de escape.....	35
Figura 3.17: Montaje de extracción de gasolina.....	36

Figura 3.18: Introducción de gasolina .....	37
Figura 3.19: Disposición del tablero en cero .....	37
Figura 3.20: Ruta experimental en autopista .....	38
Figura 3.21: Ruta experimental rural.....	38
Figura 3.22: Ruta experimental urbana .....	39
Figura 3.23: Banco de pruebas utilizado .....	40
Figura 3.24: Banco de rodillos inercial modelo BPV1800 – N° 08-19.....	40
Figura 3.25: Sistema de cómputo SMAC.....	41
Figura 3.26: colocación de correas de sujeción.....	42
Figura 3.27: emparejamiento cable positivo del sistema de hidrógeno.....	42
Figura 4.1: Comparación de potencia del motor Citroën C-elysee con características estándar de funcionamiento y alimentado con mezcla de oxihidrógeno .....	48
Figura 4.2: Resultados de pruebas sin activación de sistema de hidrógeno .....	51
Figura 4.3: Torque y potencia Citroen C-elysee con características de funcionamiento a nivel del mar alimentado con mezcla de oxihidrógeno .....	52
Figura 4.4: Comparación de torque y potencia Citroën C-elysee con características estándar de funcionamiento y alimentado con mezcla de oxihidrógeno. ....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Propiedades del oxígeno.....	5
Tabla 1.2: Valores caloríficos de combustibles comparativos .....	6
Tabla 1.3: Punto de inflamación de combustibles comparativos .....	7
Tabla 1.4: Temperatura de autoignición de los combustibles .....	9
Tabla 1.9: Propiedades físicas del hidróxido de potasio .....	11
Tabla 1.10: Resumen de flujos utilizados en motores de combustión interna .....	12
Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de cada tipo de electrolisis .....	18
Tabla 2.2: Características de celda seca y celda húmeda .....	20
Tabla 4.1: Eficiencia de la celda de hidrógeno con diferente voltaje y solución de 6,832g	44
Tabla 4.2: Eficiencia energética de la prueba 1 .....	45
Tabla 4.3: Eficiencia de la celda de hidrógeno con diferente voltaje y solución de 6.493g	45
Tabla 4.4: Eficiencia energética de la prueba 2.....	46
Tabla 4.5: Eficiencia de la celda de hidrógeno con diferente voltaje y solución de 7.17 g	47
Tabla 4.6: Pérdida y regeneración de energía de la prueba 3. ....	47
Tabla 4.7: Activación de la celda de hidrógeno .....	49
Tabla 4.8: Sin activación celda de hidrógeno.....	49
Tabla 4.9: Análisis pantalla de vehículo y drenado de combustible prueba 1.....	50
Tabla 4.10: Análisis pantalla de vehículo y drenado de combustible prueba 2.....	50
Tabla 4.11: Comparativa de resultados de torque y potencia.....	53

## RESUMEN

Actualmente, el aumento del precio del combustible en Ecuador ha ocasionado que las personas opten por uno más económico con menor octanaje, generando deficiencia energética, afectando al rendimiento del motor. Por tal razón, el objetivo general es analizar desde el punto de vista energético la aplicación de mezclas enriquecidas en oxígeno e hidrógeno obtenidas mediante electrólisis del agua en un motor de encendido provocado para determinar si existe o no un aporte de energía adicional implementando este sistema tomando en consideración todas las fases del proceso. Se inició con el análisis técnico, seleccionando la celda seca, ánodo, cátodo y solución acuosa. Posteriormente, se estudió los parámetros de funcionamiento una celda de hidrógeno en un vehículo Citroen C-Elysée mediante pruebas de laboratorio, vehículo y dinamómetro de chasis. La primera prueba de laboratorio se utilizó 6,832 g de hidróxido de potasio, evidenciando que la eficiencia de la celda mejora cuando el voltaje aumenta y la celda seca de hidrógeno tiene mejor producción debido a la eficiencia energética. Similar situación se presentó en la segunda prueba con 6.493g y la tercera con 7,173g, donde la masa se aumentó en 0.341 g; el voltaje de 14,5 V se requiere una potencia de 35.30 Watts y en la producción de gas oxihidrógeno se necesita una potencia alta. En la primera prueba del analizador de gas del vehículo se activó la celda, mostrando condiciones inadecuadas porque no cumple la norma INEN y la segunda prueba evidenció un incremento de emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos y dióxido de carbono a medida que se aumenta las revoluciones del motor. En la prueba de ruta se activó la celda de hidrógeno, identificando un consumo de 5,6 litros en 65,9 km y al drenar en el tanque de almacenamiento consumió 5,8 litros. La segunda prueba (funcionamiento standard) presentó un consumo de 5,7 litros y con drenado llegó a 5,95 litros. La prueba en el dinamómetro presentó un desempeño similar hasta las 4200 revoluciones, luego de las 4200 revoluciones hasta 6000 revoluciones el vehículo empieza a tener un mejor rendimiento.

**Palabras Claves:** Celda de hidrógeno, ciclo Otto, hidróxido de potasio, gas oxihidrógeno.

## ABSTRACT

Currently, the increase in the price of fuel in Ecuador has caused people to opt for a cheaper fuel with lower octane rating, generating energy deficiency, affecting engine performance. For this reason, the general objective is to analyze from the energetic point of view the application of oxygen and hydrogen enriched mixtures obtained by water electrolysis in a spark ignition engine to determine whether or not there is an additional energy contribution by implementing this system, taking into consideration all the phases of the process. The technical analysis began with the selection of the dry cell, anode, cathode and aqueous solution. Subsequently, the operating parameters of a hydrogen cell in a Citroën C-Elysée vehicle were studied by means of laboratory, vehicle and chassis dynamometer tests. The first laboratory test used 6,832 g of potassium hydroxide, evidencing that the cell efficiency improves when the voltage increases and the dry hydrogen cell has better production due to energy efficiency. Similar situation was presented in the second test with 6.493g and the third with 7,173g, where the mass was increased by 0.341 g; the voltage of 14.5 V requires a power of 35.30 Watts and in the production of oxyhydrogen gas a high power is needed. In the first test of the vehicle's gas analyzer the cell was activated, showing inadequate conditions because it does not meet the INEN standard and the second test showed an increase in carbon monoxide, hydrocarbons and carbon dioxide emissions as the engine revolutions increase. In the road test the hydrogen cell was activated, identifying a consumption of 5.6 liters in 65.9 km and when drained in the storage tank consumed 5.8 liters. The second test (standard operation) showed a consumption of 5.7 liters and with draining it reached 5.95 liters. The dynamometer test showed a similar performance up to 4200 revolutions, after 4200 revolutions up to 6000 revolutions the vehicle begins to have a better performance.

**Keywords:** Hydrogen cell, Otto cycle, potassium hydroxide, oxyhydrogen gas.

## INTRODUCCIÓN

El incremento del precio del combustible ha inclinado a la población ecuatoriana a optar por combustibles más económicos y de menor octanaje; ocasionando una deficiencia energética en el rendimiento de los vehículos de encendido. Los usuarios con vehículos de alta relación de compresión resultan ser los más afectados con este cambio de combustible, pues, su bajo octanaje afecta al rendimiento y la vida útil del motor. Para el desarrollo de la presente investigación se considera la siguiente estructura:

El Capítulo 1 se establece el marco teórico, donde se considera conceptos relacionados con el tema tratado como el oxígeno, hidrógeno, electrolisis del agua y oxihidrógeno, tomando en cuenta criterio de diversos autores, permitiendo un acercamiento y sustento de la base del proyecto. Posteriormente, en el Capítulo 2 de este trabajo muestra el análisis técnico para la selección de los materiales de celdas de hidrógeno, por lo que se analiza la celda alcalina, membrana de intercambio protónico, aniónico, óxido sólido, húmeda y seca; incluyendo el diseño de la celda seca de hidrógeno.

Por otra parte, el Capítulo 3 presenta el estudio de parámetros de funcionamiento de una celda de hidrógeno aplicada a un vehículo Citroën C-Elysée, por lo que se describe las pruebas en el laboratorio como montaje del sistema generado de hidrógeno, detalle de equipos, procedimiento y ensayos. Luego se aplica la prueba en el vehículo a través de la instalación del sistema generador de gas oxihidrógeno, así como análisis de gases y pruebas en ruta. Seguidamente, en el Capítulo 4 se presenta los resultados de las pruebas del laboratorio, vehículo y dinamómetro, donde se efectúa un estudio de consumo y eficiencia energética en dos etapas de funcionamiento cuando el vehículo utiliza una mezcla de aire - combustible y se enriquece con mezcla de oxihidrógeno. Estos datos se evalúan con gráficas obtenidas mediante un dinamómetro en los diferentes ciclos de trabajo del automóvil.

Finalmente, en el apartado de conclusiones se detalla los resultados obtenidos sobre el rendimiento del automóvil enriquecido con una mezcla de oxihidrógeno, destacando los resultados en los diferentes ciclos de trabajo en un vehículo de alta relación de compresión.

## **PROBLEMA**

Los vehículos Citroën C-elysee equipados con motores térmicos en la ciudad de Quito tiende a perder el 28% de la potencia debido a que se encuentra a 2800 metros sobre el nivel del mar, transformando entre el 25 al 35% de la energía aportada por el combustible en trabajo del motor, la mayor parte de energía se convierte en calor y no se puede aprovechar (Çenge & Boles, 2012). Por lo tanto, es relevante estudiar las mezclas enriquecidas en oxígeno e hidrógeno obtenidas mediante electrólisis del agua debido a que mejora la potencia del vehículo y reduce el consumo del combustible, tal como lo mencionado por Ortega y Baltazar (2020), quienes mencionan que al adaptar un sistema de electrólisis de agua para inyectar hidrógeno a un motor general de 1300cc se logró aumentar la potencia del vehículo en 1.3 kW y el consumo de combustible bajó en promedio de 10%, mejorando así la economía de los usuarios (Ortega & Baltazar, 2020).

### **Objetivo General**

Analizar desde el punto de vista energético la aplicación de mezclas enriquecidas en oxígeno e hidrógeno obtenidas mediante electrólisis del agua en un motor de encendido provocado para determinar si existe o no un aporte de energía adicional implementando este sistema tomando en consideración todas las fases del proceso.

### **Objetivos Específicos**

- Establecer parámetros de funcionamiento al utilizar oxihidrógeno en el sistema de alimentación de un motor de cuatro tiempos ciclo Otto.
- Diseñar un sistema de electrólisis de agua mediante el uso de materiales inoxidables y resistentes a altas temperaturas.
- Analizar el funcionamiento del sistema de alimentación del vehículo enriquecido con una mezcla de oxihidrógeno.
- Evaluar el comportamiento del motor al usar oxihidrógeno en un motor de cuatro tiempos ciclo Otto.

# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO

Para mejorar la eficiencia energética del vehículo y reducir emisiones contaminantes producto de la combustión en motores de cuatro tiempos, se ha planteado el uso de combustibles alternativos.

Se conoce que el hidrógeno puede ser utilizado como complemento de la mezcla estequiométrica en los motores a gasolina y motores diésel para mejorar la vida útil y disminuir la contaminación, debido a que el hidrógeno presenta un coeficiente de difusión o velocidad de llama adiabática que mejora el proceso de mezcla aire combustible, y da una mejor estabilidad operativa del motor (Fernández, 2019).

### 1.1 El oxígeno

Según Espinoza & Uyaguari (2020) afirman que es un gas incoloro e inodoro de gran importancia para el desarrollo de la combustión, por ser un agente oxidante. En una celda generadora de gas oxihidrógeno, el oxígeno se genera en la parte del cátodo como complemento del proceso de electrolisis.

**Tabla 1.1:** Propiedades del oxígeno

Propiedades	
Electronegatividad	3,5
Masa atómica (g/mol)	15,9994
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1.429
Punto de ebullición (°C)	-183
Calor específico (J/K*kg)	920

Fuente: (Espinoza & Uyaguari, 2020)

### 1.2 El hidrógeno

De acuerdo con Quezada & Torres (2014) el hidrógeno es el elemento más ligero de todo el planeta, así como el más abundante al ser un componente del agua. Aunque el hidrógeno está presente en todo el planeta requiere de tecnologías que permitan su separación, debido a que no se considera una fuente de energía primaria como los combustibles fósiles, sino un medio para almacenar y transportar energía. Este gas suele ser usado para la combustión interna de un motor o para celdas de combustible, la producción de hidrógeno puede generar

contaminación, como el dióxido de carbono, por esta razón es necesario un estudio detallado de los materiales y componentes a utilizarse.

### 1.3 Propiedades del hidrógeno

#### 1.3.1 Poder calorífico

Según Gomendio (2017) cuando los combustibles reaccionan con el oxígeno, liberan gran cantidad de energía, para el hidrógeno es denominado como poder calorífico del hidrógeno, el cual muestra la máxima cantidad de energía obtenida de la combustión de 1 mol de hidrógeno. Dependiendo de las condiciones en las que suceda la reacción se puede cuantificar en poder calorífico superior (PCS) y en poder calorífico inferior (PCI). La diferencia entre estos es el calor de vaporización, el (PCI) no utiliza esta energía de vaporización, por otra parte, el (PCS) emplea esta energía y, por ende, con igual porcentaje de combustible, origina más calor. En la tabla 1.2 se puede encontrar los valores del poder calorífico superior e inferior de los combustibles.

**Tabla 1.2:** Valores caloríficos de combustibles comparativos

Combustible	Poder calorífico superior (a 25°C y 1 atmosfera)	Poder calorífico inferior (a 25°C y 1 atmosfera)
Hidrógeno	61,000 Btu/lb (141.86 kJ/g)	51,500 Btu/lb (119.93 kJ/g)
Metano	24,000 Btu/lb (55.53 kJ/g)	21,500 Btu/lb (50.02 kJ/g)
Propano	21,650 Btu/lb (50.36 kJ/g)	19,600 Btu/lb (45.6 kJ/g)
Gasolina	20,360 Btu/lb (47.5 kJ/g)	19,000 Btu/lb (44.5 kJ/g)
Diesel	19,240 Btu/lb (44.8 kJ/g)	18,250 Btu/lb (42.5 kJ/g)
Metanol	8,580 Btu/lb (19.96 kJ/g)	7,760 Btu/lb (18.05 kJ/g)

Valores caloríficos superior e inferior de los combustibles, Fuente: (Lanz, Heffel, & Messer, 2001)

Como se puede apreciar en la tabla 1.2 el hidrógeno posee un poder calorífico superior a los demás combustibles, de acuerdo con (Reyes, et al., 2018) en comparación al volumen, el hidrógeno resulta ser el más eficaz cuando es utilizado en el proceso de combustión. Cuando se combina al hidrógeno con la gasolina estos dos combustibles se mezclan y se genera un

aumento de potencia proporcional a la contribución que este entregue al motor, este aumento de potencia se puede apreciar de mejor manera en la aceleración donde consume mayor energía al romper el reposo inercial.

### 1.3.2 Punto de inflamabilidad

De acuerdo con Lanz, Heffel, & Messer (2001) este factor es la temperatura a la cual los combustibles pueden generar vapor con facilidad para formar una mezcla inflamable. Cuando la temperatura del combustible es menor al punto de inflamación, no genera vapores suficientes para la combustión, debido a que su rango de evaporación es lento. Todos los combustibles deben estar en estado gaseoso para combustionar, existen algunos combustibles como el metano y el hidrógeno que se encuentran ya gasificados, incluyendo otros como la gasolina o el diésel que se encuentran en estado líquido los cuales deben pasar por un proceso de gasificación para que se puedan quemar correctamente.

**Tabla 1.3:** Punto de inflamación de combustibles comparativos

Combustible	Punto de inflamabilidad
Hidrógeno	<-423 °F (< -253 °C; 20 K)
Metano	-306 °F (-188 °C; 85K)
Propano	-156 °F (-104 °C; 169 K)
Gasolina	Aproximadamente -45 °F (-43 °C; 230K)
Metanol	52 °F (11°C; 284 K)

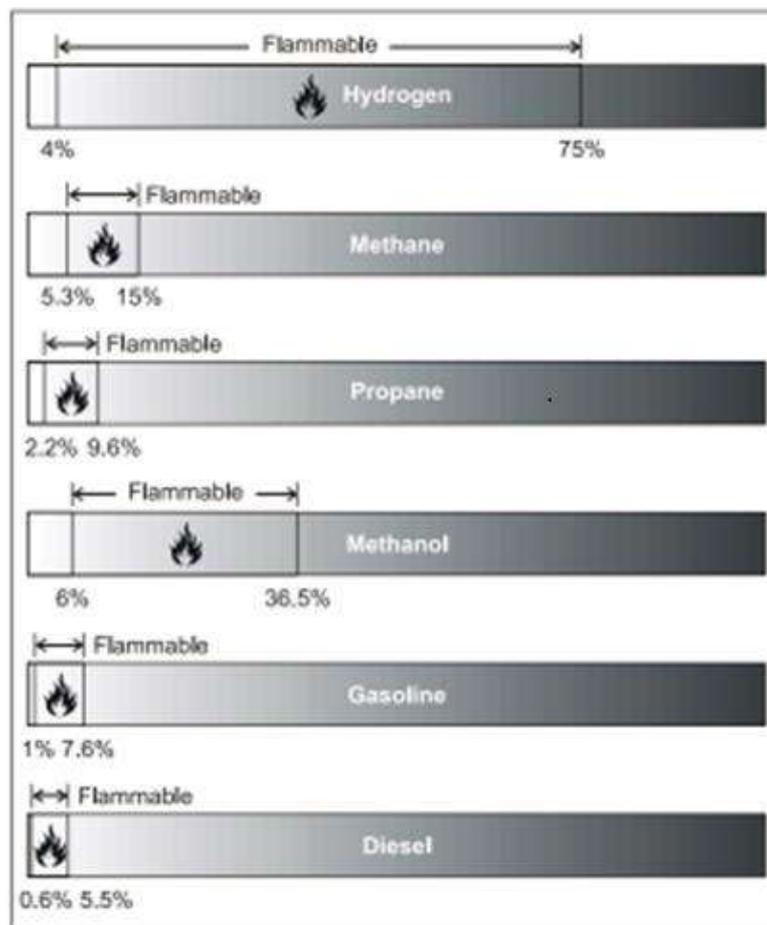
Rango de temperatura de los combustibles, Fuente: (Lanz, Heffel, & Messer, 2001)

Como se muestra en la tabla 1.3 el rango de inflamabilidad del hidrógeno es de -423 °F (-253°C), lo que genera bastantes vapores en condiciones atmosféricas normales para que suceda una mezcla aire y combustible. Sánchez (2019) señala que los límites de inflamabilidad del hidrógeno se expanden a raíz del incremento de la temperatura, por esta razón el hidrógeno es capaz de quemarse en mezclas pobres, debido a esto el vehículo arranca con mayor facilidad, además que permite tener una combustión más eficaz y un menor consumo de combustible. Al finalizar el proceso de ignición, su temperatura resulta menor, lo que reduce la formación de óxidos de nitrógeno.

### 1.3.3 Rango de inflamabilidad

De acuerdo con Aguado, et al., (2021) el rango de inflamabilidad es definido mediante dos términos, el límite inferior de inflamabilidad (LII) representa la cantidad mínima de vapor cuando se une con el aire, inferior a esta la mezcla resulta pobre, por otra parte, el límite superior de inflamabilidad (LSI) representa la cantidad máxima de vapor cuando se combina con el aire, por encima de este la mezcla es rica. Estos dos parámetros determinan las condiciones adecuadas para que el aire y el gas puedan arder eficazmente.

**Figura 1.1:** Rangos de inflamabilidad



Rangos de inflamabilidad de combustibles comparativos a temperatura atmosférica, Fuente: (Lanz, Heffel, & Messer, 2001)

El hidrógeno es empleado para aportar energía a los motores de ciclo Otto, es aconsejable que estos trabajen con mezcla pobre para aprovechar el consumo total del hidrógeno, como

se ilustra en la Figura 1 el hidrógeno llega a ser más inflamable que los demás combustibles, el límite de concentración cuando se mezcla con el aire es de (4-75%), por esta razón resulta peligroso que existan fugas en el lugar donde se almacena el hidrógeno ya que podría estallar (Lanz, Heffel, & Messer, 2001).

### 1.3.4 Temperatura de autoignición

De acuerdo con Ramos (2008-2009) este factor se define como la cantidad mínima de calor requerida para inflamar el combustible, en el caso del hidrógeno tiene características muy diferentes a los demás combustibles por lo que realiza un proceso de mezcla y autoignición diferente.

**Tabla 1.4:** Temperatura de autoignición de los combustibles

Combustible	Temperatura de autoignición
Hidrógeno	1085 °F (585 °C)
Metano	1003 °F (540° °C)
Propano	914 °F (490 °C)
Metanol	725 °F (385 °C)
Gasolina	450 hasta 900 °F (230 hasta 480 °C)

Nota. Temperatura de autoignición de combustibles comparativos, Fuente: (Lanz, Heffel, & Messer, 2001)

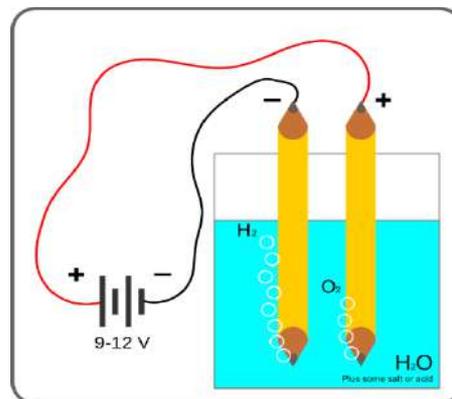
En la tabla 1.4 se visualiza que la temperatura de autoignición del hidrógeno es de 1085°F (585 °C), supera los valores de los demás combustibles. La alta temperatura de autoignición del hidrógeno evita encender la mezcla simplemente con calor, se requiere de una fuente externa para inflamar la mezcla. Por lo que el uso de hidrógeno resulta factible para operaciones en motores de ciclo Otto, pero no factible para motores de encendido por compresión, ya que para este tipo de motores la temperatura de autoignición del hidrógeno es alta (Rosati & Aleiferis, 2009).

## 1.4 Electrolisis del agua

De acuerdo con Velásquez (2020) es un proceso de separación química del agua en hidrógeno y oxígeno mediante un proceso de oxidación y reducción. Este proceso tiene como propósito el rompimiento de enlaces al aplicar una solución electrolítica (contiene iones libres en su composición) y corriente eléctrica en un circuito cerrado generando así una reacción electrolítica o más conocido como electrolisis.

Según Alconel (2020) para el proceso de Lanz, Heffel, & Messer (2001) del agua se conecta a una fuente de corriente eléctrica un cátodo (negativo) y un ánodo (positivo) que posteriormente son introducidos en un reservorio de agua a la que se le añade un electrolito (sustancias que posee la característica de romper las moléculas para la generar iones) con la finalidad de aumentar la conductividad eléctrica y disminuir la energía eléctrica requerida para el proceso.

**Figura 2.2:** Electrólisis



Esquema electrolisis del agua, Fuente: (Romero, Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción, 2018)

El cátodo produce una reacción de reducción lo que permite que los cationes de hidrógeno se unan con los electrones del cátodo produciendo hidrógeno.



El ánodo produce una reacción de oxidación mediante el cual se produce oxígeno, electrones y cationes de hidrógeno.



- **El electrolito**

Son sustancias compuestas por iones libres. La cantidad de iones en una solución los clasifica en dos grupos: electrolitos fuertes (buenos conductores) y electrolitos débiles (ligeramente conductores) (Guerrero & Pesantes, 2019).

- **Hidróxido de potasio**

El hidróxido de potasio es un compuesto formado por distintos elementos, metales y no metales por lo que es considerado inorgánico. Este electrolito es importante en el proceso de electrolisis ya que es el encargado de suministrar iones al agua para favorecer el paso de corriente, permitiendo que el agua sea un mejor conductor eléctrico y permitiendo conservar la tensión correcta en las placas (Pozo, 2013).

**Tabla 1.5:** Propiedades físicas del hidróxido de potasio

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Formula química	KOH
Peso molecular	56,11 g/mol
Estado físico	Solido blanco-amarillo claro, deliquescente
Punto de fusión	400°C
Punto de ebullición	1320 °C a 760 mmHg
Presión de vapor (mmHg)	0.13 kPa a 714 °C, prácticamente cero a 20°C
pH	0.01 mol/L, pH= 12

Propiedades del hidróxido de potasio, Fuente: (Pozo, 2013)

### 1.5 El oxihidrógeno H(OH)

Según Duran & Vargas (2014) este gas favorece al proceso de combustión de los vehículos aumentando el porcentaje de quema de combustibles fósiles, incrementando el octanaje y disminuyendo los gases contaminantes, además de evidenciar un mayor aumento en la

potencia del motor y por consiguiente un menor consumo de combustible. Algunas pruebas no oficiales han demostrado que añadiendo oxihidrógeno a la mezcla estequiométrica se ha logrado un aumento de kilómetros por galón (alrededor de 20% a un 35%) en sistemas de inyección electrónica.

### 1.5.1 Aplicación del oxihidrógeno en motores de combustión interna

De acuerdo con Sánchez (2016) no existe un valor exacto de suministro de oxihidrógeno para ser utilizado en el automóvil con el fin de asegurar un funcionamiento estándar ya que los motores tienen características totalmente independientes de otros lo que resulta en un desempeño diferente para cada motor. Algunos resultados favorables se pueden evidenciar en la tabla 1.5.

**Tabla 1.6:** Resumen de flujos utilizados en motores de combustión interna

Investigadores	Motor	Cilindrada (cc)	Flujo HHO (mL/min)	Flujo HHO/1000 cc (mL/min)
Yilmaz et al., 2010.	Diésel	3567	5000	1428,57
Bari & Mohammad, 2010	Diésel	1600	5000-35000	2187,50
Karagoz & Orak, 2011.	Gasolina	1124	3-6% del flujo total de aire	
Pattanachak, Pattanasethanon, & Sangiamvibool, 2011.	Diésel	2500	500-800	320,00
Wang, Cheng, Lin, & Chen, 2012.	Diésel	5880	10000-70000	11904,76
Ström & Johansson, 2012.	Diésel	418	1000	2392,34
Benítez & Ramos, 2013.	Gasolina	1300	1000	769,23
Premkartikkumar, Annamalai, & Pradeepkumar, 2013.	Diésel	660	4600	6969,70
Sankar, 2014.	Diésel	661	800	1210,29
Falahat, Hamdan, & Yamin, 2014.	Gasolina	197	1000-2000	10152,28
Al-Rababah & Bhuyan, 2014.	Gasolina	197	1000-2000	10152,28

Flujo en motores de combustión, Fuente: (Sánchez J. , 2016)

## **CAPÍTULO 2**

### **ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA SELECCIÓN DE MATERIALES EN CELDA DE HIDRÓGENO**

Para Rivas (2009) un dispositivo resulta atractivo para el consumidor cuando este presenta ciertas características importantes como: ser confiable y tener un tiempo de uso razonablemente prolongado. Para mejorar la fiabilidad del dispositivo se estudia las diferentes etapas de construcción, una de esas es la preliminar o selección de materiales, debido a que se debe tener en cuenta el estrés al que se someterá el sistema una vez terminado el producto.

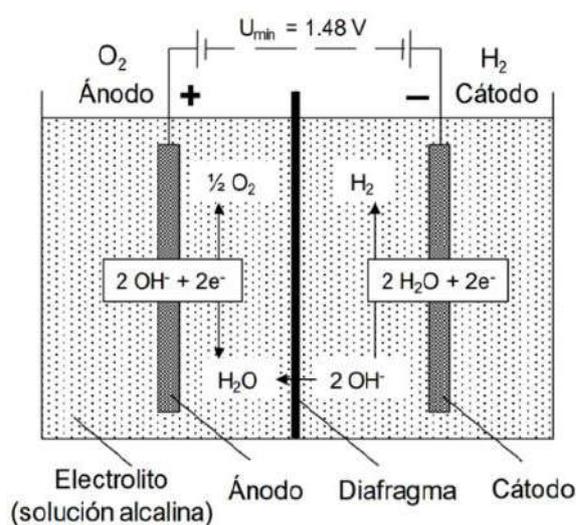
#### **2.1 Celdas electrolíticas**

De acuerdo con Jiménez & Marín (2021) son dispositivos electroquímicos, constituidos de una disolución acuosa o electrolito en el que está inmerso dos electrodos. El electrodo que produce reducción es denominado cátodo y el electrodo que produce oxidación es ánodo, generalmente son fabricados de metales o grafito, está conectado a una fuente de corriente continua, al terminal negativo se une el cátodo y al terminal positivo el ánodo, esto permite que el sistema realice transferencia de electrones para generar el rompimiento de enlaces atómicos y producir los respectivos gases de trabajo. Las celdas electrolíticas, se las conoce como electrolizadores y se clasifican en base a su operación.

##### **2.1.1 Celda alcalina**

Bausá (2020) señala que es una tecnología que se ha desarrollado a lo largo de los años, es seguro y eficiente, debido a sus componentes internos. Este dispositivo está compuesto por dos electrodos inmersos en una disolución alcalina, compuesta de hidróxido de potasio en un rango de 20-30%, internamente posee un diafragma permeable que divide los electrodos para mantener los gases resultantes separados.

**Figura 3.1:** Electrolizador alcalino



Principio de la electrólisis alcalina, Fuente: (Bausá, 2020)

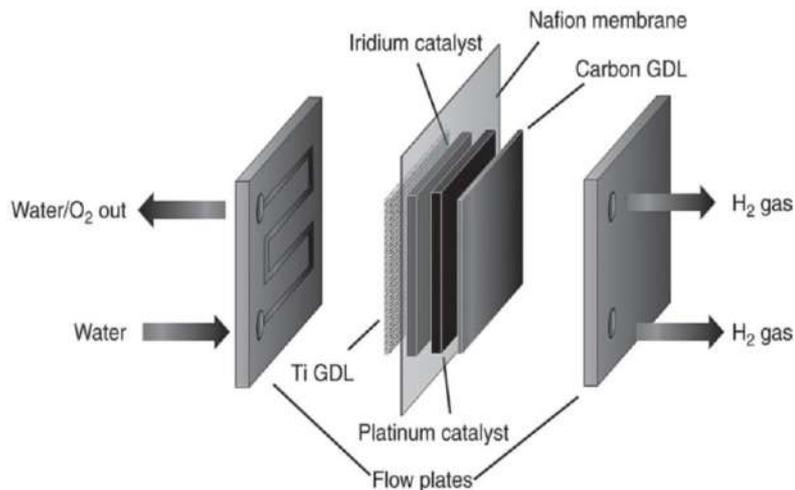
### 2.1.1.1 Componentes celda alcalina

Los electrodos de este dispositivo están compuestos de aleaciones de níquel siendo un 70% de este material el 30% restante es aún motivo de investigación, con la finalidad de producir electrólisis con menos voltaje y disminución en la resistencia. Los materiales utilizados como complemento del níquel son: óxidos de molibdeno, grafito, cobre y teflón. Por otra parte, los materiales del que está constituido el diafragma de separación son: asbestos, titanato de potasio y polipropileno (Romero, 2018). Para Chisholm & Cronin (2016) afirman que el voltaje de electrolizadores alcalinos alterna de 1.8-2.4 V, además trabaja con un valor de 0.2-0.4 A/cm<sup>2</sup> y la potencia que entrega es de <1mW/cm<sup>2</sup>.

### 2.1.2 Celda membrana de intercambio protónico PEM

Selamet, et al., (2011) señalan que un electrolizador de membrana compuesto de un cátodo en el que se genera oxígeno y un ánodo en el que se genera hidrógeno, utiliza agua desionizada como electrolito, el cual está inmerso en una membrana conductora de iones sólida, delimitada por dos placas de titanio. La membrana cumple con dos funciones importante: permite la separación de gases y conductor de iones (protones).

**Figura 4.2:** Diagrama de disposición electrolizar PEM



Celda electrolítica de membrana de intercambio de protones PEM, Fuente: (Chisholm & Cronin, 2016)

#### 2.1.2.1 Componentes celda membrana de intercambio protónico

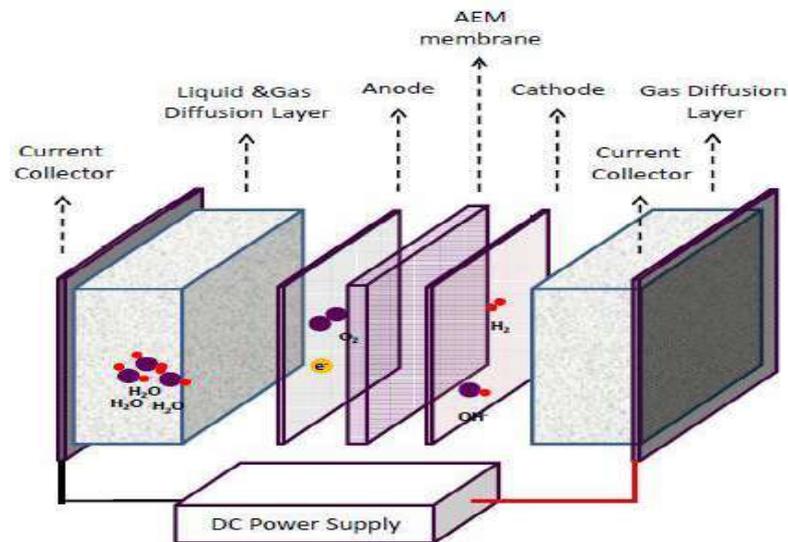
Con base en Romero (2018) los catalizadores de esta celda están compuesto de materiales especiales para mejorar la eficiencia entre los procesos, oxidación del agua y reducción de protones. La membrana conductora está fabricada con un polímero sintético, la más usada el Nafion que genera condiciones ácidas en el sistema, por lo que los electrodos deben estar hechos de metales específicos como: iridio, rodio, platino, rutenio, y los óxidos de éstos, generalmente el cátodo esta echo de platino y el ánodo de óxido de iridio. Chisholm & Cronin (2016) manifiestan que el voltaje de electrolizadores tipo PEM oscila entre los 1.8-2.2 V, además trabaja con corriente de hasta 2 A/cm<sup>2</sup>.

#### 2.1.3 Celda membrana de intercambio aniónico (AEM)

De acuerdo con Torondel (2021) este tipo de dispositivo presenta mejores características que los electrolizadores alcalinos debido a las propiedades de resistencia e impermeabilidad que presentan sus separadores. Por otra parte, en relación con los electrolizadores de membrana de intercambio protónico presentan un rendimiento similar, pero, los electrolizadores tipo AEM conducen iones de hidróxido OH<sup>-</sup> y los electrolizadores tipo PEM transportan protones

H<sup>+</sup>, generando una solución alcalina y no ácida, por lo que en este sistema se puede utilizar materiales más rentables.

**Figura 5.3:** Diagrama de disposición electrolizador tipo AEM



Celda electrolítica membrana de intercambio aniónico, Fuente: (Rondán, 2016)

#### 2.1.3.1 Componentes celda membrana de intercambio aniónico

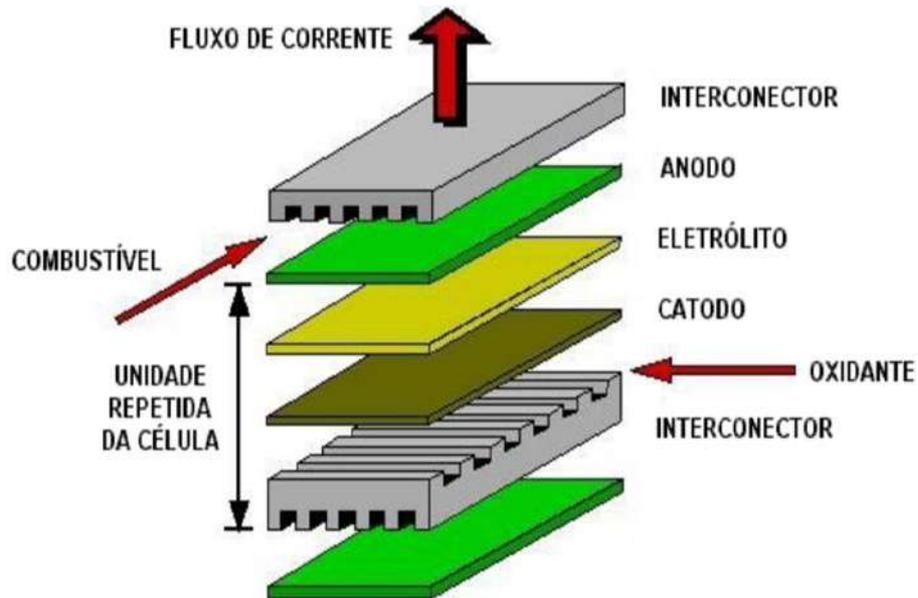
Los componentes de este tipo de celda son limitados, ya que es una tecnología en desarrollo. En la construcción de este dispositivo se utilizan materiales del fabricante ACTA. En el sistema están inmersos electrodos para obtener una distribución uniforme de gases, espuma de níquel para el ánodo y papel carbón para el cátodo. Para conducir el flujo, la semicelda anódica cuenta con soporte de titanio y en la semicelda catódica grafito (Romero, 2018). Esta celda trabaja a temperaturas de 40°C a un voltaje de 1.9 V con una intensidad de corriente de 400 mA/cm<sup>2</sup> (Vincent, Kruger, & Bessarabov, 2017).

#### 2.1.4 Celda óxido sólido

Taibi, et al., (2020) señalan que este tipo de electrolizador es energéticamente favorable porque trabaja a altas temperatura (700-850°C), disminuyendo la demanda de electricidad debido a que parte de la energía para la separación es proporcionada a través del calor, sin

embargo, este dispositivo en los periodos de apagado/rampa, genera mayor desgaste de los materiales disminuyendo su tiempo de trabajo.

**Figura 6.4:** Diagrama de disposición electrolizador tipo SOWE



Celda electrolítica de óxido sólido, Fuente: (Chiba, 2010)

#### 2.1.4.1 Componentes celda óxido sólido (SOWE)

Según Romero (2018) este sistema cuenta con placas bipolares fabricados de acero inoxidable y manganita recubierta de electrolito de zirconio, no necesita utilizar electrolizadores de platino, ya que trabaja a altas temperaturas, sin embargo, en la actualidad se los sigue utilizando para garantizar un contacto eléctrico eficiente entre las celdas.

El cátodo de este dispositivo está hecho de materiales cerámicos y metal, por otra parte, el ánodo está hecho de platino tratado con manganita de lantano. De acuerdo con Millet & Grigoriev (2013) los electrolizadores de óxido sólido trabajan con un voltaje de 1.48 V, con densidad de corriente de  $3.6 \text{ A/cm}^2$  y en un rango de temperatura de  $50^\circ\text{C}$  hasta los  $95^\circ\text{C}$ , estos parámetros de funcionamiento son ideales para que esta celda alcance una eficiencia del 100%. En la tabla 2.1 se aprecia un resumen detallado de las ventajas y desventajas de las celdas electrolíticas.

**Tabla 2.1:** Ventajas y desventajas de cada tipo de electrolisis

<b>Celda</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Alcalina	Tecnología madura	Baja intensidad de corriente
	Bajo precio	Electrolito corrosivo
	Estructura simple	Poco compacto
	Vida útil elevada	
PEM	Intensidad de corriente elevada (>1A/cm <sup>2</sup> )	Coste elevado
	Diseño compacto	Posibilidad de vida útil corta debido a la membrana
	Alta pureza (<99,99% H <sub>2</sub> )	Tecnología en desarrollo
AEM	Diseño compacto	Baja intensidad de corriente (<1 A/cm <sup>2</sup> )
	Coste bajo	Degradación de la membrana a largo plazo
	Posibilidad de utilizar metales de transición como electrodos	Tecnología en desarrollo
SOWE	Elevadas eficiencias (cercanas al 100%)	Elevado desgaste debido a la temperatura
	Menor demanda eléctrica	Poco compacto
	Posibilidad de utilizar metales no nobles	Alta temperatura
	abaratando el coste	Tecnología en desarrollo

Ventajas y desventajas de electrolisis, Fuente: (Romero, 2018)

### 2.1.5 Celda húmeda.

Este tipo de celdas tienen una estructura sencilla conformado por un electrolito líquido, por sus terminales circula corriente eléctrica, generando una respuesta química entre el electrolito, y el óxido de plomo. Esta respuesta química permite que se distribuya la electricidad entre los terminales de las placas, separando las moléculas de hidrógeno y oxígeno (Pesántez & Tacuri, 2021).

**Figura 7.5:** Batería de ácido sólido

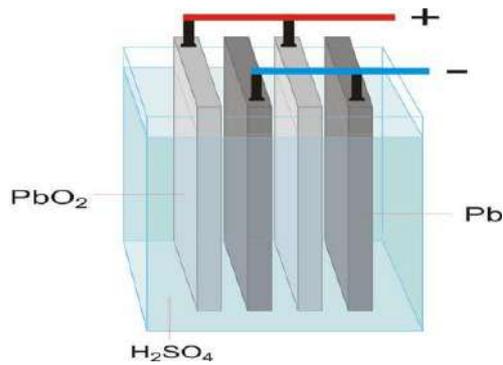


Diagrama de disposición celda húmeda, Fuente: (Generalic, 2018)

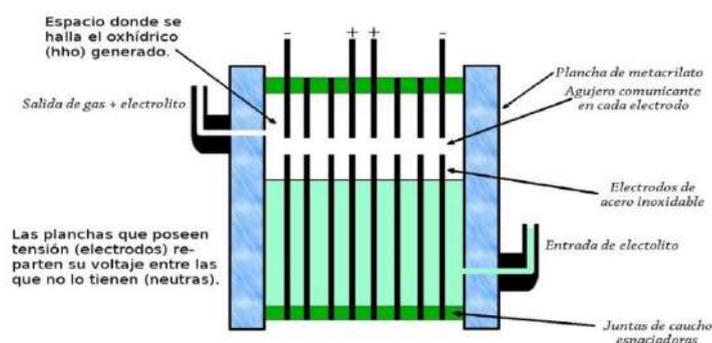
### 2.1.5.1 Componentes celda húmeda

Este tipo de celdas pueden ser construidas con placas de acero inoxidable grado 302 y 304 para los polos negativos y acero 316L para los polos positivos con el fin de mejorar el desempeño de la celda (Sánchez J. , 2016).

### 2.1.6 Celda seca.

Esta celda se denomina seca, debido a que sus componentes no están sumergidos en agua, si no que la solución acuosa, transita por la parte interna de la celda. Este dispositivo trabaja con una corriente de 12 V, para generar hidrógeno y oxígeno, estos gases son enviados a través del colector de admisión del motor para luego combinarse con la mezcla estequiométrica y producir combustión (Quezada & Torres, 2014).

**Figura 8.6:** Diagrama de disposición.



Celda seca, Fuente: (Herdoíza, 2022)

### 2.1.6.1 Componentes celda seca

Sánchez (2016) señala que este tipo de celda trabaja bajo los mismos principios de la celda húmeda, pero, su configuración cambia. Por una parte, la conexión de las placas es diferente ya que utiliza placas neutrales debido a su excesivo consumo de corriente. El material del cual están hecho las placas son: para el ánodo acero inoxidable 316L y para el cátodo acero inoxidable 302 y 304. En la tabla 2.2 se observa algunas diferencias entre las celdas.

**Tabla 2.2:** Características de celda seca y celda húmeda

	<b>Celda seca</b>	<b>Celda húmeda</b>
Definición	Una celda primaria o secundaria en la que el electrodo no fluye de ninguna manera	Una celda con electrolito líquido
Electrolito	Ya sea un recipiente poroso o la mezcla con un medio de gel restringe el flujo del electrodo	Tienen electrolito como fluido y el fluido es libre de moverse
Composición	Más ligero y compacto	Más pesado y voluminoso
Riesgo	Menos riesgo	Más riesgoso debido al fluido potencialmente dañino que puede derramarse
Costo	Caro de fabricar	Más barato de fabricar

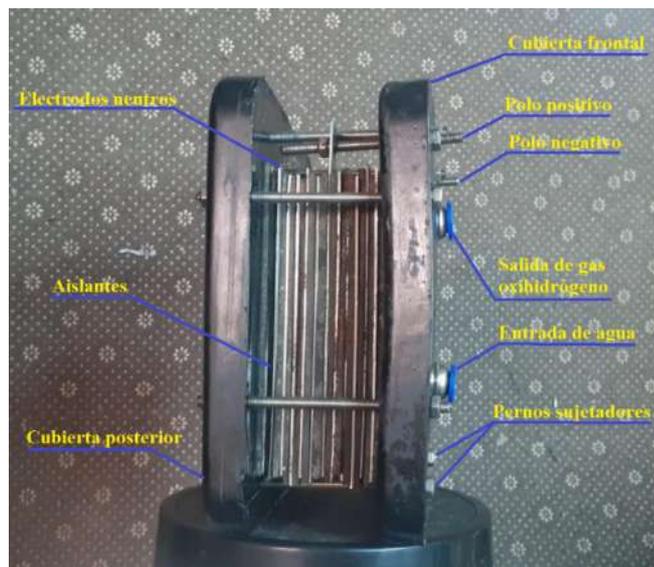
Características de las celdas, Fuente: (Dawson, 2013)

Para la construcción del dispositivo generador de oxihidrógeno se tomó en consideración la celda seca, a pesar de que su fabricación sea más costosa que una celda húmeda, esta resulta ser más ligera y compacta, además de brindar una mayor seguridad. Los metales usados para representar el ánodo y cátodo de la celda son mucho más accesibles que los materiales que se utilizan para fabricar celdas alcalinas y de membrana de intercambio protónico, por otra parte, la solución acuosa resulta más económica que la celda de óxido sólido.

## 2.2 Diseño de la celda seca de hidrógeno

En la celda seca de hidrógeno están inmersos algunos componentes como se observa en la Figura 2.7. Una vez que se ha efectuado un análisis técnico de los parámetros que influyen en el diseño y construcción se procede a realizar el boceto; para esto se utilizó el programa inventor 2023; sistema de cómputo que permite crear piezas mecánicas y extraer planos necesarios para el proceso de manufactura.

**Figura 9.7:** Diseño de celda seca de hidrógeno

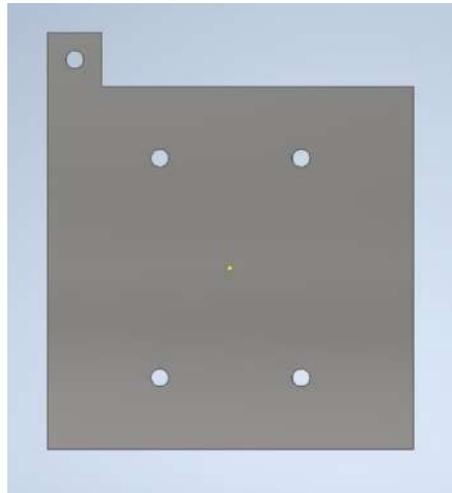


Fuente: Autores

### 2.2.1 Diseño de partes y piezas de la celda seca de hidrógeno en inventor

El primer componente diseñado fue la placa electrodo indicado en la Figura 2.8, las medidas utilizadas para el diseño de los electrodos fueron de 101\*101mm con 1mm de espesor, cada placa lleva cuatro orificios de 0,5 mm de diámetro dos en la parte inferior por donde ingresa el agua y dos en la parte superior por donde sale gas oxihidrógeno. En la parte superior del electrodo sobresale una esquina de 15\*15mm con un orificio en el centro de 0,5 mm de diámetro. Estas placas fueron diseñadas con la finalidad de formar con estos los polos positivos (ánodo) y el polo negativo (cátodo) de la celda de hidrógeno. Todos los detalles se pueden apreciar en el Anexo 5.

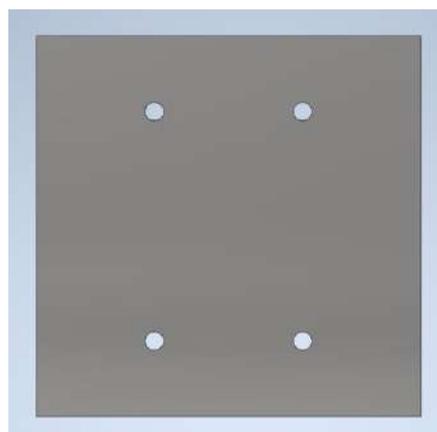
**Figura 10.8:** Placa de electrodo



Fuente: Autores

El segundo componente diseñado fue la placa neutra como se ilustra en la Figura 2.9 con la finalidad de proporcionar simetría al sistema, se utilizó las mismas dimensiones establecidas para la placa electrodos, dimensiones que son detalladas en el Anexo 5. Estas placas reducen el consumo eléctrico de la celda de hidrogeno, entre más placas tenga la celda menor será la diferencia de potencial.

**Figura 11.9:** Placa neutra



Fuente: Autores

El tercer componente diseñado fue la parte del aislante como se ilustra en la Figura 2.10, para el contorno se utilizó las mismas medidas que las anteriores placas, pero, con un espesor

de 2mm y un borde de 10mm al contorno de la hoja. Las medidas se detallan en el anexo 5. Estos aislantes evitan que se produzca arco eléctrico entre las placas de la celda de hidrógeno.

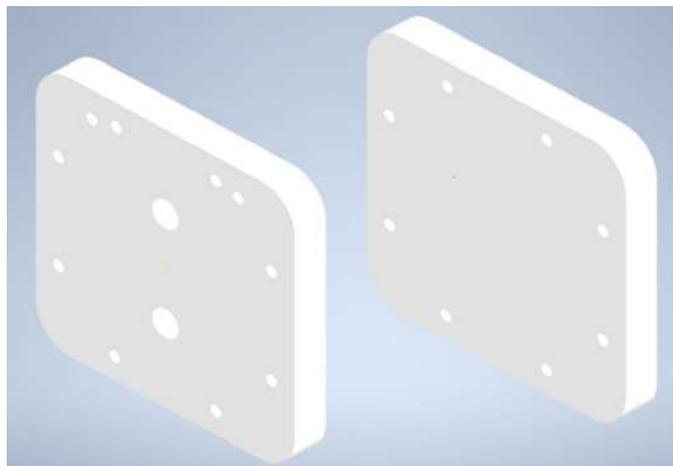
**Figura 12.10:** Aislante



Fuente: Autores

El diseño de las cubiertas de la celda se puede apreciar en la Figura 2.11, las medidas utilizadas fueron de 115\*115 mm, se realizaron dos orificios de 12 mm de diámetro. El orificio superior es por donde sale el gas oxihidrógeno y en el orificio inferior ingresa el agua. Además, se realizó ocho orificios de 0,5 mm de diámetro alrededor de las cubiertas para colocar pernos sujetadores. Todos los detalles se pueden apreciar en el anexo 5.

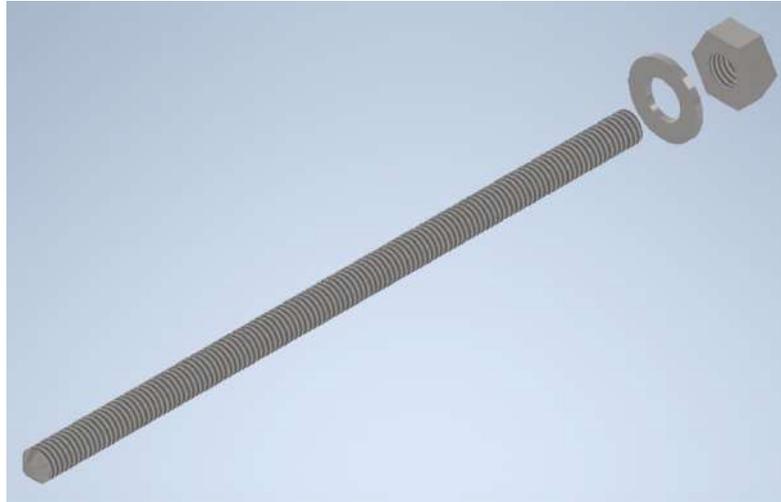
**Figura 13.11:** Cubiertas de la celda



Fuente: Autores

Los elementos de sujeción se ilustran en la Figura 2.12, estos elementos tienen medidas normalizadas, por lo que no requiere de un diseño en especial.

**Figura 14.12:** Elementos de sujeción



Fuente: Autores

Para la construcción de la celda de hidrogeno se requirió de 10 pernos de 77 mm de longitud con un diámetro de 3,5 mm, además se requirió de 20 arandelas planas de 4,5 mm de diámetro interno y 20 tuercas de 3,5 mm de diámetro interno.

## CAPÍTULO 3

### ESTUDIO DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO APLICADA EN UN VEHÍCULO CITROEN C-ELYSEE

Este capítulo muestra los equipos y métodos usados para la toma de datos de una celda de hidrógeno como son: masa de gas oxihidrógeno, flujo másico, potencia suministrada, energía consumida, energía recuperada. Además, se puede visualizar los pasos realizados para el montaje del sistema de oxihidrógeno en las pruebas de laboratorio como la instalación en el vehículo.

#### 3.1 Pruebas en el laboratorio

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio perteneciente a la carrera de ingeniería ambiental, con la finalidad de utilizar instrumentos de medición que permitan obtener parámetros de funcionamiento de un sistema generador de hidrógeno.

##### 3.1.1 Montaje de un sistema generador de hidrógeno.

Los equipos utilizados fueron proporcionados tanto por la carrera de ingeniería automotriz, como ingeniería ambiental. En la Figura 3.1 se aprecia el montaje de un sistema de oxihidrógeno.

**Figura 15.1:** Montaje de sistema de oxihidrógeno



Fuente: Autores

Las conexiones se realizaron partiendo de la celda seca, tanto el polo negativo como positivo se conectaron al tanque de almacenamiento, posteriormente estos cables son conectados a un relé de 30 amperios para finalmente ser enchufado a una fuente de alimentación. Este sistema trabaja en función de la gravedad por lo que la celda se colocó por debajo del burbujeador.

### 3.1.2 Equipos utilizados durante las pruebas de laboratorio

Para emular las condiciones de funcionamiento de la batería en el vehículo, se utilizó una fuente de alimentación de corriente continua de doble salida modelo PS-305DU, para determinar el peso del gas oxihidrógeno se utilizaron dos balanzas grameras. La balanza gramera modelo AQT 200 se utilizó para determinar la masa inicial del globo. Por otra parte, la balanza modelo MS204S fue usada para comprobar la cantidad de gas que adquirió el globo durante un tiempo de 30 segundos. Para determinar la solución acuosa con la que trabajara el sistema utilizamos una balanza de mesa modelo PGL 4001.

#### 3.1.2.1 Fuente de alimentación corriente continua de doble salida modelo PS-305DU

Se utilizó este equipo debido a su amplio rango de magnitud, entrega un voltaje de salida de 0-30V y una corriente de salida de 0-5 A, además este dispositivo presenta una regulación de carga de  $\pm 3mV$  de voltaje y  $\pm 5mA$  de corriente. Las características que presenta este dispositivo son las idóneas para analizar el comportamiento de la celda de hidrogeno, cuando varía el voltaje del vehículo en sus diferentes ciclos de trabajo.

**Figura 16.2:** Fuente de alimentación corriente continua



Fuente: (Test equipment depot, 2015)

### 3.1.2.2 *Balanza analítica digital de alta precisión de laboratorio modelo AQT 200*

Se consideró esta balanza con el propósito de obtener un valor exacto de la masa inicial del globo. Este dispositivo cuenta con capacidad máxima de medición de 0-200 g, una precisión de 0,01g, desviación estándar de 0,02g y un tiempo de estabilización de 3 segundos (Adam Equipment, 2008).

**Figura 17.3:** Balanza analítica digital



Fuente: Autores

### 3.1.2.3 *Balanza analítica modelo MS204S*

Esta balanza fue utilizada para medir la capacidad de gas oxihidrógeno que adquirió el globo en un tiempo de 30 segundos. Este dispositivo cuenta con capacidad de medición de 0-220g, precisión de 0,01g, una desviación estándar de 0,05mg y un tiempo de estabilización de 1,5s. (Toledo, 2017).

**Figura 18.4:** Balanza analítica



Fuente: (Toledo, 2017)

### 3.1.2.4 Balanza de precisión modelo PGL 4001

Esta balanza fue utilizada para medir la cantidad de solución acuosa con la que trabaja el sistema. Este dispositivo tiene un amplio rango de medición que va desde 0-4000g, cuenta con una precisión de 0,1g, una desviación estándar de 0,2g y un tiempo de estabilización de 2-3 segundos (H&C Weighing Systems, 2013).

**Figura 19.5:** Balanza de precisión



Fuente: (H&C Weighing Systems, 2013)

### 3.1.3 Procedimiento para preparación de solución acuosa.

Para llevar a cabo el primer ensayo se preparó una cantidad exacta de soluto, utilizando una balanza de 200g, en el que se pesa 6,811g de hidróxido de potasio como se muestra en la Figura 3.6.

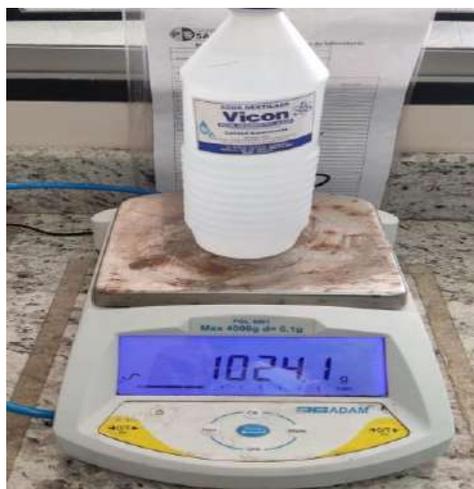
**Figura 20.6:** Peso de hidróxido de potasio



Fuente: Autores

Posteriormente, se determinó la cantidad del solvente, utilizando una balanza de meza en el que se pesa 1024,1g de agua destilada como se puede apreciar en la Figura 3.7.

**Figura 21.7:** Peso de agua destilada



Fuente: Autores

En un matraz de vidrio de 1000 ml se colocó 6,811g de hidróxido de potasio y 1024,1g de agua destilada. Con una varilla agitadora se procede a mezclar los dos componentes hasta que las partículas de soluto desaparezcan completamente. Esta solución acuosa es introducida en el tanque de almacenamiento, como se ilustra en la Figura 3.8.

**Figura 22.8:** Introducción de solución acuosa en tanque de almacenamiento



Fuente: Autores

Para determinar la cantidad exacta que debe ir en el burbujeador se debe tener presente la luz led que se encuentra en la parte superior del dispositivo, esta luz indica el nivel actual de solución que está en el tanque, por ejemplo, si la luz es color azul significa que el tanque está completamente lleno, pero si la luz es color naranja nos indica un nivel bajo de solución.

### 3.1.4 Ensayos realizados para la obtención de oxihidrógeno

En la simulación de las condiciones a las que trabaja la batería de un vehículo, los ensayos fueron realizados partiendo de un voltaje inicial de 12V con aumentos de 0,5V hasta 14,5V con una solución acuosa de 6,811g de hidróxido de potasio y 102,41g de agua destilada. Para medir con exactitud la masa inicial del globo se extrajo todo el aire, luego se colocó en el plato de la balanza de 200g, como se ilustra en la Figura 3.9. A medida que se suministraba un voltaje diferente para cada prueba, se utilizaba un nuevo globo, con la finalidad de trabajar con una misma masa para todas las pruebas.

**Figura 23.9:** Medición de masa inicial del globo



Fuente: Autores

Para almacenar el gas oxihidrógeno se colocó el globo en la manguera de salida del burbujeador y se lo dejó por 30 segundos, a medida que se suministra un mayor voltaje el caudal de salida en la manguera aumentaba, incrementando la cantidad de gas en globo. En la Figura 3.10 se observa la manera correcta de almacenar gas oxihidrógeno en el globo.

**Figura 24.10:** Almacenamiento de gas oxihidrógeno en el globo



Fuente: Autores

Para determinar la masa dentro del globo, se utilizó una balanza analítica modelo MS204S. Se realizó hasta 3 pruebas de medición en esta balanza debido a que su tiempo de estabilización varía a medida que el globo tiene más cantidad de gas en su interior. En la Figura 3.11 se aprecia la medición de gas oxihidrógeno.

**Figura 25.11:** Medición de gas oxihidrógeno



Fuente: Autores

Con los datos obtenidos en cada ensayo realizado, se pudo estimar la variación de masa que libera el sistema en un tiempo de 30 segundos. El flujo másico es importante debido a que la cantidad de gas oxihidrógeno que genere el sistema será de aporte energético para el

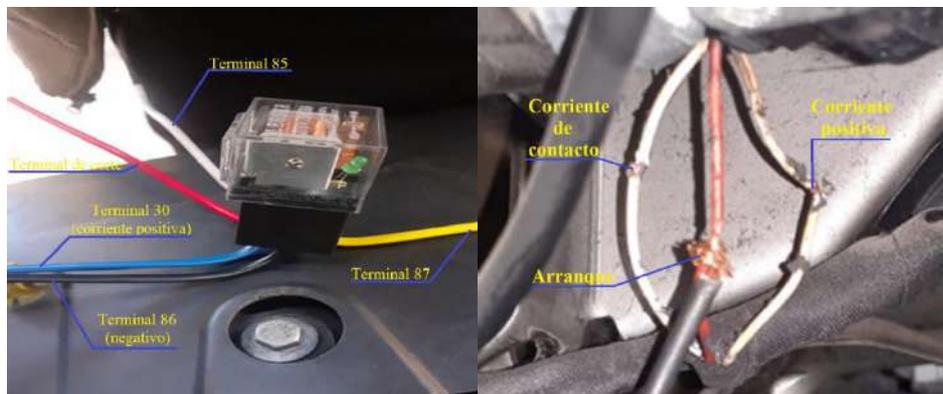
vehículo. Para determinar la fiabilidad del sistema se realizaron pruebas con diferente masa de soluto variando la solución acuosa en - 5% y +5% su composición.

### 3.2 Pruebas en el vehículo

#### 3.2.1 Instalación de un sistema generador de gas oxihidrógeno en el vehículo.

Se utilizó un multímetro para encontrar un relé que se activa cuando el vehículo está encendido, para emparejarlo con el positivo del tanque del sistema de hidrógeno. Se tenía pensado usar el relé de la bomba de combustible, sin embargo, este relé tardaba 28 segundos en apagarse, lo que representa un riesgo debido a que durante esos 28 segundos la celda de hidrógeno está trabajando. Para que el sistema de hidrógeno funcione sincrónicamente con el vehículo, se procedió a instalar un relé de 30 amperios en el switch de arranque; esto permitirá que la celda produzca hidrogeno solamente cuando el vehículo este encendido. En la Figura 3.12 se puede apreciar los terminales utilizados para la conexión relé y switch de arranque.

**Figura 26.12:** Terminales para conexión relé y switch de arranque



Fuente: Autores

El terminal 85 del relé están unidos al positivo del sistema de hidrógeno, mientras que el terminal 30 está unido a un diodo que va unido al cable rojo del arranque. El terminal 85 sirve de tierra, el terminal 30 es el que proporciona corriente al sistema, y va unido al cable de corriente de contacto. El circuito puede observarse en el Anexo 1.

La celda seca se colocó detrás de la persiana de entrada de aire alado del radiador, para fijar la celda de hidrógeno se utilizó amarras plásticas ya que son bastante resistentes y tienen un peso despreciable. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar la instalación de la celda de hidrogeno en el vehículo.

**Figura 27.13:** Instalación de celda de hidrógeno



Fuente: Autores

Debido a que la celda de oxihidrógeno es un dispositivo que no trabaja a altas temperaturas, se debe evitar colocar en un lugar poco refrigerado o en lugares con temperaturas altas; esto aumentará la vida útil y mejorará su rendimiento. El tanque de almacenamiento se colocó en la parte izquierda detrás del motor debido a que es un lugar de fácil acceso, además se puede tener un mejor control del nivel de solución acuosa presente en el depósito. Fue sujetado con amarras plásticas, tal como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

**Figura 28.14:** Instalación de celda de hidrógeno



Fuente: Autores

Este sistema trabaja en función de la gravedad, por lo que se colocó el tanque en la parte superior; esto permite que el agua descienda con facilidad, alimentando a la celda. El hidrógeno al ser un gas liviano puede ascender de la celda al burbujeador sin ningún problema.

### 3.2.2 Análisis de gases

Con la finalidad de adquirir mayor exactitud en la toma de datos, las pruebas de análisis de gases se realizaron con el vehículo en marcha, para lo cual se utilizó un banco de rodillos inercial modelo BPV1800 – N° 08-19 y un analizador de gases modelo QGA 6000.

#### 3.2.2.1 Equipos utilizados durante las pruebas de análisis de gases

Las características técnicas del dinamómetro inercial modelo BPV1800 – N° 08-19 se pueden apreciar en el apartado 3.3.1.

#### 3.2.2.2 Analizador de gases modelo QGA 6000

Este dispositivo tiene la capacidad de realizar dos tipos de mediciones: para los gases de CO, HC y CO<sub>2</sub> utiliza el método no dispersivo (NDIR), mientras que para los gases de O<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> utiliza el método de célula electroquímica. El rango de medición varía en función del gas analizado; en el caso del CO es de 0.00-9.99%, para el CO<sub>2</sub> es de 0.0-20.0% y para el O<sub>2</sub> es de 0.00-25.00%; las partes por millón de HC va desde 0 hasta 9999. El tiempo de respuesta de este instrumento es de 10 segundos, la cantidad de muestra que recoge es de 4 – 6 L/min. Este analizador de gas consume 50W (QROTECH, 2016).

**Figura 29.15:** Analizador de gases QGA 6000

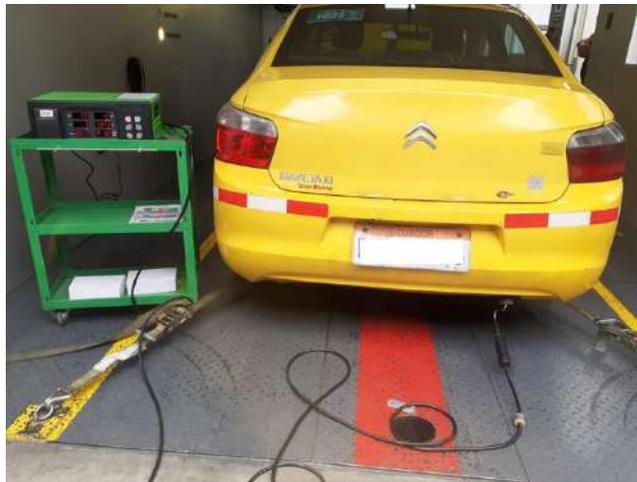


Fuente: Autores

### 3.2.2.3 Procedimiento realizado para la toma de datos analizador de gases

Se colocaron los neumáticos delanteros del vehículo sobre el dinamómetro inercial y, posteriormente, se sujetó con correas de sujeción para impedir el movimiento del automóvil. Para utilizar el analizador de gases se tomó en consideración un tiempo de espera de 5 minutos, luego se conectó el zonda de acero inoxidable en la salida del tubo de escape; esto se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** . A continuación, se procedió a calibrar las rpm del dinamómetro con las del vehículo.

**Figura 30.16:** Conexión de zonda de acero inoxidable en salida de tubo de escape



Fuente: Autores

La primera prueba se realizó sin la activación de la celda de hidrógeno; se aceleró el vehículo progresivamente hasta alcanzar 6000 rpm y se esperó hasta que el vehículo se desacelerara por completo. Posteriormente se activó la celda de hidrogeno y se realizó el mismo procedimiento.

### 3.2.3 Prueba en ruta (descripción prueba de ruta)

Las pruebas de ruta se realizaron utilizando las aceleraciones mostradas en el artículo de García et al. (2021) con la finalidad de estimar el consumo de combustible en el vehículo cuando este funciona en condiciones estándar y es alimentado con una celda de hidrógeno. Todos los detalles de la ruta se pueden apreciar en el anexo 6.

### 3.2.3.1 Equipos utilizados para determinar el consumo de combustible

Para la extracción de combustible se utilizó una bomba de combustible modelo 0442200007, una batería Energizer de 12V y un filtro de combustible. En la se puede apreciar el montaje realizado para la extracción de gasolina del tanque de almacenamiento de combustible.

**Figura 31.17:** Montaje de extracción de gasolina



Fuente: Autores

Para contrastar los resultados de las pruebas se utilizó la pantalla en el tablero de instrumentos del vehículo, que registra la distancia recorrida y la autonomía relacionada con el carburante.

### 3.2.3.2 Procedimiento realizado para las pruebas de ruta

Para realizar las pruebas en ruta se midió la cantidad de carburante con una jarra medidora de plástico. En el tanque de combustible se introdujeron 15 litros de gasolina extra como se pude visualizar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

**Figura 32.18:** Introducción de gasolina



Fuente: Autores

Posteriormente se colocó la pantalla del tablero de instrumentos en cero, como se puede apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

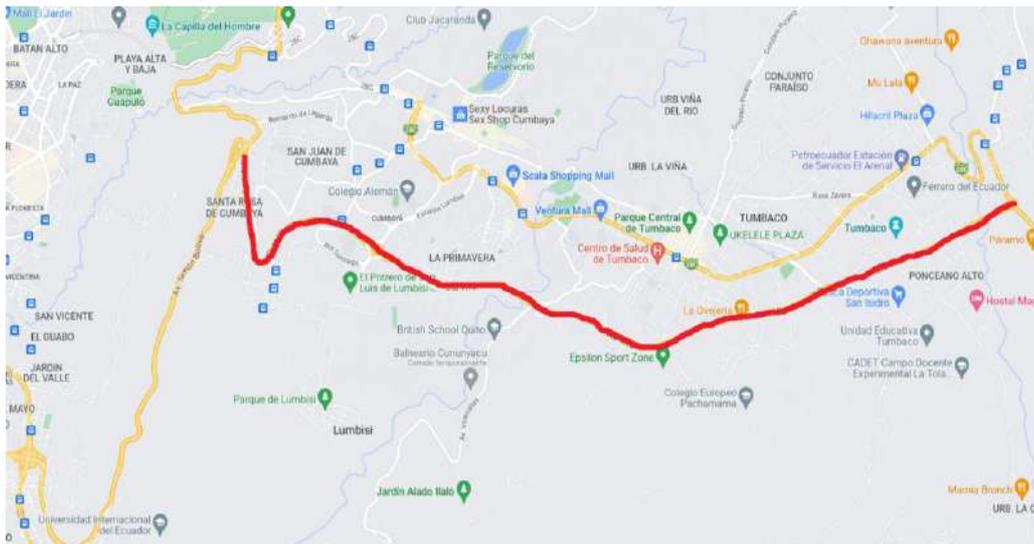
**Figura 33.19:** Disposición del tablero en cero



Fuente: Autores

La prueba en autopista se desarrolló a una velocidad superior a los 90 km/h. Toda la trayectoria se llevó a cabo en quinta marcha. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar la ruta realizada.

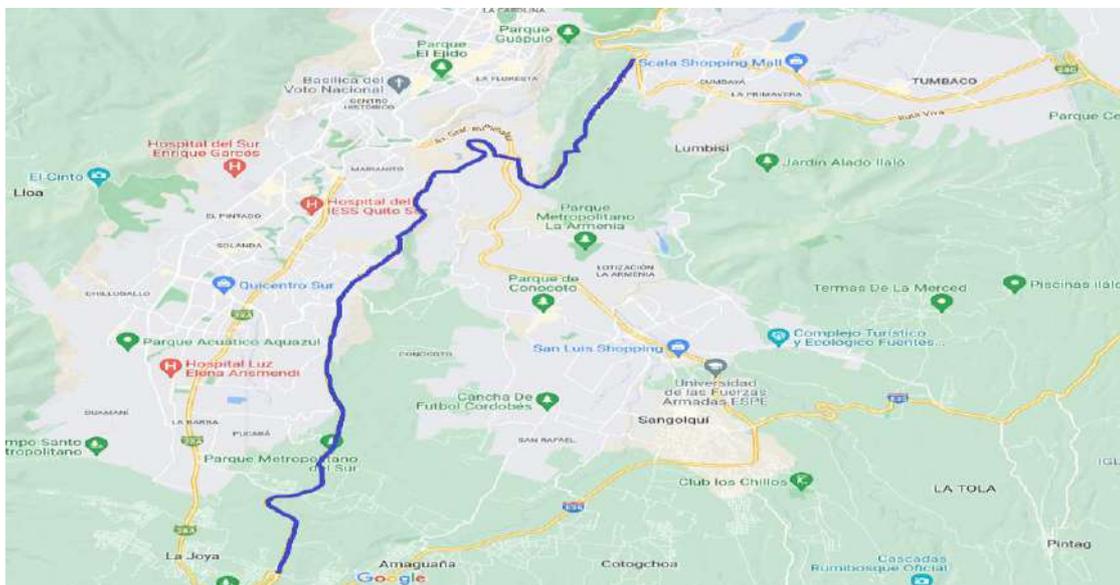
**Figura 34.20:** Ruta experimental en autopista



Fuente: Autores

La prueba en la trayectoria rural se desarrolló a una velocidad entre 60 km/h y 90 km/h. Toda la trayectoria se llevó a cabo en cuarta marcha. En la **¡Error! No se encuentra el origen de l a referencia.** se puede apreciar la ruta realizada.

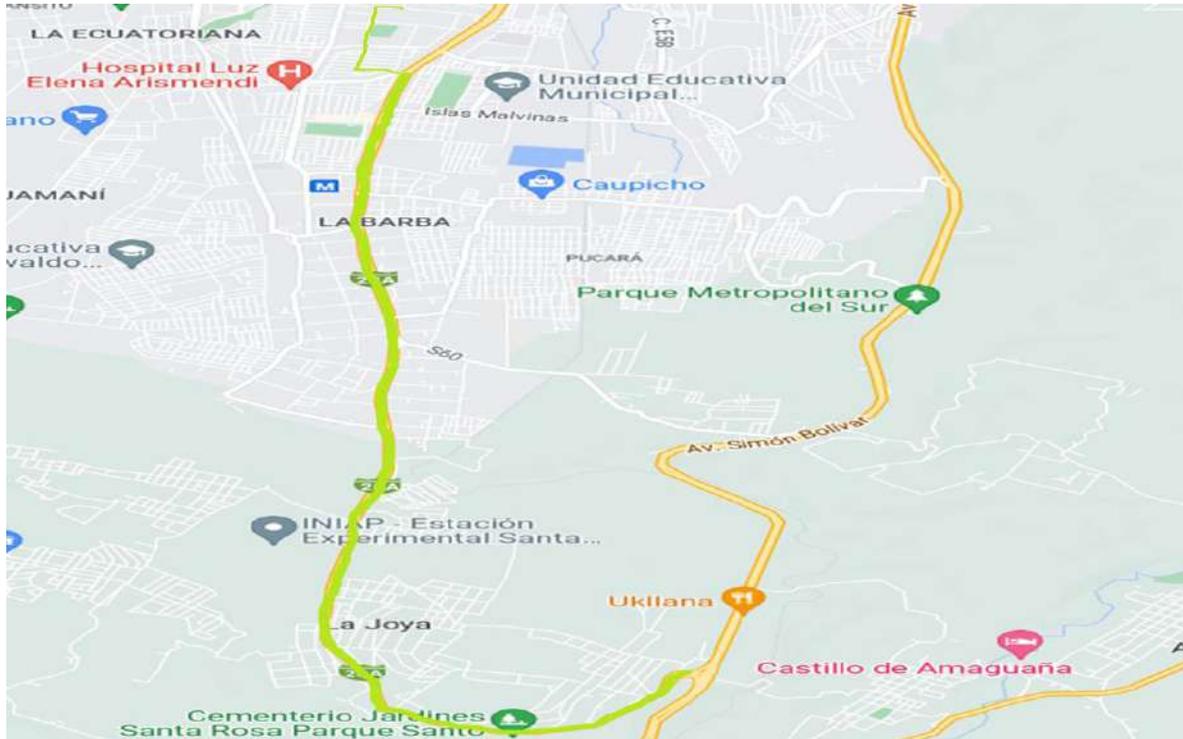
**Figura 35.21:** Ruta experimental rural



Fuente: Autores

La prueba en la trayectoria urbana se desarrolló a una velocidad menor a 60 km/h. Toda la trayectoria se llevó a cabo en tercera marcha. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar la ruta realizada.

**Figura 36.22:** Ruta experimental urbana



Fuente: Autores

### 3.3 Pruebas sobre dinamómetro de chasis

#### 3.3.1 Equipos utilizados durante las pruebas de dinamómetro de chasis.

El dinamómetro utilizado para la toma de datos está compuesto de un banco de rodillos inercial modelo BPV1800 – N° 08-19 con un sistema de cómputo SMAC. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar un esquema del banco de pruebas utilizado.

**Figura 37.23:** Banco de pruebas utilizado

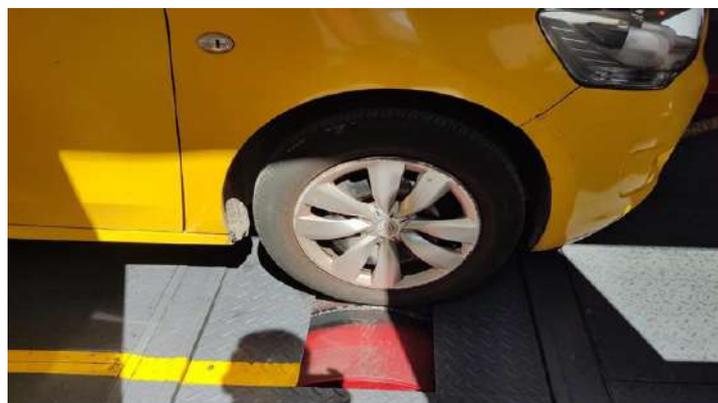


Fuente: Autores

#### 3.3.1.1 Banco de rodillos inercial modelo BPV1800 – N° 08-19

Este rodillo puede efectuar cálculos de potencia durante el periodo de aceleración. Este dispositivo evalúa la energía mediante un volante de inercia inmerso en el mismo, la masa inercial del rodillo nos permite evaluar la velocidad que se le suministra al vehículo y la potencia que se está utilizando al momento de acelerar. Los datos recolectados por el sistema son utilizados para estimar el torque aplicando (Mera et al., 2022).

**Figura 38.24:** Banco de rodillos inercial modelo BPV1800 – N° 08-19

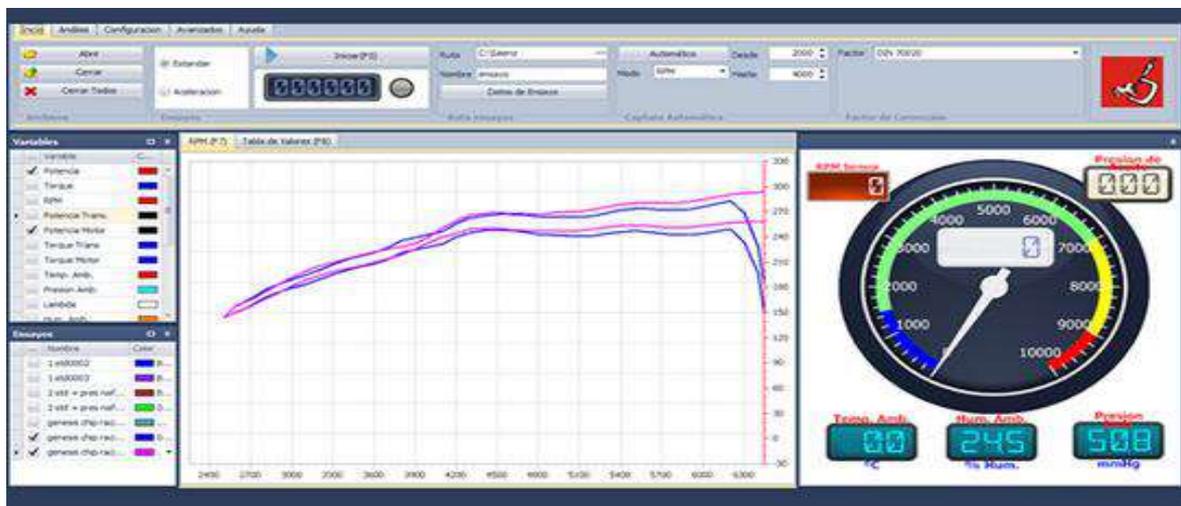


Fuente: Autores

### 3.3.1.2 Sistema de cómputo SMAC

La señal de ese sistema no se ve afectada por fuentes de ruido interno o externo, debido a que se comunica por fibra óptica; por ello, la toma de datos es de máxima precisión y rentabilidad. Su sensor inductivo permite emparejar las rpm del motor con el rodillo inercial de manera automática. Este software cuenta con una cantidad variable de canales básicos de medición, por lo que, además de brindar una lectura de rpm, toque y potencia, también se puede tener un análisis detallado de otros tipos de sensores, como sonda lambda, pirómetro, sensores de temperatura o presión, entre otros (Saenz, 2016).

**Figura 39.25:** Sistema de cómputo SMAC



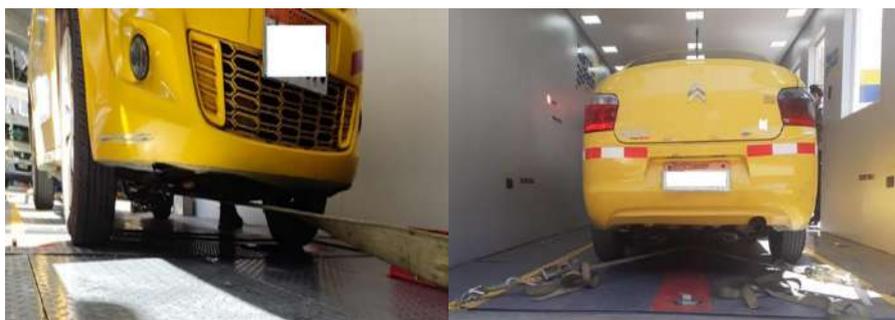
Fuente: (Saenz, 2016).

### 3.3.2 Procedimiento realizado para la toma de datos en el rodillo inercial.

En primer lugar, se colocaron los neumáticos delanteros en los dos lados del rodillo inercial para evitar movimientos aleatorios o desalineación del vehículo durante las pruebas. Se colocaron correas de sujeción tanto en la parte delantera como posterior, como se puede visualizar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

A continuación, se procedió a encender el vehículo y se aceleró hasta que las ruedas delanteras se sincronizaran correctamente con el rodillo de inercia. Luego se inició el sistema de cómputo SMAC y se comprobó que los rodillos se encontraran desbloqueados.

**Figura 40.26:** colocación de correas de sujeción



Fuente: Autores

Para que el software SMAC entregue datos exactos de torque y potencia en la prueba de aceleración, se seleccionó durante los ensayos la marcha con relación directa, que en el caso del Citroën C-Elysée es la cuarta marcha. Una vez que el vehículo ha alcanzado su máxima velocidad, se suelta el acelerador permitiendo que las ruedas motrices sigan su movimiento y desaceleren progresivamente. Una vez los neumáticos han dejado de girar, se debe realizar una segunda prueba, realizando el mismo procedimiento, y luego verificar los datos de las dos pruebas. Después, de que han completado las pruebas del vehículo en condiciones estándar, se procede a reiniciar el sistema de cómputo para un nuevo análisis. Para conectar la celda de oxihidrógeno se empareja el cable azul como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

**Figura 41.27:** emparejamiento cable positivo del sistema de hidrógeno



Fuente: Autores

Luego de haber terminado las dos pruebas con el vehículo enriquecido con mezcla de oxihidrógeno, el software SMAC presenta gráficas comparativas de las dos condiciones de trabajo del automóvil.

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### 4.1 Resultados de pruebas de laboratorio análisis sobre ciclo otto convencional

Para la toma de datos, en la primera prueba se utilizó 6,832g de hidróxido de potasio disuelto en un litro de agua destilada. En el análisis de la eficiencia de la celda seca de hidrógeno se realizó 10 pruebas con un voltaje inicial de 12 V, posteriormente se aumentó el voltaje en cada bloque de pruebas hasta alcanzar los 14,5 V. Todos los detalles se encuentran en el anexo 2.

**Tabla 4.1:** Eficiencia de la celda de hidrógeno con diferente voltaje y solución de 6,832g

<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Flujo másico (g/s)</b>	<b>Densidad (g/L)</b>	<b>Flujo volumétrico (L/S)</b>
12	4,215	30,20	0,026	8,60*10-4	0,804	1.069*10-3
12,5	4,115	30,24	0,026	8,59*10-4	0,804	1.068*10-3
13	3,905	30,26	0,031	0,0010	0,804	1.243*10-3
13,5	3,115	30,18	0,030	0,00099	0,804	1.231*10-3
14	3,875	30,15	0,054	0,0017	0,804	2.114*10-3
14,5	4,477	30,23	0,073	0,0024	0,804	2.985*10-3

Fuente: Autores

Como se puede apreciar en la tabla 4.1, la celda empieza a trabajar con un amperaje de 4,215 (A), pero, al suministrar un voltaje de 13,5 V este presenta una variación de corriente de - 26,1 %, esta pérdida de corriente se ve recuperada en los voltajes restantes, culminado el bloque de pruebas con un valor de 4,477 (A). La eficiencia de la celda mejora a medida que se aumenta el voltaje, incluso el flujo másico y flujo volumétrico es mayor cuando se suministra un voltaje de 14,5 V, adquiriendo una mayor cantidad de masa.

La celda seca de hidrógeno mejora su producción a medida que se aumenta el voltaje, sin embargo, esto se ve reflejado en la eficiencia energética, como se ilustra en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2:** Eficiencia energética de la prueba 1

Voltaje (V)	Revoluciones (rpm)	Potencia Celda (W)	Energía Consumida (J)	Potencia Vehículo (J)	Energía Recuperada (J)
12	1000	2,52	76,17	77,59	1,42
12,5	2000	10,46	315,36	319,29	3,93
13	3000	17,42	525,73	523,72	- 2,01
13,5	4000	22,48	680,24	722,14	41,89
14	5000	24,23	732,71	898,20	165,48
14,5	6000	20,08	606,41	657,22	50,80

Fuente: Autores

Al suministrar un mayor voltaje para la producción de gas oxihidrógeno se requiere de una mayor cantidad de potencia y por ende se aumenta el consumo de energía, sin embargo, como se observa en la tabla 4.2 a pesar de que hay un mayor consumo de energía, al comparar los resultados con la potencia del vehículo existe una cantidad determinada de energía recuperada en el sistema, excepto a 3000 revoluciones ya que en este ciclo de trabajo existe una pérdida de  $- 2,01$  J.

#### 4.1.1 Prueba con una solución de hidróxido de potasio de 6,493g

Para la toma de datos de la segunda prueba se utilizó 6.493 g de hidróxido de potasio disuelto en un litro de agua destilada. Para lo cual se analiza la eficiencia de la celda seca de hidrógeno de la misma manera que en la prueba anterior. Todos los detalles se encuentran en el anexo 3.

**Tabla 4.3:** Eficiencia de la celda de hidrógeno con diferente voltaje y solución de 6.493g

Voltaje (V)	Corriente (A)	Tiempo (s)	Masa (g)	Flujo másico (g/s)	Densidad (g/L)	Flujo volumétrico (L/s)
12	1.715	30.09	0.023	$7.64 \cdot 10^{-4}$	0,804	$9.502 \cdot 10^{-4}$
12,5	1.975	30.14	0.025	$8.29 \cdot 10^{-4}$	0,804	$1.031 \cdot 10^{-3}$
13	2.44	30.08	0.037	$1.23 \cdot 10^{-3}$	0,804	$1.529 \cdot 10^{-3}$
13,5	2.94	30.14	0.056	$1.85 \cdot 10^{-3}$	0,804	$2.30 \cdot 10^{-3}$
14	3.585	30.192	0.050	$1.65 \cdot 10^{-3}$	0,804	$2.052 \cdot 10^{-3}$
14,5	4.42	30.18	0.079	$2.61 \cdot 10^{-3}$	0,804	$3.246 \cdot 10^{-3}$

Fuente: Autores

En la tabla 4.3 se aprecia que la celda empieza a trabajar con un amperaje bajo de 1.715 (A), a diferencia de la prueba anterior el amperaje sube gradualmente con el aumento de voltaje llegando a culminar el bloque de pruebas con un valor de 4.42 (A), similar al voltaje registrado en la prueba anterior. La eficiencia de la celda fue mejorando a medida que se aumenta el voltaje, por ende, es así que el flujo másico y flujo volumétrico es mayor cuando se suministra un voltaje de 14,5 V adquiere una mayor cantidad de masa. La celda seca de hidrógeno mejora su producción a medida que se aumenta el voltaje, sin embargo, esto se ve influencia en la eficiencia energética (tabla 4.4).

**Tabla 4.4:** Eficiencia energética de la prueba 2

<b>Voltaje (V)</b>	<b>Revoluciones (rpm)</b>	<b>Potencia Celda (W)</b>	<b>Energía Consumida (J)</b>	<b>Potencia Vehículo (J)</b>	<b>Energía Recuperada (J)</b>
12	1000	2,47	74,54	77,59	3,05
12,5	2000	10,42	314,57	319,29	4,72
13	3000	17,30	521,42	523,72	2,3
13,5	4000	22,50	676,80	722,14	45,34
14	5000	24,02	723,96	898,20	174,24
14,5	6000	20,73	623,76	657,22	33,46

Fuente: Autores

Como se observa en la tabla 4.4 a diferencia de la prueba anterior en este bloque de pruebas al comparar los resultados de la energía consumida con los datos de la potencia del vehículo, existe una cantidad determinada de energía recuperada en todos los ciclos de trabajo, presentando una mayor ganancia a 5000 revoluciones.

#### **4.1.2 Prueba con una solución de hidróxido de potasio de 7.173 g**

Para la última toma de datos de la prueba, se utilizó 7,173g de hidróxido de potasio disuelto en un litro de agua destilada. Se vuelve a realizar las 10 pruebas antes realizadas para analizar la eficiencia de la celda seca de hidrógeno se empieza con un voltaje inicial de 12 V, posteriormente se aumentó el voltaje en cada bloque en un rango de 0.5 V hasta alcanzar los 14,5 V. Todos los detalles se encuentran en anexo 4.

**Tabla 4.5:** Eficiencia de la celda de hidrógeno con diferente voltaje y solución de 7.17 g

<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Flujo másico (g/s)</b>	<b>Densidad (g/L)</b>	<b>Flujo volumétrico (L/s)</b>
12	1.745	30.11	0.033	1.09*10 <sup>-3</sup>	0,804	1.355*10 <sup>-3</sup>
12,5	1.985	30.12	0.035	1.16*10 <sup>-3</sup>	0,804	1.442*10 <sup>-3</sup>
13	2.01	30.23	0.0695	2.299*10 <sup>-3</sup>	0,804	2.859*10 <sup>-3</sup>
13,5	2.06	30.10	0.042	1.39*10 <sup>-3</sup>	0,804	1.728*10 <sup>-3</sup>
14	2.24	30.01	0.038	1.26*10 <sup>-3</sup>	0,804	1.567*10 <sup>-3</sup>
14,5	2.435	30.15	0.065	2.15*10 <sup>-3</sup>	0,804	2.674*10 <sup>-3</sup>

Fuente: Autores

En la tabla 4.5 se observa que la celda empieza a trabajar con un amperaje de 1.745 (A), igual al amperaje de la prueba anterior, sin embargo, no culmina el bloque de pruebas con un amperaje tan elevado como los dos ensayos anteriores. La eficiencia de la celda mejora a medida que se aumenta el voltaje, sin embargo, desde el voltaje 13 V empieza a surgir un cambio inusual, pues, en este bloque de pruebas la masa se duplica en relación con el valor inicial, de igual manera su flujo másico y volumétrico, incluso superando al bloque de pruebas final de 14,5 V, esta irregularidad continua, ya que el voltaje 14 V presenta menor cantidad de masa que el voltaje 13. La celda seca de hidrógeno, aunque mejora su eficiencia a medida que se suministra una mayor cantidad de voltaje, también se aumenta el consumo de energía eléctrica, como se ilustra en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6:** Pérdida y regeneración de energía de la prueba 3.

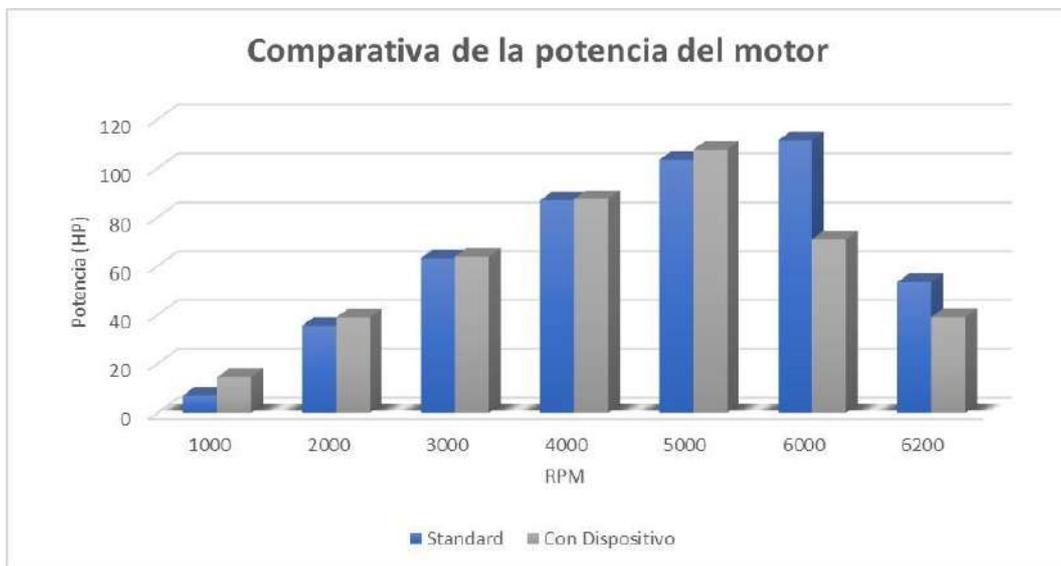
<b>Voltaje (V)</b>	<b>Revoluciones (rpm)</b>	<b>Potencia Celda (W)</b>	<b>Energía Consumida (J)</b>	<b>Potencia Vehículo (J)</b>	<b>Energía Recuperada (J)</b>
12	1000	2,58	77,68	77,59	- 0,009
12,5	2000	10,60	319,28	319,29	0,01
13	3000	17,32	523,63	523,72	0,09
13,5	4000	22,24	669,62	722,14	52,52
14	5000	24,15	724,74	898,20	173,46
14,5	6000	20,42	615,80	657,22	41,42

Fuente: Autores

Como se observa en la tabla 4.6 el vehículo pierde energía cuando trabaja a 1000 revoluciones, sin embargo, a medida que se aumentan las revoluciones este empieza a recuperar energía, alcanzando un máximo de 173,46 J.

En la Figura 4.1 se puede apreciar la eficiencia del vehículo cuando este funciona con aporte de gas oxihidrógeno en los diferentes ciclos de trabajo.

**Figura 42.1:** Comparación de potencia del motor Citroën C-elysee con características estándar de funcionamiento y alimentado con mezcla de oxihidrógeno



Fuente: Autores

Comparando los resultados mostrados en las pruebas realizadas en el laboratorio con las pruebas realizadas en el dinamómetro, se puede comprobar que existe un aporte de energía en el sistema cuando un vehículo trabaja con aporte de gas oxihidrógeno en el sistema.

## 4.2 Resultados de las pruebas sobre el vehículo

### 4.2.1 Pruebas en el analizador de gases

La primera prueba se realizó activando la celda de hidrógeno como se ilustra en la tabla 4.7, las mediciones se llevaron a cabo desde ralentí hasta alcanzar las 6000 revoluciones.

**Tabla 4.7:** Activación de la celda de hidrógeno

Revoluciones	CO	HC	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Lamda	AFR NO <sub>x</sub>
<b>1000</b>	0,38 – 0,41	50-63	11,9 – 13,8	2,24-1,16	1,08-1,40	16,2-15,2
<b>1500</b>	0,72	79	14,2	1,07	1,024	15,0
<b>2000</b>	2,75	119	14,6	0,59	0,949	13,9
<b>2500</b>	3,77	133	14,7	0,52	0,923	13,5
<b>3000</b>	4,10	143	14,5	0,46	0,913	13,4
<b>3500</b>	4,14	152	14,2	0,39	0,908	13,3
<b>4000</b>	4,23	154	14,0	0,32	0,933	13,8
<b>4500</b>	3,77	133	14,7	0,46	0,902	13,2
<b>5000</b>	4,59	126	13,9	0,32	0,896	13,1
<b>5500</b>	5,87	125	13,7	0,31	0,870	12,7
<b>6000</b>	7,18	126	12,2	0,29	0,834	12,2

Fuente: Autores

Como se aprecia en la tabla 4.7, los datos adquiridos en la primera prueba muestran que el vehículo presenta condiciones desfavorables, pues, los resultados presentan valores elevados a los establecido por la norma INEN. Para la segunda prueba se realizó el mismo procedimiento desarrollado en la primera prueba, pero, esta vez se desactivó la celda seca de hidrógeno para analizar los gases del vehículo en funcionamiento standard en la tabla 4.8 se ilustran los resultados de la prueba.

**Tabla 4.8:** Sin activación celda de hidrógeno

Revoluciones	CO	HC	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Lamda	AFR NO <sub>x</sub>
1000	0,40 – 0,42	49-61	11,8 – 14	2,21-1,18	1,06-1,38	16,7-15,4
1500	0,50	74	14,8	1,0	1,026	15,2
2000	2,75	112	14,6	0,46	0,932	13,7
2500	3,20	142	14,7	0,36	0,923	13,5
3000	3,83	388	14,5	0,33	0,907	13,3
3500	4,37	465	14,9	0,33	0,896	13,1
4000	3,88	285	15,2	0,32	0,912	13,4
4500	4,39	276	14,8	0,26	0,898	13,2
5000	4,14	240	14,8	0,26	0,904	13,2
5500	4,71	209	13,5	0,25	0,886	13,0
6000	7,21	275	13,8	0,21	0,846	12,5

Fuente: Autores

En la tabla 4.8, los valores de emisiones de gases reflejan un claro aumento de emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos y dióxido de carbono a medida que se incrementa las revoluciones del motor.

#### 4.2.2 Pruebas en ruta

La primera prueba se realizó con la activación de la celda de hidrógeno. Con la finalidad de estimar el consumo de combustible se drenó la gasolina del tanque de almacenamiento para colocar una cantidad determinada de combustible. En la toma de datos se utilizó la pantalla del tablero de instrumentos y software GPS logger (Anexo 6).

**Tabla 4.9:** Análisis pantalla de vehículo y drenado de combustible prueba 1

<b>Resultados utilizado celda de hidrógeno</b>			
<b>Análisis pantalla del vehículo</b>			
Kilómetros recorridos (km)	Tiempo	Litros colocados	Litros consumidos
65,9	01:03	15	5,6
<b>Análisis drenado de combustible y aplicación GPS Logger</b>			
Kilómetros recorridos (km)	Tiempo	Litros colocados	Litros consumidos
64,6	01:01	15	5,8

Fuente: Autores

Como se puede apreciar en la tabla 4.9, el tablero de instrumentos mostro un consumo de 5,6 litros en 65,9 km, sin embargo, al drenar el combustible del tanque de almacenamiento se pudo visualizar un consumo de 5,8 litros. La segunda prueba se desarrolló con el vehículo en funcionamiento standard, por lo que aplicó la misma trayectoria y ciclo de conducción realizadas en la primera prueba.

**Tabla 4.10:** Análisis pantalla de vehículo y drenado de combustible prueba 2

<b>Resultados vehículo rendimiento standard</b>			
<b>Análisis pantalla del vehículo</b>			
Kilómetros recorridos	Tiempo	Litros colocados	Litros consumidos
65,9	01:03	15	5,7
<b>Análisis drenado de combustible y aplicación GPS Logger</b>			
Kilómetros recorridos	Tiempo	Litros colocados	Litros consumidos
64,7	01:01	15	5,95

Fuente: Autores

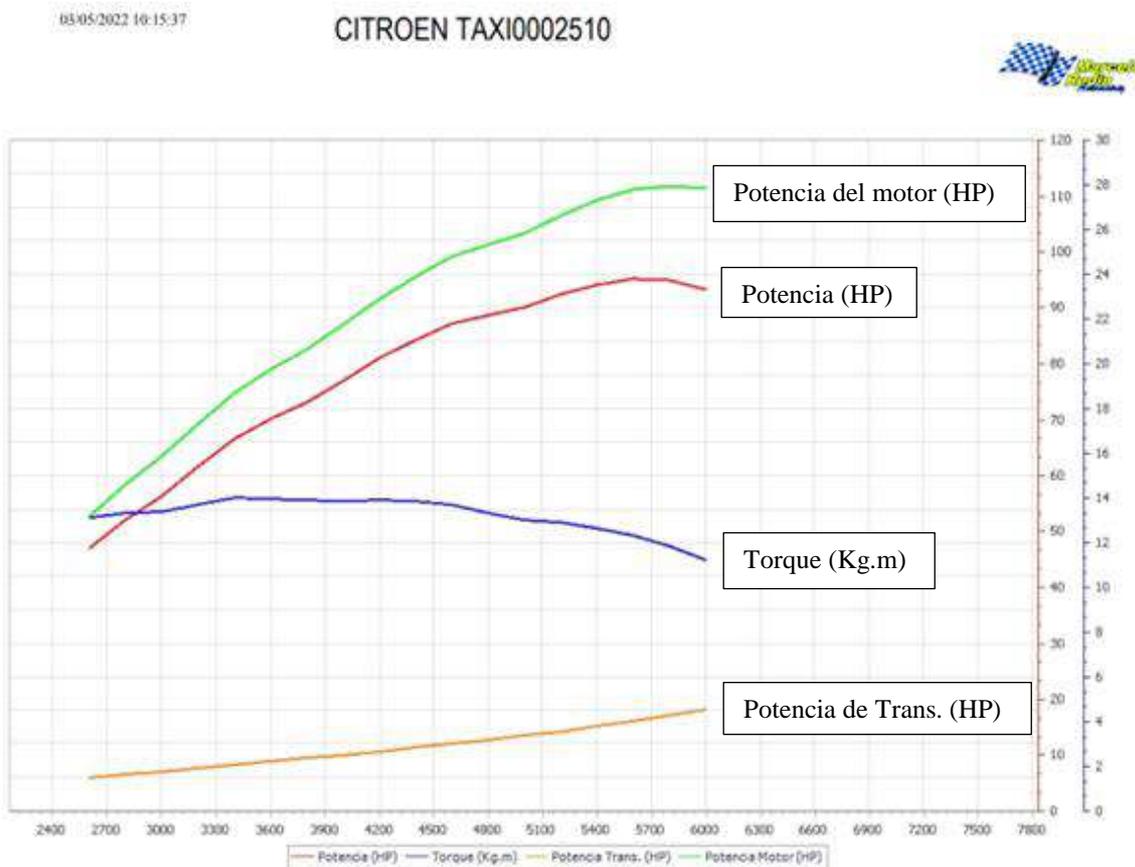
En la tabla 4.10 se observa que el tablero de instrumentos mostro un consumo de combustible de 5,7 litros un ligero aumento en comparación a la anterior prueba. Al realizar el drenado de combustible presentó un consumo de 5,95 litros, siendo, un mayor consumo de combustible.

### 4.3 Resultados de las pruebas en el dinamómetro

#### 4.3.1 Pruebas de torque y potencia

La primera prueba se realizó sin la activación del sistema de hidrógeno. Los resultados de esta prueba se muestran en la Figura 4.2.

**Figura 43.2:** Resultados de pruebas sin activación de sistema de hidrógeno



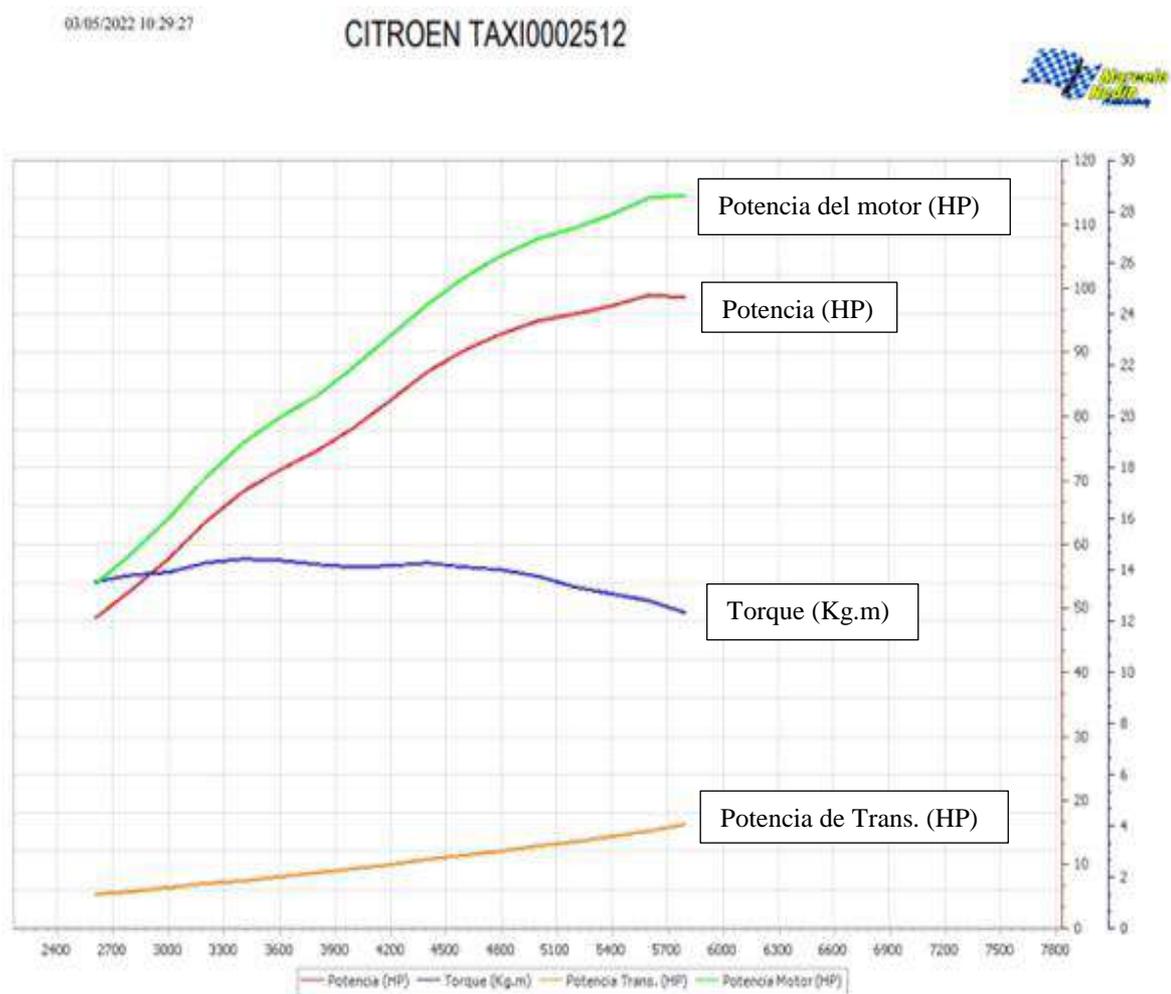
Fuente: Autores.

Como se muestra en la Figura 4.2, la potencia máxima en la rueda es de 95 (HP), esto se da cuando el vehículo está a 5800 revoluciones, de igual manera a las mismas revoluciones la

potencia máxima del motor es de 111,9 (HP); sin embargo, el torque del vehículo muestra un desempeño máximo a 3600 revoluciones dando como resultado 14,0 (Kg.m). La máxima pérdida de potencia que existe entre el motor y la rueda es de 18,7 (HP) esto se da a 6200 revoluciones.

La segunda prueba se realizó con la activación de la celda de hidrógeno los resultados se muestran en la Figura 4.3.

**Figura 44.3:** Torque y potencia Citroen C-elysee con características de funcionamiento a nivel del mar alimentado con mezcla de oxihidrógeno



Fuente: Autores.

Como se muestra en la Figura 4.3, la potencia máxima en la rueda es de 99 (HP), esto se da cuando el vehículo está a 5600 revoluciones, la potencia máxima es de 114,6 (HP) a 5800

revoluciones; sin embargo, el torque del vehículo muestra un desempeño máximo a 3400 revoluciones dando como resultado 14,4 (Kg/m). La máxima pérdida de potencia que existe entre el motor y la rueda es de 17,1 (HP) esto se da a 6000 revoluciones

### 4.3.2 Comparación de resultados de torque y potencia

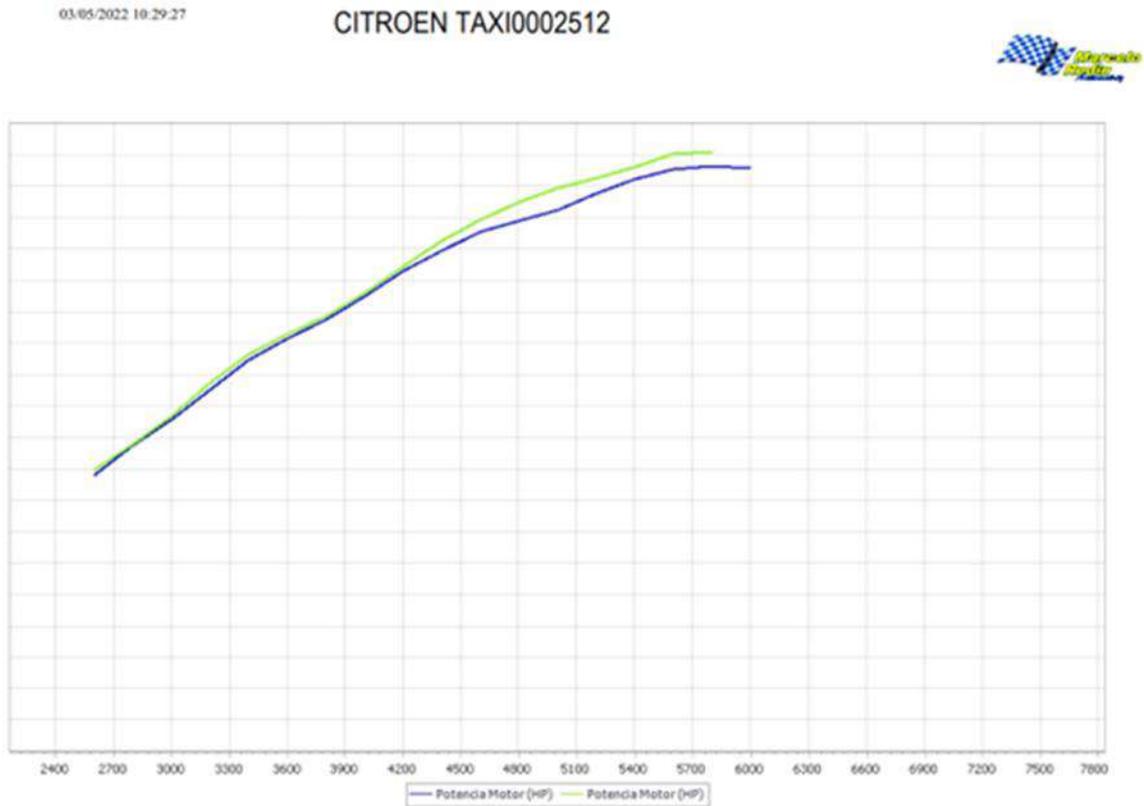
Una vez realizado las dos pruebas se procede a realizar una comparativa con los datos obtenidos en donde se puede observar la variación de cada prueba como se muestra en la tabla 4.11.

**Tabla 11.11:** Comparativa de resultados de torque y potencia

RPM	Standard				Con Dispositivo			
	Potencia (HP)	Potencia Motor (HP)	Potencia Trans. (HP)	Torque (Kg.m)	Potencia (HP)	Potencia Motor (HP)	Potencia Trans. (HP)	Torque (Kg.m)
2600	47	52.7	5.9	13.1	48	53.7	5.3	13.5
2800	52	58.4	6.4	13.3	53	58.6	5.8	13.8
3000	56	63.3	7.0	13.4	58	63.9	6.3	13.9
3200	61	69.1	7.6	13.7	63	70.3	6.9	14.3
3400	67	74.7	8.2	14.0	68	75.8	7.5	14.4
3600	70	78.8	8.8	14.0	72	79.7	8.1	14.3
3800	73	82.5	9.4	13.9	74	83.1	8.7	14.2
4000	77	86.9	10.0	13.8	78	87.5	9.3	14.1
4200	81	91.6	10.6	13.9	83	92.6	10.0	14.2
4400	84	95.6	11.3	13.8	87	97.5	10.7	14.3
4600	87	99.2	12.0	13.7	90	101.6	11.3	14.1
4800	89	101.3	12.7	13.3	93	105.0	12.0	14.0
5000	90	103.4	13.4	13.0	95	107.7	12.7	13.7
5200	92	106.6	14.2	12.9	96	109.6	13.5	13.3
5400	94	109.2	15.1	12.7	97	111.7	14.3	13.1
5600	95	111.2	16.0	12.3	99	114.2	15.2	12.8
5800	95	111.9	17.0	11.8	98	114.6	16.2	12.3
6000	93	111.4	18.2	11.2	54	71.0	17.1	6.5
6200	35	53.4	18.7	4.1	39	39.1	0.0	4.6
Promedio	82	99.4	17.0	10.4	77	90.1	12.6	9.9

Comparativa de torque y potencia con celda de hidrógeno. Fuente: Autores.

**Figura 45.4:** Comparación de torque y potencia Citroën C-elysee con características estándar de funcionamiento y alimentado con mezcla de oxihidrógeno.



Fuente: Autores.

Como se muestra en la Figura 4.4, el automóvil presenta un desempeño similar hasta las 4200 revoluciones, luego de las 4200 revoluciones hasta 6000 revoluciones el vehículo empieza a tener un mejor rendimiento.

## CONCLUSIONES

La implementación de un sistema de electrolisis de agua, no resulta ser una opción viable para ser implementado en un vehículo de combustión interna, pues, un automóvil con aporte de gas oxihidrógeno, a bajas revoluciones presenta similares características de funcionamiento al del vehículo con autonomía standard, para poder apreciar un aporte energético, se debe superar las 4200 revoluciones, lo cual resulta desfavorable puesto que el ciclo de conducción promedio no supera las 4000 revoluciones.

Como se puede apreciar en las tablas 4.2, 4.4 y 4.6 cuando se suministra un voltaje mayor, la potencia aumenta y por ende la energía consumida, sin embargo, al realizar la comparativa con los datos adquiridos en las pruebas de dinamómetro podemos observar que existe una determina cantidad de energía que el vehículo recupera en los diferentes ciclos de trabajo, mostrando una mayor ganancia cuando el automóvil trabaja a 5000 revoluciones.

Las pruebas realizadas en el analizador de gases muestran que un vehículo con aporte energético de gas oxihidrógeno a bajas revoluciones presentan un mayor aumento de hidrocarburos no combustionados y dióxido de carbono, sin embargo, a partir de 2000 revoluciones la ppm de los hidrocarburos no combustionados se reducen considerablemente y a partir de las 3000 revoluciones se reduce el porcentaje de dióxido de carbono.

Como se puede apreciar en las tablas del 4.7 al 4.10, cuando el vehículo trabaja en condiciones standard, este funciona con mezcla enriquecida, sin embargo, cuando se aporta gas oxihidrógeno al sistema, este reduce los valores de mezcla rica, permitiendo un ahorro de combustible, es decir, se produjo un ahorro de 0,15 litros en 64 kilómetros de recorrido.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda analizar el desempeño de la celda de hidrógeno aumentando la cantidad de soluto, ya que en este trabajo se trabajó con 6,832 g de hidróxido de potasio y una variación de 5% de la solución inicial, pero no se pudo apreciar un aumento significativo en la producción de hidrogeno.

Los materiales utilizados para la creación de la celda son tan importantes como el electrolito utilizado, por lo que se recomienda utilizar materiales que proporcione mayor intensidad de corriente al sistema, con la finalidad de aumentar el rendimiento de la celda seca de hidrógeno.

No se pudo utilizar el sistema OBD en el vehículo, debido a sus características europeas, por lo que se recomienda que para este tipo de proyecto se utilice automóviles que cumplan con estándares para una lectura de un sistema de diagnóstico, debido a que los datos adquiridos por estos sistemas son de gran precisión y puede ayudar a contrastar resultados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adam Equipment. (2008). *Adam Equipment Serie AQT*. Adam equipment Company.
- Aguado, R., Casteleiro, J. L., Jove, E., Zayas, F., Quintián, H., & Calvo, J. L. (2021). *Hidrógeno y su almacenamiento*. Coruña: Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións.
- Alconel, I. C. (2020). Oxidación en motores de encendido provocado con producción de oxígeno in-situ mediante membranas de separación. *Trabajo de fin de carrera*. Universitat Politècnica de València, València.
- Bausá, N. (2020). Electrolizadores de alta temperatura basados en cerámicas protónicas. *Tesis doctoral*. Universitat Politècnica de València, València. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/147114/Baus%20-%20Electrolizadores%20de%20alta%20temperatura%20basados%20en%20cer%20-%20micas%20prot%20nicas..pdf?sequence=1>
- Çenge, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica* (Sexta ed.). CDMX: McGraw Hill.
- Chiba, R. (2010). Síntese, processamento e caracterização das meia-células de óxido sólido catodo/eletrolito de manganito de lantânio dopado com estrôncio/ zircônia estabilizada com ítria. *Tesis doctoral*. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Sao Paulo. Obtenido de [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/43/130/43130530.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/130/43130530.pdf)
- Chisholm, G., & Cronin, L. (2016). Hydrogen from water electrolysis. *Elsevier*. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00016-6>
- Dawson, O. (21 de noviembre de 2013). *Difference Between Dry Cell and Wet Cell*. Recuperado el 06 de julio de 2022, de [DifferenceBetween.com: https://www.differencebetween.com/difference-between-dry-cell-and-wet-cell/](https://www.differencebetween.com/difference-between-dry-cell-and-wet-cell/)
- Duran, J., & Vargas, M. (2014). *Diseño y construcción de un generador de oxihidrógeno (HHO) para un motor de inyección electrónica*. Bogotá.
- Espinoza, A. A., & Uyaguari, F. E. (2020). Diseño de una celda de combustible utilizando materiales alternos para un vehículo monoplace de karting. *Proyecto técnico*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19399>
- Fernández, M. S. (2019). *Nueva propuesta de prototipo de sistema de alimentación y producción de hidrógeno para motores de combustión interna*. .

- García, R., Soriano, J., Fernández, P., Sánchez, L., Mata, C., Gómez, A., . . . Cárdenas, D. (2021). Impact of regulated pollutant emissions of Euro 6d-Temp light-duty diesel vehicles under real driving conditions. *Cleaner Production*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124927>
- Generalic, E. (20 de Octubre de 2018). *Lead-acid battery*. Obtenido de Croatian-English Chemistry Dictionary & Glossary.: <https://glossary.periodni.com>
- Gomendio, J. M. (2017). Descripción y Análisis Experimental de una pila DMFC. *Trabajo de fin de grado*. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Guerrero, W. S., & Pesantes, M. A. (2019). Optimización de la Producción de Energía de un Celda tipo PEM. *Proyecto de titulación*. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18045>
- H&C Weighing Systems. (2013). *Adam Equipment-PGL 4001-Precision Balance*. Recuperado el 24 de junio de 2022, de <https://www.affordablescales.com/adam-equipment/pgl-small-platform/pgl-4001.asp#>
- Herdoíza, D. (2022). *Diseño y construcción de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis*. Universidad Técnica de Ambato. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/35215>
- Jiménez, L. F., & Marín, E. A. (2021). Diseño e implementación de una celda de hidrógeno en un motor de combustión interna en el aciudad de Bogotá. *Proyecto curricular*. Universdiad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/28510/MarinMu%C3%B1ozEdison%2CJim%C3%A9nez%C3%A1rdenasLuis2021..pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Lanz, A., Heffel, J., & Messer, C. (2001). *Hydrogen fuel cell engines and related technologies*. United States: United States. Department of Transportation. Federal Transit Administration. Obtenido de [https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/14966/dot\\_14966\\_DS1.pdf](https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/14966/dot_14966_DS1.pdf)
- Mera, R. A., Veloz, J., & Jácome, W. G. (2022). Análisis de autonomía de un vehículo eléctrico categoría L1 en condiciones lineales y en altitud de la Universidad Internacional del Ecuador. *Trabajo de integración curricular*. Universidad Internacional del Ecuador, Quito. Obtenido de <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/5158>

- Millet, P., & Grigoriev, S. (2013). Water Electrolysis Technologies. *ScienceDirect*, 19-41. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56352-1.00002-7>
- Ortega, P., & Baltazar, M. (2020). *Diseño de un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen 1.5 L en la ciudad de Huancayo*. Huancayo.
- Pesántez, J. N., & Tacuri, J. V. (2021). Adaptación de un generador de hidrógeno tipo celda seca en un motor endotérmico 150cc de 4 tiempos como fuente alternativa de combustible. *Trabajo de titulación*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21256>
- Pozo, F. M. (2013). Comportamiento del hidróxido de sodio y potasio en función de la humedad y temperatura ambiental. *Tesis de grado*. Universidad Central del Ecuador, Quito. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/870>
- QROTECH. (06 de septiembre de 2016). *Automotive emission analyzer QGA - 6000 operating manual*. Recuperado el 04 de Julio de 2022
- Quezada, E. M., & Torres, D. F. (2014). Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo chevrolet steem 1.6L. *Tesis de grado*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Quezada, E. M., & Torres, D. F. (2014). Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo chevrolet steem 1.6L. *Tesis de grado*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7354>
- Quezada, E. M., & Torres, D. F. (2014). Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo chevrolet steem 1.6L. *Tesis de grado*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7354>
- Ramos, M. F. (2008-2009). *Hidrógeno aplicaciones en motores de combustion interna*. Barcelona.
- Reyes, G. G., Iñiguez, J. F., Pupiales, W. E., Soria, C. A., & Yépez, J. E. (2018). Estudio de emisiones contaminantes utilizando mezcla de gasolina e hidrógeno como combustible en un motor de combustión interna a 2800 m.s.n.m. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 19-28. doi:<https://doi.org/10.26423/rctu.v5i1.287>
- Rivas, S. V. (2009). Estudio de materiales metálicos y diseños de placas de flujo para celdas de combustible de membrana protónica. *Doctorado*. Centro de Investigación y

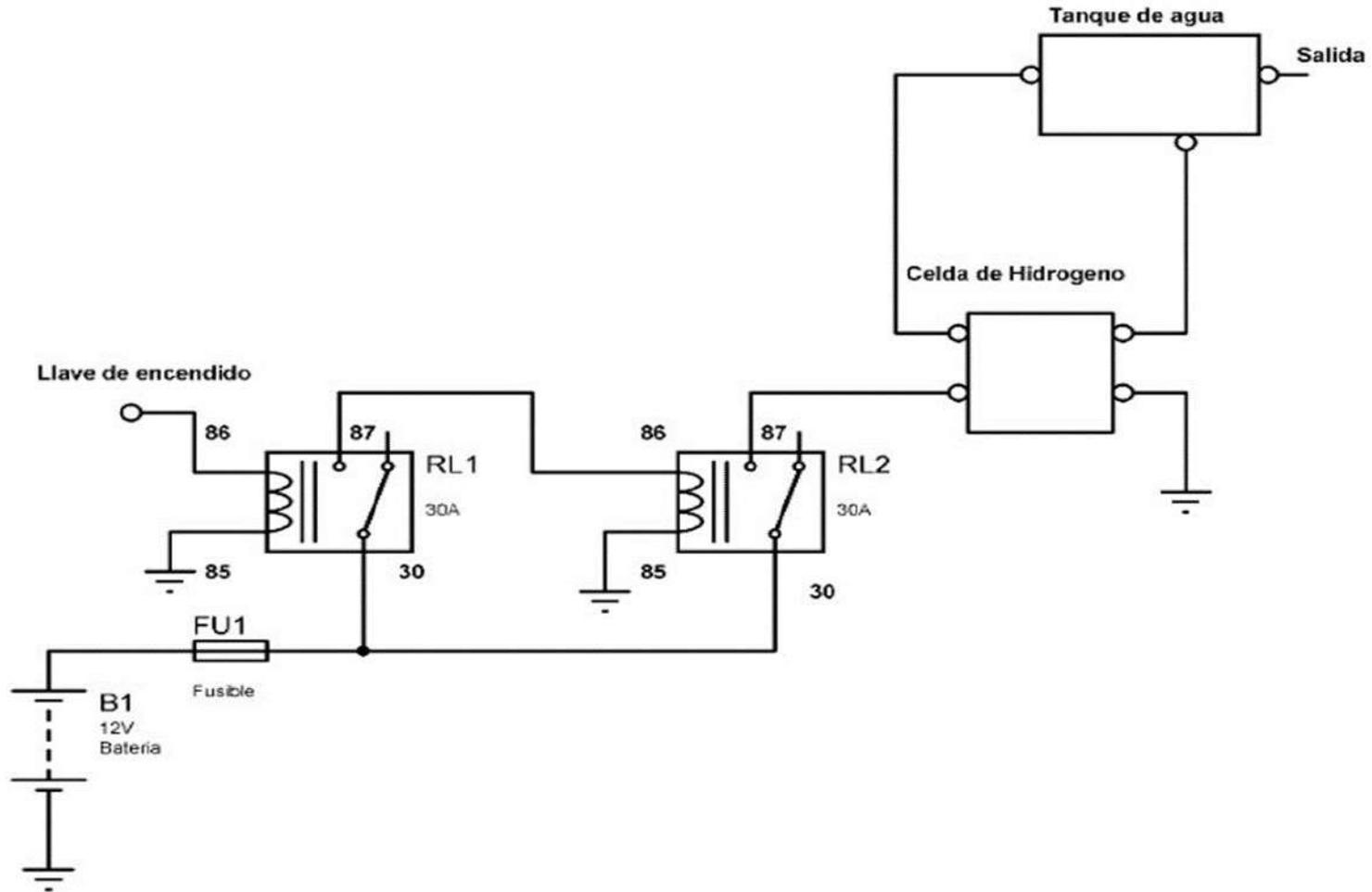
- Desarrollo Tecnológico en Electroquímica. Obtenido de <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/148/1/ESTUDIO%20DE%20MATERIALES%20MET%20C%20%81LICOS%20Y%20DISE%20C%20%91OS%20DE%20PLACAS%20DE%20FLUJO%20PARA%20CELIDAS%20PEM.pdf>
- Romero, J. (2018). Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción. *Tesis de grado*. Universidad de Valladolid, Valladolid. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31495/TFG-I-929.pdf;sequence=1>
- Romero, J. (2018). *Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción*. Valladolid.
- Rondán, J. M. (2016). Automatización, Operación y Caracterización de un Electrolizador AEM. *Trabajo de fin de grado*. Universidad de Sevilla, Sevilla. Obtenido de [https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/55154/TFG\\_Jos%20A9Mar%20ADaRond%20A1nGal%20A1n.pdf?sequence=1](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/55154/TFG_Jos%20A9Mar%20ADaRond%20A1nGal%20A1n.pdf?sequence=1)
- Rosati, M., & Aleiferis, P. (2009). Hydrogen SI and HCCI Combustion in a Direct-Injection Optical Engine. *JSTOR*, 2(1), 1710-1736. doi:<https://doi.org/10.4271/2009-01-1921>
- Saenz. (2016). *Banco de rodillos para karting, motos y cuatriciclos*. Recuperado el 29 de 06 de 2022, de <https://www.saenzdynos.com.ar/bco-rodillos-in-kart.php?lang=es>
- Sánchez, J. (2016). Utilización del oxihidrógeno como aditivo para incrementar el desempeño de un motor de combustión interna. *Tesis de grado*. Universidad de Costa Rica, San Pedro. Obtenido de <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2017/05/Tesis-JuanCarlosSanchez.pdf>
- Sánchez, M. (2019). Desarrollo y validación de un modelo para la simulación de sistemas de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Obtenido de [https://oa.upm.es/62567/1/MONICA\\_SANCHEZ\\_DELGADO.pdf](https://oa.upm.es/62567/1/MONICA_SANCHEZ_DELGADO.pdf)
- Selamet, Ö. F., Becerikli, F., Mat, M. D., & Kaplan, Y. (2011). Development and testing of a highly efficient proton exchange membrane (PEM) electrolyzer stack. *ScienceDirect*, 480-487. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.129>
- Taibi, E., Miranda, R., Carmo, M., & Blanco, H. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

- Test equipment depot. (06 de agosto de 2015). *datasheet Dual output DC power supply PS-303DU & PS-305DU*. Recuperado el 22 de junio de 2022, de [https://www.testequipmentdepot.com/unisource/pdf/ps-303du\\_305du\\_datasheet.pdf](https://www.testequipmentdepot.com/unisource/pdf/ps-303du_305du_datasheet.pdf)
- Toledo, M. (05 de septiembre de 2017). *Balanza analítica MS204*. Recuperado el 24 de junio de 2022, de [https://www.mt.com/es/es/home/products/Laboratory\\_Weighing\\_Solutions/analytical-balances/MS204.html](https://www.mt.com/es/es/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/analytical-balances/MS204.html)
- Torondel, A. D. (2021). Caracterización de electrodos de níquel dopados con nanopartículas de oro para la obtención de hidrógeno. *Trabajo de fin de grado*. Universitat Politècnica de València, València. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/174031/Torondel%20-%20CARACTERIZACION%20DE%20ELECTRODOS%20DE%20NIQUEL%20DOPADOS%20CON%20NANOPARTICULAS%20DE%20ORO%20PARA%20LA%20OBTE....pdf?sequence=1>
- Velásquez, J. J. (2020). La electrólisis del agua como propuesta de trabajo práctico para la promoción del uso de conceptos asociados a la conservación de la energía en estudiantes de ciclo V. *Mestría en Educación*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Vincent, I., Kruger, A., & Bessarabov, D. (2017). Development of efficient membrane electrode assembly for low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis. *ScienceDirect*, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.069>

## ANEXOS

### Anexo 1

Circuito eléctrico sistema electrólisis de agua



## Anexo 2

Prueba con una solución de hidróxido de potasio de 6,832 g

Prueba 6							
Voltaje de entrada		14,5		litro agua		1	
masa inicial del compuesto (g)		1050,6		masa agua		973,1 g	
masa hidróxido de potasio				Corriente		máximo 1.82	
Disolución de hidróxido de potasio		6,832 g				mínimo 0.95	

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,39	2,4000	2,427	0,0270	1.82	0.95
2	30,40	2,3521	2,427	0,0749	1.82	0.95
3	30,15	2,3334	2,427	0,0936	1.82	0.95
4	30,71	2,3489	2,427	0,0781	1.82	0.95
5	30,15	2,3741	2,427	0,0529	1.82	0.95
6	30,23	2,3923	2,427	0,0347	1.82	0.95
7	30,08	2,3393	2,427	0,0877	1.82	0.95
8	30,09	2,3426	2,427	0,0844	1.82	0.95
9	30,15	2,3195	2,427	0,1075	1.82	0.95
10	29,97	2,3300	2,427	0,0970	1.82	0.95
Total	302,32			Promedio	1.82	0.95
Promedio	30,232			0,0738	Promedio	1.384

Prueba 5						
<u>Voltaje de entrada</u>	14			<u>litro agua</u>	1	
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6			<u>Masa de agua</u>	973,1 g	
<u>Masa hidróxido de potasio</u>				<u>Corriente</u>	<u>Máximo</u>	2.11
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	6.832 g				<u>Mínimo</u>	1.35

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	29,93	2,5047	2,569	0,0643	2.11	1.35
2	30,19	2,5011	2,569	0,0679	2.11	1.35
3	30,27	2,5453	2,569	0,0237	2.11	1.35
4	30,12	2,4954	2,569	0,0736	2.11	1.35
5	30,32	2,4988	2,569	0,0702	2.11	1.35
6	30,12	2,5168	2,569	0,0522	2.11	1.35
7	30,19	2,5140	2,569	0,055	2.11	1.35
8	30,19	2,5419	2,569	0,0271	2.11	1.35
9	30,06	2,4900	2,569	0,079	2.11	1.35
10	30,06	2,5370	2,569	0,032	2.11	1.35
<u>Total</u>	301,45			<u>Promedio</u>	2.11	1.35
<u>Promedio</u>	30,15			0,0545	<u>Promedio</u>	1.730

Prueba 4							
<u>Voltaje de entrada</u>	13.5	<u>litro agua</u>	1				
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6	<u>masa agua</u>	973.1 g				
<u>masa hidróxido de potasio</u>		<u>Corriente</u>	<u>Máximo</u>	2.08			
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	6.832 g		<u>Mínimo</u>	1.25			

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,22	2,3919	2,442	0,0501	2.08	1.25
2	30,23	2,4179	2,442	0,0241	2.08	1.25
3	30,15	2,4207	2,442	0,0213	2.08	1.25
4	30,20	2,4025	2,442	0,0395	2.08	1.25
5	30,44	2,4174	2,442	0,0246	2.08	1.25
6	29,96	2,4080	2,442	0,034	2.08	1.25
7	30,26	2,4195	2,442	0,0225	2.08	1.25
8	30,11	2,4006	2,442	0,0414	2.08	1.25
9	30,17	2,4236	2,442	0,0184	2.08	1.25
10	30,03	2,4161	2,442	0,0259	2.08	1.25
<u>Total</u>	301,77			<u>Promedio</u>	2.08	1.25
<u>Promedio</u>	30,18			0,0302	<u>Promedio</u>	1.665

Prueba 3						
<u>Voltaje de entrada</u>	13			<u>litro agua</u>	1	
<u>masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6			<u>masa agua</u>	973.1 g	
<u>masa hidróxido de potasio</u>				<u>Corriente</u>	Máximo	1.83
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	6.832 g				Mínimo	0.85
Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,18	2,4817	2,507	0,0253	1.83	0.85
2	30,10	2,4733	2,507	0,0337	1.83	0.85
3	30,38	2,4540	2,507	0,053	1.83	0.85
4	30,33	2,4861	2,503	0,0169	1.83	0.85
5	30,16	2,4875	2,511	0,0235	1.83	0.85
6	30,37	2,4763	2,511	0,0347	1.83	0.85
7	30,48	2,4578	2,511	0,0532	1.83	0.85
8	30,07	2,4821	2,511	0,0289	1.83	0.85
9	30,17	2,4868	2,511	0,0242	1.83	0.85
10	30,34	2,4913	2,511	0,0197	1.83	0.85
<u>Total</u>	302,58			<u>Promedio</u>	1.83	0.85
<u>Promedio</u>	30,26			0,0313	<u>Promedio</u>	1.34

Prueba 2						
<u>Voltaje de entrada</u>	12.5	<u>litro agua</u>	1			
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6	<u>masa agua</u>	973.1 g			
<u>Masa hidróxido de potasio</u>		<u>Corriente</u>	Máxima		0.99	
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	6.832 g		<u>Mínima</u>		0.68	

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,23	2,5767	2,608	0,0313	1,94	1,91
2	29,92	2,5678	2,608	0,0402	2,01	1,98
3	30,32	2,5774	2,608	0,0306	1,97	1,94
4	30,18	2,5810	2,604	0,023	1,98	1,93
5	30,26	2,5798	2,604	0,0242	2	1,92
6	30,33	2,5822	2,604	0,0218	1,99	1,95
7	30,30	2,5805	2,604	0,0235	1,93	1,91
8	30,37	2,5769	2,604	0,0271	1,97	1,95
9	30,20	2,5810	2,604	0,023	2	1,97
10	30,32	2,5802	2,604	0,0238	2,04	1,98
<u>total</u>	302,43			<u>Promedio</u>	1,94	1,91
Promedio	30,24			0,0269	Promedio	0.836

Prueba 1

<u>Voltaje de entrada</u>	12	<u>litro agua</u>	4
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6	<u>masa agua</u>	973.1 g
<u>Masa hidróxido de potasio</u>		<u>Corriente</u>	<u>Máximo</u> 0.25
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	6.832 g		<u>Mínimo</u> 0.18

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,35	1,833	1,858	0,025	0.25	0.18
2	30,17	1,7317	1,751	0,0193	0.25	0.18
3	30,38	1,7283	1,749	0,0207	0.25	0.18
4	30,34	1,8175	1,854	0,0365	0.25	0.18
5	30,02	1,7287	1,753	0,0243	0.25	0.18
6	30,07	1,8155	1,846	0,0305	0.25	0.18
7	30,24	1,7344	1,751	0,0166	0.25	0.18
8	30,18	1,8183	1,840	0,0217	0.25	0.18
9	30,17	1,7913	1,835	0,0437	0.25	0.18
10	30,08	2,5841	2,608	0,0239	0.25	0.18
<u>total</u>	302			<u>Promedio</u>	0.25	0.18
<u>Promedio</u>	30,20			0,02622	<u>Promedio</u> 0.21	

Voltaje (V)	Peso molecular oxígeno	Peso molecular hidrógeno	Peso molecular H(HO)	Masa adquirida (g)	Mol gas oxihidrógeno	Masa oxígeno (g)	Masa hidrógeno (g)
12	15,9994	2,014	18,0134	0,02622	0,001455583	0,023288456	0,002931544
12,5	15,9994	2,014	18,0134	0,269	0,014933327	0,238924279	0,030075721
13	15,9994	2,014	18,0134	0,0313	0,001737595	0,027800483	0,003499517
13,5	15,9994	2,014	18,0134	0,0302	0,00167653	0,026823469	0,003376531
14	15,9994	2,014	18,0134	0,0545	0,003025525	0,048406592	0,006093408
14,5	15,9994	2,014	18,0134	0,0738	0,00409695	0,065548743	0,008251257

### Anexo 3

Prueba con una solución de hidróxido de potasio de 6,493 g

Prueba 1						
	Voltaje de entrada	12		litro agua	1	
	Masa inicial del compuesto (g)	1050.6		Masa de agua	973.1 g	
	Masa hidróxido de potasio			Corriente	Máxima	1.78
	Disolución de hidróxido de potasio	6.493 g			Mínima	1.65
Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,01	2,6092	2,632	0,0228	0.24	0.17
2	30,10	2,6237	2,630	0,0063	0.24	0.17
3	30,20	2,6050	2,630	0,025	0.24	0.17
4	30,11	2,6019	2,630	0,0281	0.24	0.17
5	30,07	2,6037	2,630	0,0263	0.24	0.17
6	30,09	2,6104	2,630	0,0196	0.24	0.17
7	30,06	2,6038	2,630	0,0262	0.24	0.17
8	30,03	2,6034	2,630	0,0266	0.24	0.17
9	30,05	2,6071	2,630	0,0229	0.24	0.17
10	30,19	2,6032	2,630	0,0268	0.24	0.17
Total	300,91			Promedio	0.24	0.17
Promedio	30,09			0,02306	Promedio	0.205

Prueba 2						
<u>Voltaje de entrada</u>	12.5			<u>litro agua</u>	1	
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6			<u>Masa de agua</u>	973.1 g	
<u>Masa hidróxido de potasio</u>				<u>Corriente</u>	<u>Máxima</u>	1.1
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	6.493 g				<u>Mínima</u>	0.57
Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,08	2,3361	2,358	0,022	1.1	0.57
2	30,21	2,3345	2,358	0,024	1.1	0.57
3	30,20	2,3394	2,358	0,019	1.1	0.57
4	29,98	2,3384	2,358	0,020	1.1	0.57
5	30,08	2,3408	2,358	0,017	1.1	0.57
6	30,07	2,3264	2,358	0,032	1.1	0.57
7	30,20	2,3353	2,358	0,023	1.1	0.57
8	30,11	2,3326	2,358	0,025	1.1	0.57
9	30,11	2,3242	2,358	0,034	1.1	0.57
10	30,36	2,3239	2,358	0,034	1.1	0.57
<u>Total</u>	301,4			<u>Promedio</u>	1.1	0.57
Promedio	30,14			0,025	Promedio	0.833

Prueba 3

<u>Voltaje de entrada</u>	13	<u>litro agua</u>	1
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6	<u>Masa de agua</u>	973.1 g
<u>Masa hidróxido de potasio</u>		<u>Corriente</u>	<u>Máxima</u> 1.8
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	6.493 g		<u>Mínima</u> 0.86

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	29,95	2,4166	2,444	0,0274	1.8	0.86
2	30,02	2,4150	2,444	0,029	1.8	0.86
3	30,05	2,4121	2,444	0,0319	1.8	0.86
4	30,06	2,4129	2,444	0,0311	1.8	0.86
5	30,11	2,4170	2,444	0,027	1.8	0.86
6	30,01	2,3895	2,444	0,0545	1.8	0.86
7	30,42	2,3936	2,444	0,0504	1.8	0.86
8	30,05	2,4189	2,444	0,0251	1.8	0.86
9	30,00	2,3900	2,444	0,054	1.8	0.86
10	30,17	2,3982	2,444	0,0458	1.8	0.86
<u>Total</u>	300,84			<u>Promedio</u>	1.8	0.86
Promedio	30,08			0,0376	Promedio	1.330

Prueba 4

<u>Voltaje de entrada</u>	13.5	<u>litro agua</u>	1	
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6	<u>Masa de agua</u>	973.1 g	
<u>Masa hidróxido de potasio</u>		<u>Corriente</u>	<u>Máxima</u>	2.1
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	6.493 g		<u>Mínima</u>	1.23

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,20	2,5770	2,640	0,063	2.1	1.23
2	30,01	2,5715	2,640	0,069	2.1	1.23
3	30,08	2,5936	2,640	0,046	2.1	1.23
4	30,34	2,5749	2,640	0,065	2.1	1.23
5	30,05	2,5974	2,640	0,043	2.1	1.23
6	30,19	2,5770	2,640	0,063	2.1	1.23
7	29,98	2,5814	2,640	0,059	2.1	1.23
8	30,08	2,5993	2,640	0,041	2.1	1.23
9	30,18	2,5707	2,640	0,069	2.1	1.23
10	30,29	2,5975	2,640	0,043	2.1	1.23
<u>Total</u>	301,40			<u>Promedio</u>	2.1	1.23
Promedio	30,14			0,056	Promedio	1.66

Prueba 5						
<u>Voltaje de entrada</u>	14			<u>litro agua</u>	1	
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6			<u>Masa de agua</u>	973.1 g	
<u>Masa hidróxido de potasio</u>				<u>Corriente</u>	<u>Máxima</u>	2.0
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	6.493 g				<u>Mínima</u>	1.43

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,17	3,3044	3,344	0,0396	2.0	1.43
2	30,32	3,2886	3,344	0,0554	2.0	1.43
3	30,2	3,2996	3,344	0,0444	2.0	1.43
4	30,19	3,3056	3,344	0,0384	2.0	1.43
5	30,12	3,2986	3,344	0,0454	2.0	1.43
6	30,05	3,3078	3,344	0,0362	2.0	1.43
7	30,14	3,2881	3,344	0,0559	2.0	1.43
8	30,32	3,2640	3,344	0,08	2.0	1.43
9	30,17	3,2891	3,344	0,0549	2.0	1.43
10	30,24	3,2867	3,344	0,0573	2.0	1.43
<u>Total</u>	301,92			<u>Promedio</u>	2.0	1.43
<u>Promedio</u>	30,192			0,05075	<u>Promedio</u>	1.715

Prueba 6						
<u>Voltaje de entrada</u>	14.5			<u>litro agua</u>	1	
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6			<u>Masa de agua</u>	973.1 g	
<u>Masa hidróxido de potasio</u>				<u>Corriente</u>	<u>Máxima</u>	1.67
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	6.493 g				<u>Mínima</u>	1.19
Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,30	2,6289	2,684	0,0551	1.67	1.19
2	30,14	2,6117	2,684	0,0723	1.67	1.19
3	30,22	2,6000	2,684	0,084	1.67	1.19
4	30,28	2,6025	2,684	0,0815	1.67	1.19
5	30,10	2,5927	2,684	0,0913	1.67	1.19
6	30,05	2,5851	2,684	0,0989	1.67	1.19
7	30,17	2,5888	2,684	0,0952	1.67	1.19
8	30,17	2,5783	2,684	0,1057	1.67	1.19
9	30,34	2,6295	2,684	0,0545	1.67	1.19
10	30,07	2,6301	2,684	0,0539	1.67	1.19
<u>Total</u>	301,84			<u>Promedio</u>	1.67	1.19
Promedio	30,18			0,07924	Promedio	1.429

Voltaje (V)	Peso molecular oxígeno	Peso molecular hidrógeno	Peso molecular H(HO)	Masa adquirida (g)	Mol gas oxihidrógeno	Masa oxígeno (g)	Masa hidrógeno (g)
12	15,9994	2,014	18,0134	0,02306	0,001280158	0,020481762	0,002578238
12,5	15,9994	2,014	18,0134	0,025	0,001387856	0,022204859	0,002795141
13	15,9994	2,014	18,0134	0,0376	0,002087335	0,033396107	0,004203893
13,5	15,9994	2,014	18,0134	0,056	0,003108797	0,049738883	0,006261117
14	15,9994	2,014	18,0134	0,05075	0,002817347	0,045075863	0,005674137
14,5	15,9994	2,014	18,0134	0,07924	0,004398947	0,07038052	0,00885948

#### Anexo 4

Prueba con una solución de hidróxido de potasio de 7.173 g

Prueba 1						
<u>Voltaje de entrada</u>	12	<u>litro agua</u>	1			
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6	<u>Masa de agua</u>	973.1 g			
<u>Masa hidróxido de potasio</u>		<u>Corriente</u>	<u>Máxima</u>	0.26		
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	7.173		<u>Mínima</u>	0.17		

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,46	2,4067	2,436	0,0293	0.26	0.17
2	29,84	2,4044	2,436	0,0316	0.26	0.17
3	30,01	2,4056	2,436	0,0304	0.26	0.17
4	30,05	2,4057	2,436	0,0303	0.26	0.17
5	30,03	2,3999	2,436	0,0361	0.26	0.17
6	30,13	2,4012	2,436	0,0348	0.26	0.17
7	30,29	2,4097	2,436	0,0263	0.26	0.17
8	30,27	2,4008	2,436	0,0352	0.26	0.17
9	29,99	2,3999	2,436	0,0361	0.26	0.17
10	30,04	2,3957	2,436	0,0403	0.26	0.17
<u>Total</u>	301,11			<u>Promedio</u>	0.26	0.17
promedio	30,111			0,0330	Promedio	0.215

Prueba 2						
<u>Voltaje de entrada</u>	12.5	<u>litro agua</u>	1			
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6	<u>Masa de agua</u>	973.1 g			
<u>Masa hidróxido de potasio</u>		<u>Corriente</u>	Máxima	0.99		
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	7.173		Mínima	0.7		

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,02	2,3367	2,374	0,0373	0.99	0.7
2	30,06	2,3434	2,374	0,0306	0.99	0.7
3	30,06	2,3332	2,374	0,0408	0.99	0.7
4	30,2	2,3324	2,374	0,0416	0.99	0.7
5	30,3	2,3398	2,374	0,0342	0.99	0.7
6	30	2,3319	2,374	0,0421	0.99	0.7
7	30,4	2,3393	2,374	0,0347	0.99	0.7
8	29,91	2,3429	2,374	0,0311	0.99	0.7
9	30,21	2,3462	2,374	0,0278	0.99	0.7
10	30,05	2,3412	2,374	0,0328	0.99	0.7
<u>Total</u>	301,21			<u>Promedio</u>	0.99	0.7
<u>promedio</u>	30,121			0,0353	Promedio	0.848

Prueba 3							
<u>Voltaje de entrada</u>	13			<u>litro agua</u>	1		
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6			<u>Masa de agua</u>	973.1 g		
<u>Masa hidróxido de potasio</u>				<u>Corriente</u>	<u>Máxima</u>	1.83	
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	7.173				<u>Mínima</u>	0.84	
Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min	
1		30,29	2,2609	2,290	0,0291	1.83	0.84
2		30,19	2,2476	2,290	0,0424	1.83	0.84
3		30,4	2,2547	2,290	0,0353	1.83	0.84
4		30,38	2,2451	2,290	0,0449	1.83	0.84
5		29,96	2,2444	2,290	0,0456	1.83	0.84
6		29,91	2,5318	2,290	0,2418	1.83	0.84
7		30,15	2,4605	2,365	0,0955	1.83	0.84
8		30,09	2,4028	2,380	0,0228	1.83	0.84
9		30,65	2,3784	2,385	0,0066	1.83	0.84
10		30,31	2,2966	2,428	0,1314	1.83	0.84
<u>Total</u>		302,33		<u>Promedio</u>		1.83	0.84
<u>Promedio</u>		30,233			0,0695	<u>Promedio</u>	1.332

Prueba 4						
<u>Voltaje de entrada</u>	13.5	<u>litro agua</u>	1			
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6	<u>Masa de agua</u>	973.1 g			
<u>Masa hidróxido de potasio</u>		<u>Corriente</u>	<u>Máxima</u>	2.1		
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	7.173		<u>Mínima</u>	1.19		
Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,2	2,5068	2,547	0,0402	2.1	1.19
2	29,94	2,5108	2,547	0,0362	2.1	1.19
3	30,16	2,4964	2,547	0,0506	2.1	1.19
4	30,24	2,5116	2,545	0,0334	2.1	1.19
5	30,07	2,5072	2,545	0,0378	2.1	1.19
6	30,05	2,5054	2,545	0,0396	2.1	1.19
7	30,14	2,5071	2,545	0,0379	2.1	1.19
8	30,35	2,4992	2,545	0,0458	2.1	1.19
9	30	2,4962	2,550	0,0538	2.1	1.19
10	29,94	2,5032	2,550	0,0468	2.1	1.19
<u>Total</u>	301,09			<u>promedio</u>	2.1	1.19
promedio	30,109			0,0422	Promedio	1.647

Prueba 5						
<u>Voltaje de entrada</u>	14	<u>litro agua</u>	1			
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6	<u>Masa de agua</u>	973.1 g			
<u>Masa hidróxido de potasio</u>		<u>Corriente</u>	<u>Máxima</u>	2.2		
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	7.173		<u>Mínima</u>	1.25		

Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30,02	2,3931	2,429	0,0359	2.2	1.25
2	30,1	2,3895	2,429	0,0395	2.2	1.25
3	30,21	2,3925	2,429	0,0365	2.2	1.25
4	29,87	2,3877	2,429	0,0413	2.2	1.25
5	29,96	2,3927	2,429	0,0363	2.2	1.25
6	29,99	2,3917	2,429	0,0373	2.2	1.25
7	30,08	2,3912	2,429	0,0378	2.2	1.25
8	30	2,3918	2,429	0,0372	2.2	1.25
9	29,94	2,3962	2,434	0,0378	2.2	1.25
10	29,94	2,3916	2,434	0,0424	2.2	1.25
<u>Total</u>	300,11			<u>Promedio</u>	2.2	1.25
<u>promedio</u>	30,011			0,0382	<u>Promedio</u>	1.725

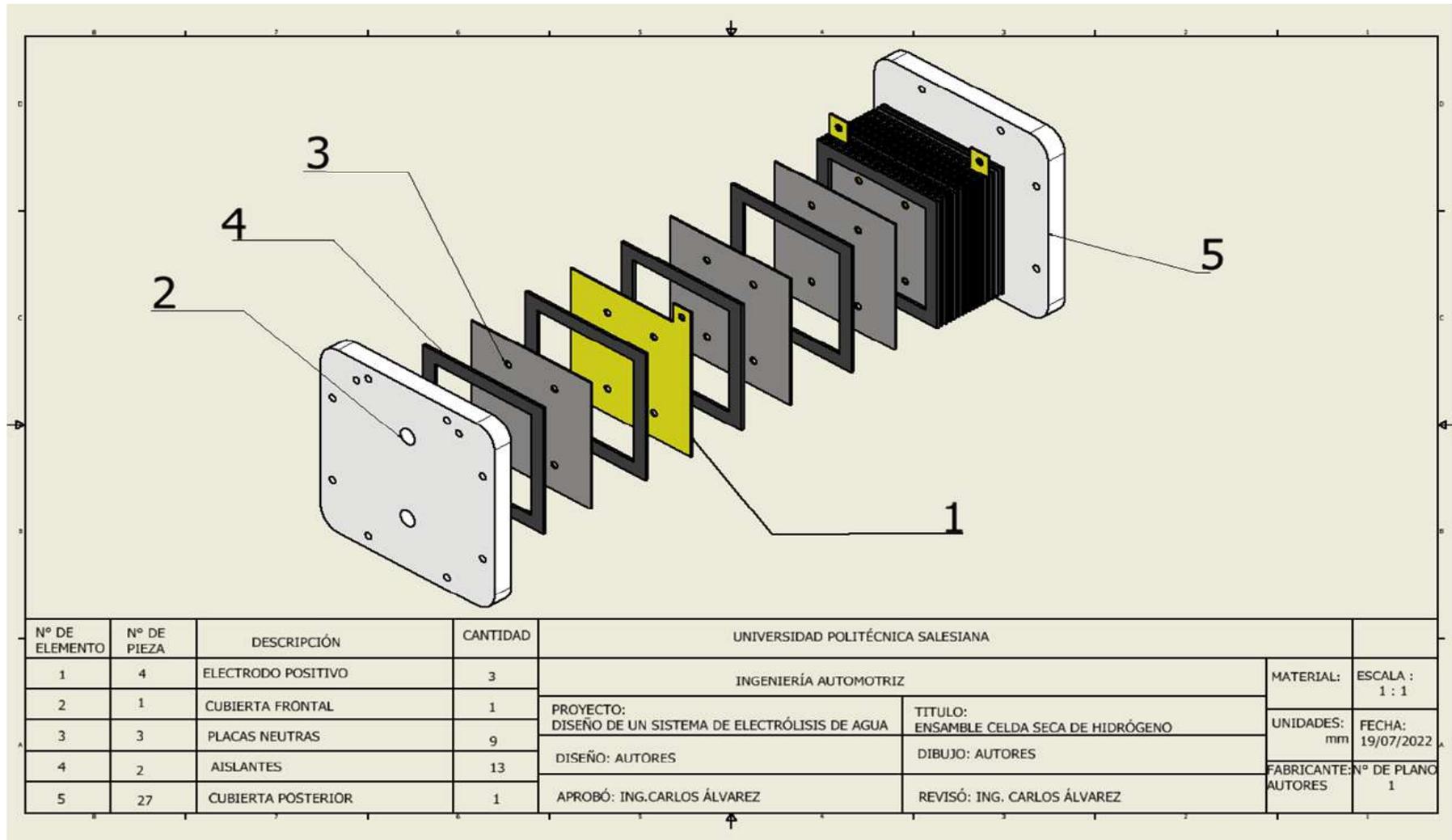
Prueba 6

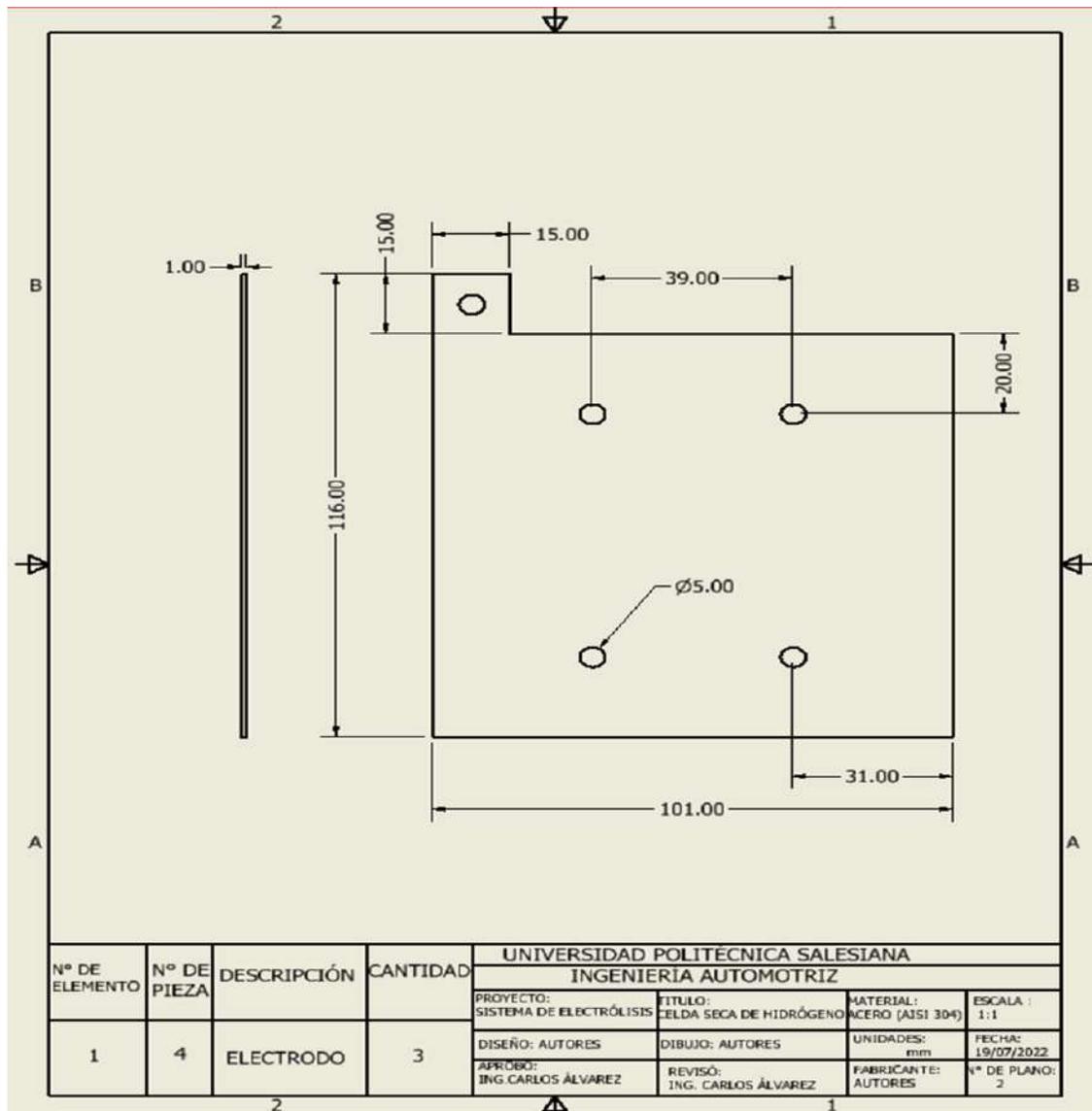
<u>Voltaje de entrada</u>	14.5	<u>Litro de agua</u>	1			
<u>Masa inicial del compuesto (g)</u>	1050.6	<u>Masa de agua</u>	973.1 g			
<u>Masa hidróxido de potasio</u>		<u>Corriente</u>	<u>Máxima</u>	1.71		
<u>Disolución de hidróxido de potasio</u>	7.173		<u>Mínima</u>	1.1		
Prueba	Tiempo	Masa medida (gramos)	Masa inicial del globo (gramos)	Masa adquirida	Amperaje Max	Amperaje Min
1	30	2,3137	2,378	0,0643	1.71	1.1
2	30,15	2,3220	2,378	0,0560	1.71	1.1
3	30,23	2,3174	2,372	0,0546	1.71	1.1
4	30,14	2,3062	2,372	0,0658	1.71	1.1
5	30,09	2,3071	2,372	0,0649	1.71	1.1
6	30,25	2,3049	2,372	0,0671	1.71	1.1
7	30,03	2,3105	2,372	0,0615	1.71	1.1
8	30,07	2,3077	2,372	0,0643	1.71	1.1
9	30,34	2,2997	2,381	0,0813	1.71	1.1
10	30,27	2,3087	2,381	0,0723	1.71	1.1
<u>Total</u>	301,57			<u>Promedio</u>	1.71	1.1
<u>Promedio</u>	30,157			0,0652	<u>Promedio</u>	1.408

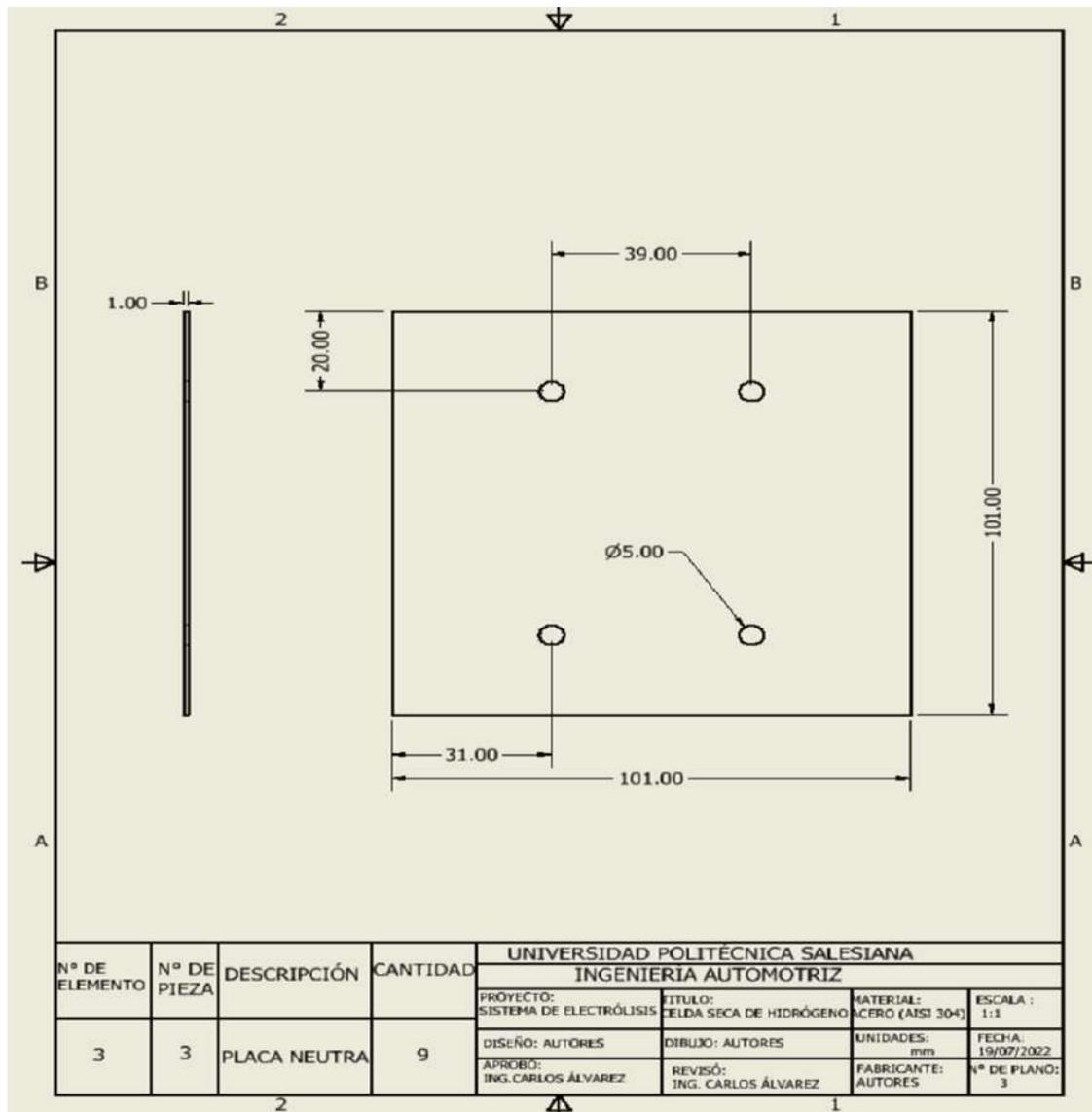
Voltaje (v)	Peso molecular oxígeno	Peso molecular hidrógeno	Peso molecular H(HO)	Masa adquirida (g)	Mol gas oxihidrógeno	Masa oxígeno (g)	Masa hidrógeno (g)
12	15,9994	2,014	18,0134	0,033	0,00183197	0,029310413	0,003689587
12,5	15,9994	2,014	18,0134	0,035	0,001942998	0,031086802	0,003913198
13	15,9994	2,014	18,0134	0,0652	0,003619527	0,026823469	0,007289729
13,5	15,9994	2,014	18,0134	0,042	0,002331598	0,037304162	0,004695838
14	15,9994	2,014	18,0134	0,038	0,002109541	0,033751385	0,004248615
14,5	15,9994	2,014	18,0134	0,065	0,003608425	0,057732632	0,007267368

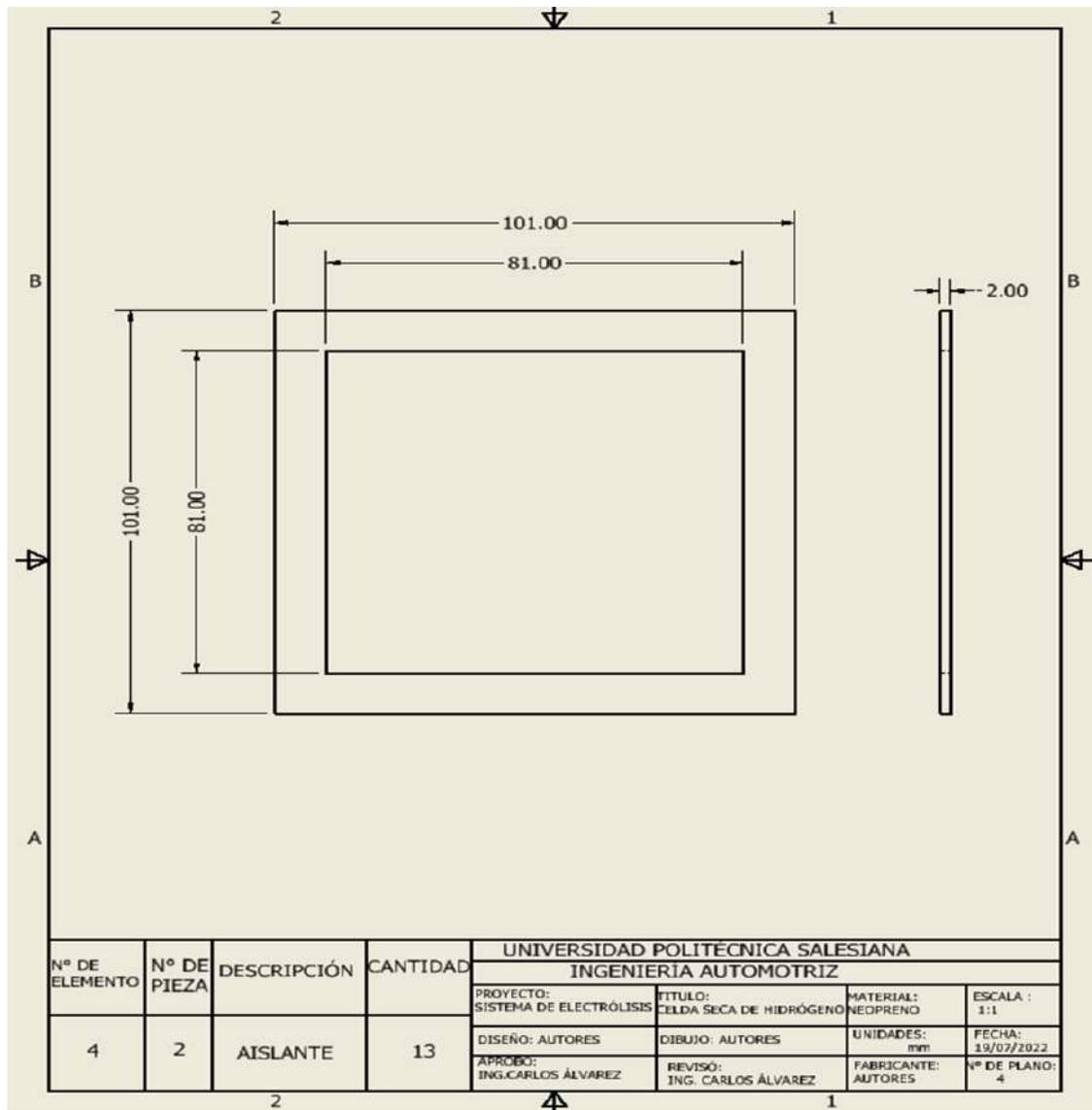
## Anexo 5

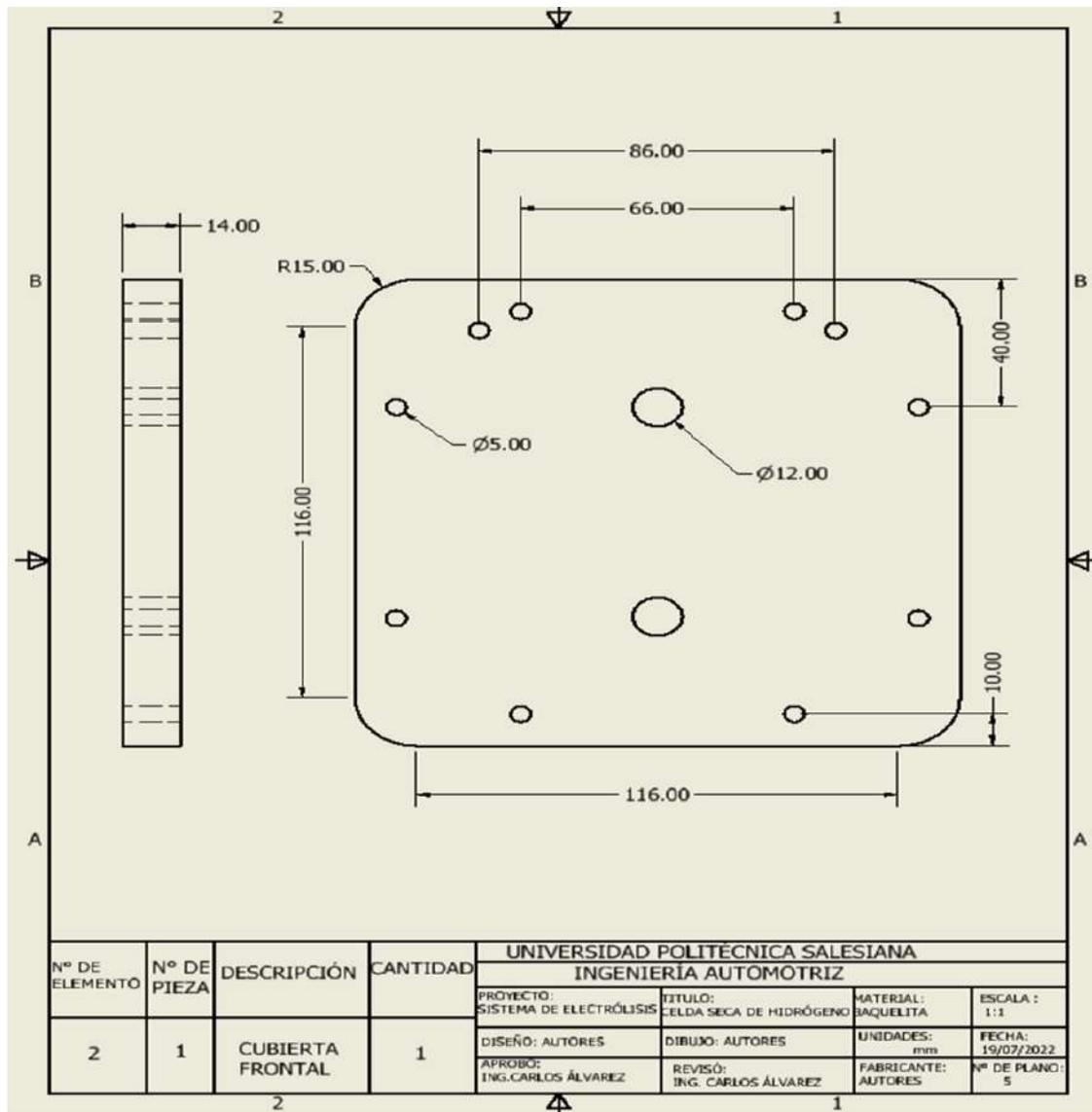
### Ensamble celda seca de hidrógeno

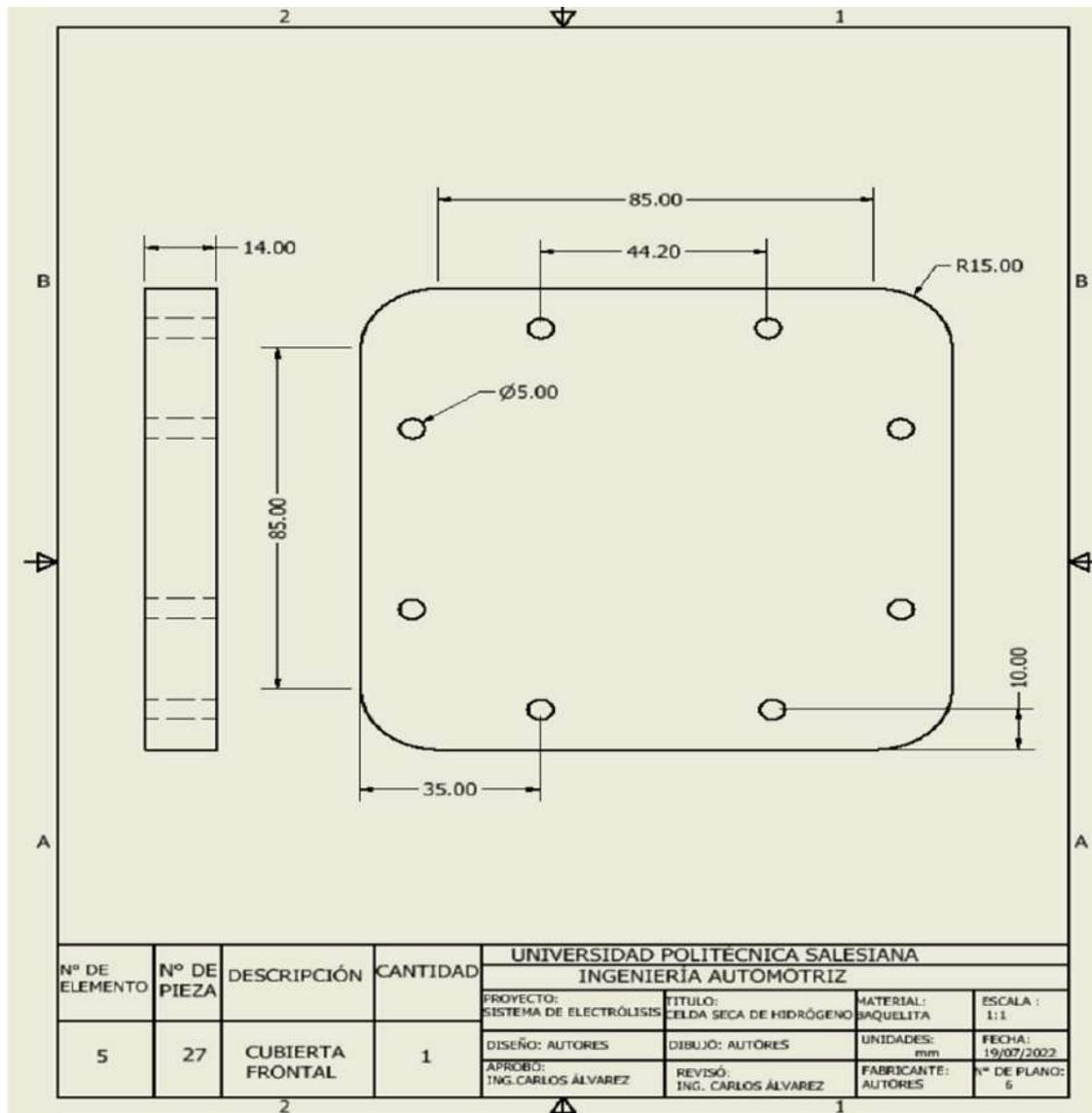












## Anexo 6

Detalles de ruta en software GPS Logger

# GPS Logger

POS GPS      ITINERARIO      ARCHIVO

	<b>20220715-133228</b> <i>Sin activación celda de hidrógeno</i>	
	Distancia 64.7 km	Vel max 97 km/h
	Duración 01:01:48	Vel med 62.9 km/h
	Dif alt 390 m	
	Puntos 3709	Anot. 0
	<b>20220714-145334</b> <i>Activación celda de hidrógeno</i>	
	Distancia 64.6 km	Vel max 120 km/h
	Duración 01:01:13	Vel med 63.3 km/h
	Dif alt 386 m	
	Puntos 3673	Anot. 0