



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO  
AMBIENTE**



**TESIS**

**MANTENIMIENTO DE LAS CELDAS ELECTROLÍTICAS SS 316 L CON UNA  
BATERÍA DE 12 V PARA LA PRODUCCIÓN DEL GAS HHO**

**PRESENTADA POR:**

**RICHARD ADNÁN MONTAGNE VELÁSQUEZ**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**PUNO, PERÚ**

**2022**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO**  
**AMBIENTE**

**TESIS**

**MANTENIMIENTO DE LAS CELDAS ELECTROLÍTICAS SS 316 L CON UNA  
BATERÍA DE 12 V PARA LA PRODUCCIÓN DEL GAS HHO**



**PRESENTADA POR:**

**RICHARD ADNÁN MONTAGNE VELÁSQUEZ**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

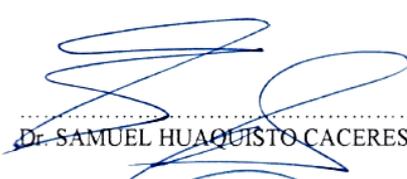
PRESIDENTE

  
.....  
Dr. ALEJANDRO APAZA TARQUI

PRIMER MIEMBRO

  
.....  
Dra. GUINA GUADALUPE SOTOMAYOR ALZAMORA

SEGUNDO MIEMBRO

  
.....  
Dr. SAMUEL HUAQUISTO CACERES

ASESOR DE TESIS

  
.....  
Dr. NORMAN JESUS BELTRAN CASTAÑON

Puno, 14 de Julio de 2022

**ÁREA:** Ciencias de la Ingeniería

**TEMA:** Mantenimiento de las Celdas Electrolíticas SS 316 L con una Batería de 12 V para la Producción del Gas HHO

**LÍNEA:** Recursos Naturales y Medio Ambiente



## DEDICATORIA

A Dios por guiarme e iluminar mi camino, dándome fuerzas para seguir y superar cada reto que me pone la vida.

A mi esposa e hijo que son mi fuente de amor y felicidad, a mi madre por su apoyo incondicional, a mi hermano por enseñarme el valor de la educación y a mi hermana que está en el cielo por cuidarme y acompañarme.

Al Dr. Angel Canales por guiarme por el sendero de la investigación

A mis docentes del Doctorado que me apoyaron en mi proceso de formación



## AGRADECIMIENTOS

Richard Adnán Montagne Velásquez, reconoce el apoyo financiero del Proyecto CONCYTEC – Banco Mundial “Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica” 8682-PE, a través de su unidad ejecutora ProCiencia. Contrato de adjudicación de fondos N° 01-2018-FONDECYT/BM-PROGRAMAS de doctorados en áreas estratégicas y generales. Doctorado en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, escuela de posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú.

Al programa Doctoral en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

Al Dr. Canales por haberme brindado capacidad y conocimiento científico.

A mi Asesor, por sus consejos, recomendaciones y el asesoramiento en esta investigación.

A mis docentes del Doctorado, que con sus enseñanzas y experiencias se esforzaron por educarme como investigador.

Al esfuerzo administrativo y de coordinación para la ejecución de este programa Doctoral.

Y para finalizar, agradezco a mis compañeros de clase, que durante estos tres años me brindaron su amistad y su conocimiento.



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>REVISIÓN DE LA LITERATURA</b>	
1.1. Marco teórico	3
1.1.1. Gas HHO	6
1.1.2. Mantenimiento de las celdas electrolíticas	9
1.2. Antecedentes	11
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
2.1. Identificación del problema	13
2.2. Enunciados del problema	14
2.2.1. Enunciado General	14
2.2.2. Enunciados Específicos	15
2.3. Justificación	15
2.4. Objetivos	16
2.4.1. Objetivo general	16
2.4.2. Objetivos específicos	16
2.5. Hipótesis	16
2.5.1. Hipótesis general	16
2.5.2. Hipótesis específicas	16
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
3.1. Lugar de estudio	18
3.2. Población	19
3.3. Muestra	19
	iii



3.4.	Método de investigación	19
3.5.	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	19
3.5.1.	Diseño de muestreo	19
3.5.2.	Descripción detallada del uso de materiales, equipos, insumos, entre otros.	20
3.5.3.	Métodos	21
3.5.4.	Descripción de las variables analizadas en los objetivos específicos	25
3.5.5.	Descripción de variables a ser analizados en el objetivo específico	26
3.5.6.	Aplicación de prueba estadística inferencial	26
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		
4.1.	Diseño óptimo de las celdas electrolíticas	27
4.2.	Producción de gas HHO del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L	33
4.3.	Mantenimiento adecuado para la producción de gas HHO	36
4.3.1.	Tiempo de funcionamiento en relación al voltaje	36
4.3.2.	Tiempo de funcionamiento en relación a la corriente	39
4.4.	Discusión	44
CONCLUSIONES		45
RECOMENDACIONES		46
BIBLIOGRAFÍA		47
ANEXOS		65



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Terminología para la mezcla de hidrógeno y oxígeno	8
2. Composición química del acero inoxidable	9
3. Propiedades mecánicas del SS 316 L	10
4. Configuraciones de las celdas electrolíticas	21
5. Registro de datos del primer método	23
6. Pruebas de normalidad	35
7. Prueba de homocedasticidad	35
8. Prueba estadística - ANOVA	36
9. Pruebas de normalidad	37
10. Prueba de homocedasticidad	38
11. Prueba paramétrica de muestras independientes	38
12. Prueba no paramétrica de muestras independientes	39
13. Pruebas de normalidad	40
14. Prueba de homocedasticidad	40
15. Prueba paramétrica de muestras independientes	41
16. Prueba no paramétrica de muestras independientes	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Suministro, consumo y transporte de combustible 2017	4
2. Emisiones de CO <sub>2</sub> Global por sector 2017	4
3. Emisiones globales de CO <sub>2</sub> del transporte por subsector 2016	5
4. Mapa de Puno	18
5. Medición del voltaje entre los electrodos y las celdas electrolíticas neutras	22
6. Medición del voltaje de las celdas electrolíticas fuera de los cátodos y ánodos	23
7. Medición del voltaje en la batería y electrodos	24
8. Esquema del generador de gas HHO	24
9. Voltaje entre las celdas electrolíticas neutras en diferentes configuraciones	27
10. Voltaje de las celdas del diseño óptimo	28
11. Voltaje entre celdas electrolíticas neutras	29
12. Disminución del voltaje en las diferentes configuraciones	29
13. Diferencia de voltaje entre la batería y los electrodos (C y A)	30
14. Voltajes en las placas fuera del cátodo y ánodo	31
15. Comparación de voltaje, amperaje y potencia entre las configuraciones C-A y 24N-C-A-24N	32
16. Producción de gas HHO sin mantenimiento	33
17. Voltaje entre celdas electrolíticas neutras	34
18. Producción de gas HHO	35
19. Diferencia de voltajes entre la primera y última prueba	37
20. Diferencia de corriente entre la primera y última prueba	39
21. Diferencia de potencia consumida entre la primera y última prueba	42
22. Diferencia eléctrica entre las 143 y 148 horas de uso	43



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Instrumentos de medición	65
2. Materiales e insumos	67
3. Generador de gas HHO	69
4. Problemas en la generación de gas HHO	70
5. Fotos de las celdas después de 76 y 148 horas de uso	71
6. Oxidación en las celdas electrolíticas después de 76 horas de uso	72
7. Oxidación en las celdas electrolíticas después de 148 horas de uso	74



## RESUMEN

La ausencia de mantenimiento en las placas electrolíticas para la producción de gas HHO es una de las desventajas para que este combustible pueda ser reconocido como un complemento necesario que disminuye el uso de combustible fósil y las emisiones de gases en el sector automotriz. Este estudio muestra el diseño óptimo de las placas electrolíticas y su mantenimiento para generar gas HHO. Se demuestra, como resultados que el diseño óptimo está en la configuración de 1C-5N-1A y que para la producción de gas HHO  $\eta$  es mayor a 0.05 por lo que se deduce que la oxidación de las placas electrolíticas SS 316 L no afecta la producción de gas HHO antes del mantenimiento, después de las 143 horas de uso se debe realizar un mantenimiento puesto que no hay forma de compensar la potencia debido a que el voltaje llega al tope en la carga de batería y el amperaje no aumenta a causa del óxido, finalmente la producción de gas HHO a partir del diseño óptimo genera aproximadamente 104 mL/min hasta obtener los 12 voltios en la batería. Los resultados de esta investigación servirán como base y conocimiento para futuros trabajos en la producción de gas HHO por medio de la electrólisis en celdas electrolíticas.

**Palabras clave:** Electrólisis, gas HHO, mantenimiento de placas electrolíticas, producción de hidrógeno, producción de gas hidroxilo, SS 316 L.



## ABSTRACT

The absence of maintenance in the electrolytic plates for the production of HHO gas is one of the disadvantages for this fuel to be recognized as a necessary complement that reduces the use of fossil fuel and gas emissions in the vehicle sector. This study shows the optimal design of the electrolytic plates and their maintenance to generate HHO gas. It is demonstrated, as results that the optimal design is in the 1C-5N-1A configuration and that for HHO gas production  $p$  is greater than 0.05, so it follows that oxidation of SS 316 L electrolytic plates does not affect HHO gas production before maintenance, after 143 hours of use maintenance must be carried out since there is no way to compensate the power due to the voltage peaking at the battery charge and the amperage does not increase because of the oxide, finally the HHO gas production from the optimum design generates approximately 104 mL/min until the 12 volts in the battery are obtained. The results of this research will serve as a basis and knowledge for future works on the production of HHO gas by means of electrolysis in electrolytic cells.

**Keywords:** Electrolysis, HHO gas, electrolytic plate maintenance, hydrogen production, hydroxy gas production, SS 316 L.

## INTRODUCCIÓN

La mayor cantidad de energía utilizada en el mundo proviene del uso de hidrocarburos como lo es el petróleo, la gasolina, el carbón y el gas natural que actualmente son los más usados, y que a través del proceso de quema o combustión proveen de energía mecánica a las unidades motorizadas, es a partir del uso inadecuado de estos combustibles desde la revolución industrial en actividades antropogénicas que produjo continuos incrementos en las cantidades de gases contaminantes emitidos, limitando la capacidad regenerativa de la atmosfera para eliminar el CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), que es el principal responsable del efecto invernadero.

El consumo y suministro de combustibles fósiles (petróleo, carbón y el gas natural) corresponde al 67 % y 81.3 % del total respectivamente (International Energy Agency, 2019), es alarmante la continua demanda de estas fuentes energéticas que trajo consigo diversas enfermedades, problemas en la salud humana y animal, contaminando las áreas verdes de todo el planeta, principalmente su efecto es notorio en el cambio climático por el aumento de gases tóxicos en la atmosférica, como son el N<sub>2</sub> (dióxido de nitrógeno), CO<sub>2</sub>, CO (monóxido de carbono), NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno), etc., de manera similar tiene un efecto devastador en el medio ambiente, por tanto, la aparición de tecnologías que permitan mitigar la contaminación que estos produzcan tendrá una alta demanda en el futuro, múltiples instituciones públicas y privadas en todo el mundo vienen mostrando interés por las disposiciones que contienen reformas o leyes que sustituyan el uso de hidrocarburos por energías renovables.

Actualmente políticas y leyes impulsan tecnologías para mitigar los gases de efecto invernadero, estas acciones impulsan una disminución del 40-70% de gases de efecto invernadero para un horizonte del 2050 (IPCC, 2022), para lo cual el combustible fósil no tendría que ser una opción al futuro, las energías limpias en los medios de transporte sería lo ideal en esta transformación. Múltiples investigaciones afirman que el combustible ideal para sustituir el combustible fósil es el hidrógeno, a pesar de que el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, en la tierra no es una fuente de energía primaria, como lo es los hidrocarburos ya mencionados, la pequeña cantidad de hidrógeno diatómico que existe en la tierra se encuentra en la atmosfera. El hidrógeno puro es el elemento más pequeño y escapa inevitablemente de cualquier contenedor o tubería, los costes de almacenamiento son altos, y la producción de hidrógeno para la

sustitución de hidrocarburos es muy alta. Por tanto, una solución para aprovechar el gas hidrógeno es que el consumo sea In-Situ, y no por almacenamiento.

Una manera económica y viable para la producción de gas hidrógeno es a partir de la electrólisis en las celdas de combustible para generar gas HHO (mezcla de gases de hidrógeno y oxígeno). La producción de gas HHO por medio de la electrólisis hace muchas décadas fue la principal investigación de muchos científicos que con el tiempo demostraron el uso de este combustible en el sector automotriz, no obstante, el diseño y aplicación del gas HHO para reducir la contaminación ambiental provocada por el uso de combustibles fósiles fue aminorada por conflictos políticos y económicos, a pesar de eso, se sigue evidenciando investigaciones que estudian la producción de gas HHO. El material principal para producir este gas son las celdas electrolíticas SS (stainless steel) 316 L que por su uso oxidarán y reducirán para separar las moléculas de hidrógeno y oxígeno. Además, por el tiempo de funcionamiento, al no tener un mantenimiento adecuado del generador de gas HHO, disminuirá la vida útil de los materiales y la producción de gas HHO, asimismo, tendrá un impacto desfavorable en futuras investigaciones, incluyendo como variables al motor, alternador, rendimiento, eficiencia, disminución del uso de combustible fósil. No obstante, la oxidación es un problema a largo plazo en el generador de gas HHO, y si este no tiene un buen mantenimiento, la producción de gas HHO y vida útil de las celdas electrolíticas disminuirá considerablemente.

Por lo tanto, este trabajo de investigación tiene como finalidad el de desarrollar un plan de mantenimiento adecuado para las celdas de combustible de acero inoxidable 316 L, lo que aumentará la eficiencia y la tasa de producción en el generador de gas HHO. En lo metodológico, este estudio aporta al desarrollo de energías renovables y específicamente a combustibles limpios.

El contenido de la investigación consta de cuatro capítulos. El capítulo I se detalla el marco teórico, el cual sustenta la información y antecedentes de las celdas electrolíticas, gas HHO, gas Brown y la importancia del uso adecuado de los combustibles renovables. En el capítulo II se detalla el planteamiento del problema y se justifica el trabajo, adicionalmente se define los objetivos y la dirección de la investigación. En el capítulo III, se describe la metodología, materiales y métodos. Finalmente, en el capítulo IV se describe los resultados, conclusiones y recomendaciones de la investigación.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1. Marco teórico

Las fuentes de combustibles fósiles se agotan continuamente motivando a las empresas a desarrollar tecnologías renovables (Bajpai, 2020), debido a que el uso del combustible fósil altera negativamente la vida en nuestro planeta dañándolo a gran escala y a largo plazo (Root et al., 2003) a los ecosistemas marinos (Hoegh-Guldberg & Bruno, 2010; Hughes et al., 2017), dinámica de plagas forestales (Logan et al., 2003), el carbono orgánico del suelo (Smith et al., 2008), los ríos (Miller & Russell, 1992), la agricultura (Mendelsohn et al., 1994), y la salud humana (Martens et al., 1995; Patz et al., 2005).

La Figura 1 muestra la cantidad de energía que se suministra y consume por categoría, asimismo, indica la energía que se pierde en el transporte para el consumo, resaltando que el consumo de energías renovables y biomasa representa el 14.1 % del total, lo cual es bastante bajo en la actualidad (Leonard et al., 2020).

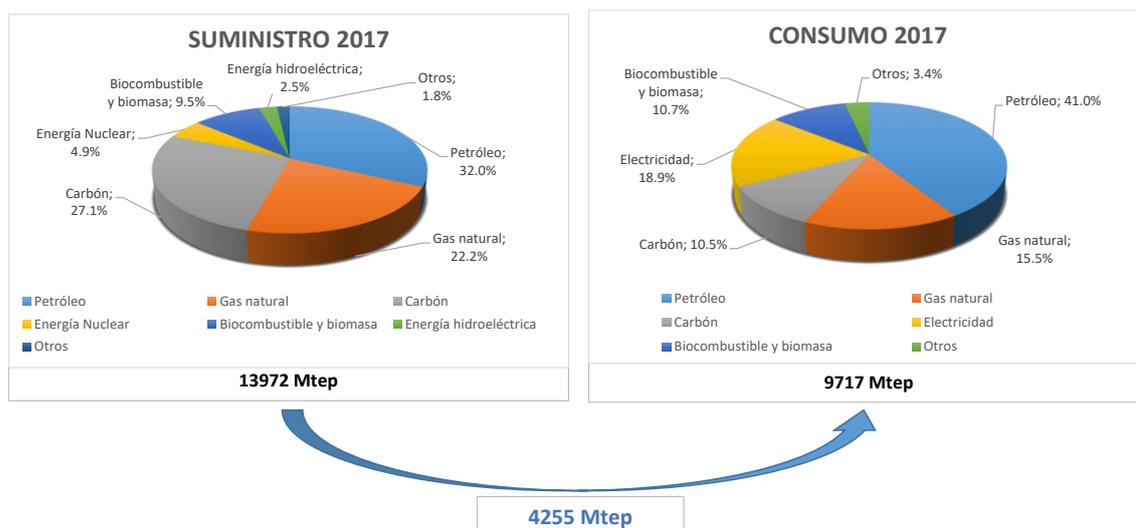


Figura 1. Suministro, consumo y transporte de combustible 2017

Fuente: Key World Energy Statistics 2019, Datos de Ref. (International Energy Agency, 2019)

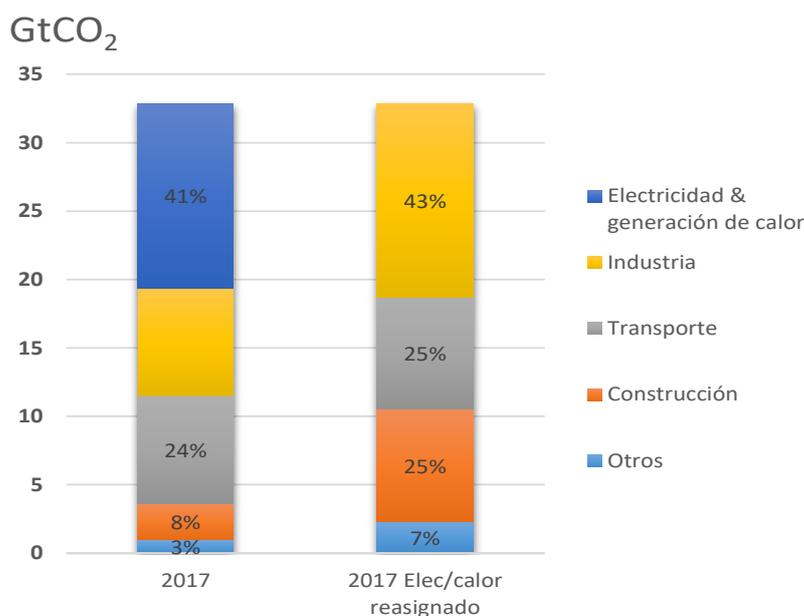


Figura 2. Emisiones de CO<sub>2</sub> Global por sector 2017

Fuente: CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustion 2019, Datos de Ref. (International Energy Agency, 2018)

La Figura 2 muestra la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> global por sector, exponiendo un 25% de CO<sub>2</sub> global por el sector transporte. El sector transporte se subdivide en 4 categorías, las cuales son carretera, aire, agua y otros, según la Figura 3 muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> por subsector, el cual el subsector carretera ocupa el 74% de emisiones de CO<sub>2</sub>.

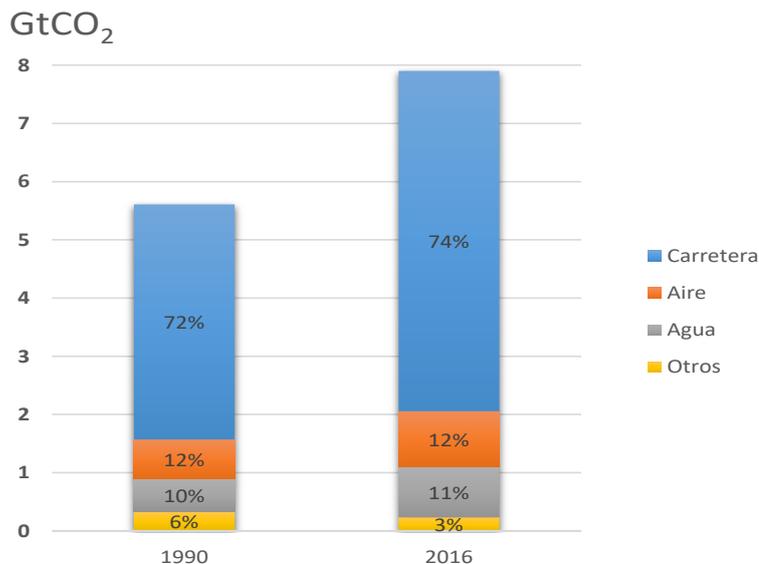


Figura 3. Emisiones globales de CO<sub>2</sub> del transporte por subsector 2016

Fuente: CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustion 2018, Datos de Ref. (International Energy Agency, 2018)

El hidrógeno es uno de los portadores de energía más limpia y sostenible que solo emite agua como subproducto en su combustión sin emisiones de carbono (Shiva Kumar & Himabindu, 2019) que se produce a partir de diferentes métodos (Çelik & Yıldız, 2017), especialmente el reformado con el vapor de metano (Boyano et al., 2011; Ligthart et al., 2011; Xu et al., 2009), el reformado de petróleo/nafta (Iranshahi et al., 2011; Ma et al., 2017; Rahimpour et al., 2013), gasificación de petróleo (Burmistrz et al., 2016; J. Huang & Dincer, 2014; Seyitoglu et al., 2017), biomasa (Abdul Mujeebu, 2016; Kalinci et al., 2009; Salam et al., 2018), fuentes biológicas (Elsharnouby et al., 2013; Ibrahim & Akilli, 2019; Levin et al., 2004), y electrólisis del agua (Abdin et al., 2015; Atlam & Kolhe, 2011; Siracusano et al., 2012), se utiliza principalmente en muchas aplicaciones industriales, celdas de combustible, fertilizantes, procesos de refinación de petróleo, petroquímicos, e industrias químicas (B. Lee et al., 2017; Lim, 2015; Rakib et al., 2010; Züttel, 2004), además tiene muchas propiedades atractivas como su alta energía (140 MJ kg<sup>-1</sup>), que es más de dos veces mayor a la de combustibles sólidos típicos (50 MJ kg<sup>-1</sup>) (Chi & Yu, 2018). La desventaja es que el proceso es muy costoso (Ivy, 2004) en relación con el gas natural (Argonne National Laboratory, 2004) debido a la baja eficiencia y al costo de energía eléctrica (O'M Bockris, 2003). Sin embargo aún se sigue explorando ampliamente el uso de combustibles alternativos (Dincer & Acar, 2017) debido a que

disminuirá la participación del combustible fósil según proyecciones del 2025 y 2040 (International Energy Agency, 2016).

Los diferentes tipos de celdas que separan las moléculas de hidrógeno y oxígeno creados por investigadores como lo es el acumulador celular de membrana de polímero electrolítico (PEMFC) (Charradi et al., 2019; H. Chen et al., 2019; J. Y. Lee et al., 2019; Ostroverkh et al., 2019; Pourrahmani et al., 2019; T. Wang et al., 2019; Zhang et al., 2019), celdas de combustible de metanol directo (DMFC) (Abrego-Martínez et al., 2017; Colpan & Ouellette, 2018; Ercelik et al., 2017; Falcão et al., 2016; Gwak et al., 2015; J. Lee et al., 2017; Masdar et al., 2017; Oh et al., 2014; Y. Wang et al., 2014; Zuo et al., 2018), celdas de combustible alcalinas (AFC) (Bidault et al., 2009, 2010; Hu et al., 2013; Kim et al., 2010; Lindstrom & Lavers, 1997; McLean et al., 2002; Nikolić et al., 2011; Verhaert et al., 2011; Yang et al., 2014), celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC) (Anahara, 1992; Ghouse et al., 1998; Giordano et al., 1994; Ito, 2017; Pareta et al., 2011; Recupero et al., 1994; Song & Shin, 2001), celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC) (Ahn et al., 2018; Della Pietra et al., 2016; Di Carlo et al., 2011; Marra, 2008; Marra & Bosio, 2007; Mehrpooya et al., 2019; Milewski et al., 2014), y celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) (B. Chen et al., 2019; Ilbas & Kumuk, 2019; Jaiswal et al., 2019; Miao et al., 2019; Pirasaci, 2019; Saadabadi et al., 2019; Yan et al., 2019) llaman la atención de todo el mundo.

La industria automotriz de generación de energía de plantas estacionarias y celdas de combustible cada vez se vuelven más prometedoras (Hissel & Pera, 2016), y como la celdas de combustible se volvió tendencia entre los investigadores en los últimos años (Peña Arias et al., 2017; Sharaf & Orhan, 2014) presento diversas tecnologías de celdas de combustible, incluida las fortalezas y desafíos con una visión general de la historia (Rahman et al., 2016), el hidrógeno y su aplicación en celdas de combustible todavía tiene algunos obstáculos como la fiabilidad y durabilidad de la celda, a diferencia de los diagnósticos, los pronósticos de las celdas de combustible ayudan a establecer un tiempo de falla y vida restante de los acumuladores celulares de membrana de polímero electrolítico (Hao Liu & Su, 2016).

### 1.1.1. Gas HHO

El gas HHO es una mezcla de gases de hidrógeno y oxígeno con una relación atómica teóricamente de 2:1, mientras que en la realidad es necesaria la relación de 4:1 o 5:1

para evitar la llama oxidante (Viall, 1921). A temperatura y presión normal la energía mínima necesaria para encender esta mezcla es de 20  $\mu\text{J}$  y puede quemarse cuando está compuesto entre 4 % y 95 % de hidrógeno por volumen, su autoignición se produce aproximadamente a 570  $^{\circ}\text{C}$  (Moyle et al., 1960; O'Connor, n.d.). Al combustionar el gas HHO se convierte en vapor de agua y la energía que libera tiene una relación de 241.8 kJ de energía por cada mol de hidrógeno diatómico quemado, emitiendo una máxima temperatura de 2660  $^{\circ}\text{C}$  (Calvert, 2008).

Se puede producir esta mezcla de gas estequiométricamente pura al utilizar un potencial eléctrico en las celdas electrolíticas para disociar las moléculas del agua, las ecuaciones 1 y 2 son reacciones en el cátodo y ánodo respectivamente, mientras que las ecuaciones 3 y 4 muestran las reacciones generales en la electrólisis y combustión respectivamente.



La electrólisis en la celda electrolítica es el paso de corriente, la corriente eléctrica sale desde el polo positivo de la batería y entra a la solución electrolítica por el ánodo en el electrolizador, viaja a través del electrolito hasta llegar al cátodo, lo que sucede en la ecuación 1, es la reacción del cátodo en el que los iones de hidrógeno (protones) consumen los electrones para formar hidrógeno, asimismo, al mantener la carga eléctrica (y la valencia) en equilibrio, según la ecuación 2 los iones de hidróxido (aniones) se transfieren a través de la solución electrolítica al ánodo, donde los iones de hidróxido ceden electrones y estos electrones regresan al terminal positivo batería de 12 V. Mientras que la ecuación 3 es la reacción general de la electrólisis, separando las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno en forma de gas, y la ecuación 4 muestra la combustión del gas HHO, la cual regresa otra vez a su forma líquida.

La terminología usada por los científicos para llamar a esta mezcla de gases de oxígeno e hidrógeno con el tiempo fue llamada de distintas maneras, según se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1

*Terminología para la mezcla de hidrógeno y oxígeno*

Nombre	Autores
Gas HHO	(Al-Rousan, 2010; Baltacioglu et al., 2016; Durairaj et al., 2012; El-Kassaby et al., 2016; Le Anh et al., 2013; Musmar & Al-Rousan, 2011; Putha & Babu, 2015; Santilli, 2006)
Oxi hidrógeno	(Abhilash et al., 2015; Kumar & Rao, 2013; Samuel & McCormick, 2010)
Gas hidroxil	(Arat et al., 2016; El-Kassaby et al., 2016; D. Sharma et al., 2015; Yilmaz et al., 2010)
Gas Brown	(Leelakrishnan et al., 2013)
Gas hidroxil	(Masjuki et al., 2016)
$H_2 + O_2$	(Bari & Mohammad Esmail, 2010)

Después de múltiples investigaciones por disminuir el consumo de combustible fósil, se descubrió que el gas HHO se puede mezclar híbridamente con la gasolina o diésel (El-Kassaby et al., 2016) y mejorando el rendimiento en el motor (Baltacioglu et al., 2016) acoplado el generador de gas HHO al tubo de ingreso de aire. El enriquecimiento de gas HHO en los motores de combustión interna otorga una mejora en la eficiencia térmica, presión media efectiva al freno, y el ahorro de combustible, en si mejora la eficiencia del motor (S. Wang et al., 2011a, 2011b). Y se puede obtener de dos formas a través del proceso de electrólisis, por las celdas secas y celdas húmedas (Shah et al., 2018). A este gas también se le conoció en los últimos años porque es más seguro que el hidrógeno puro debido a una de sus características naturales de explosión (Nabil & Khairat Dawood, 2019).

Las celdas electrolíticas pueden ser de distintos tipos de acero inoxidable, tales como las celdas de SS 216 (Yadav Milind et al., 2011), SS 304 (Kovendhan et al., 2019) o SS 316 (Ye et al., 2021). La primera ley de la termodinámica establece que la energía de entrada de un sistema cerrado siempre será igual a la energía de salida, sin

embargo, en la práctica ningún sistema está perfectamente cerrado, por ende, la energía para generar el gas HHO siempre excederá a la energía liberada al quemarlo.

### 1.1.2. Mantenimiento de las celdas electrolíticas

El material de las celdas electrolíticas en esta investigación está hecho de acero inoxidable 316 L, según muestra la Tabla 2 tiene alta resistencia a la corrosión, soporta temperaturas altas y sus características mecánicas lo vuelve un buen material para la electrólisis.

Tabla 2

*Composición química del acero inoxidable*

Elemento	SS 304 (%)	SS 304 L (%)	SS 316 (%)	SS 316 L (%)
Carbono	0.07 máx.	0.08 máx.	0.08 máx.	0.030 máx.
Manganeso	2.00 máx.	2.00 máx.	2.00 máx.	2.00 máx.
Azufre	0.030 máx.	0.030 máx.	0.030 máx.	0.030 máx.
Fósforo	0.045 máx.	0.045 máx.	0.045 máx.	0.045 máx.
Silicio	0.75 máx.	0.75 máx.	0.75 máx.	0.75 máx.
Cromo	17.5 a 19.5	18.0 a 20.0	16.0 a 18.0	16.0 a 18.0
Níquel	8.0 a 10.5	8.0 a 12.00	10.0 a 14.0	10.0 a 14.0
Molibdeno	-	-	2.0 a 3.0	2.0 a 3.0
Nitrógeno	0.10 máx.	0.10 máx.	0.10 máx.	0.10 máx.

Fuente: (National Kwikmetal Service, 2022)

En cuanto a los elementos de la Tabla 2, el carbono es el elemento aleante más importante en los aceros, a medida que aumenta la concentración de carbono, aumenta la resistencia a la tracción, aumenta la dureza, reduce la soldabilidad. El manganeso es un desoxidante energético, considerado como elemento que favorece el temple, le aporta al acero dureza y resistencia al desgaste. El azufre es una impureza no deseable en los aceros, al superar el 0.05 % ocasiona fragilidad. El fósforo proporciona mayor resistencia en aceros aleados y mayor resistencia a la corrosión atmosférica, tanto mecánica como químicamente. El silicio promueve una microestructura ferrítica y aumenta la fuerza, asimismo, incrementa la resistencia a la oxidación, también es un reductor energético del acero, en aceros laminados se

usa como desoxidante en concentraciones mayores a 0.2 %. El cromo aumenta la dureza, le da brillo y hace que el acero sea inoxidable. El níquel evita la corrosión del acero, mejora la resistencia a la tracción y su tenacidad, cuando hablamos de aceros inoxidables, el níquel es lo que hace que el acero inoxidable sea altamente resistente a la corrosión en las series 300. El molibdeno se usa principalmente para mayor resistencia a la corrosión en aceros inoxidables austeníticos y dúplex. En los aceros inoxidables austeníticos se agregan entre 2% y 7%. El nitrógeno es utilizado como elemento de aleación en aceros inoxidables, también amplía la región austenítica y mejora algunas propiedades mecánicas como dureza, tenacidad, resistencia mecánica y propiedades de resistencia al desgaste y a la corrosión.

En la Tabla 3 muestra las propiedades mecánicas tales como límite elástico, resistencia a la tracción y porcentaje de elongación.

Tabla 3

*Propiedades mecánicas del SS 316 L*

<b>Tipo</b>	<b>Límite elástico 0,2 % compensación (KSI)</b>	<b>Resistencia a la tracción (KSI)</b>	<b>% de elongación (longitud de calibre de 2")</b>
SS 304	30 min	75 min	40 min
SS 304 L	25 min	70 min	40 min
SS 316	30 min	75 min	40 min
SS 316 L	25 min	70 min	40 min

Fuente: (National Kwikmetal Service, 2022)

El SS 316 L es utilizado en muchas ramas de la industria (Davis, 1995), puesto que, presenta una muy buena resistencia a la oxidación en condiciones menores a 420°C y mayores a 860°C, y también por la fina capa protectora de óxido de cromo que se forma en la superficie del SS 316 L genera resistencia a la corrosión y biocompatibilidad (Balamurugan et al., 2008; Kwok, 2012)

La mantenibilidad es la característica de un elemento que puede ser recuperado según su capacidad cuando se realiza mantenimiento (Lynch, 1995), así mismo, se procura que el generador de gas HHO sea fiable, o sea que realice adecuadamente su función cuando esté operando en un determinado tiempo (Nachlas, 1995). La aplicación de

mantenimiento a las celdas electrolíticas tiene por objetivo garantizar la fiabilidad y disponibilidad mediante mantenimiento. El mantenimiento adecuado tiene como propósito prolongar la vida útil y obtener un rendimiento aceptable del equipo durante más tiempo y de una manera rentable (Gulati, 2013).

## 1.2. Antecedentes

Rhodes (1967) informó por primera vez sobre la producción de gas HHO a través de la electrólisis, siendo el hidrógeno uno de los portadores de energía más limpia y sostenible, que solo emite agua como subproducto de su combustión sin emisiones de carbono (Shiva Kumar & Himabindu, 2019), la inyección directa de gas HHO al sistema mejora la pureza de los gases de escape, por lo que se puede explicar por un mejor proceso de combustión (Rhodes, 1967) y la relación atómica debería ser de 4:1 o 5:1 para evitar la llama oxidante, la cual es muy diferente a la teórica (Viall, 1921).

La generación de gas HHO puede ser por múltiples métodos (Çelik & Yıldız, 2017), celdas seca con la celda húmeda (Shah et al., 2018), de forma plana o cilíndrica (Salek et al., 2020) y una de las más asertivas por la electrólisis es mediante una PEM (Proton Exchange Membrane) (Abdin et al., 2015); no obstante, la PEM no es resistente a la corrosión y por tanto su vida útil es baja a comparación del acero inoxidable.

Se realizaron investigaciones con el SS y se logró obtener a través de las celdas electrolíticas SS 216 (Yadav Milind et al., 2011), SS 304 (Y. guo Huang et al., 2016); sin embargo, estas celdas electrolíticas no eran lo suficientemente productiva por sus características metalúrgicas, Yilmaz et al. (2010) demostraron que el SS 316 L por sus características de alta resistencia a la corrosión, es óptimo para la producción de gas HHO, además Omasa (2008) recomendó la reducción de la distancia entre los electrodos entre una distancia de 20-400 mm para evitar cortocircuitos y así mejorar la producción de gas HHO.

Para la obtención de gas HHO, distintas investigaciones utilizaron KOH (potasa cáustica) (P. K. Sharma et al., 2020; Usman et al., 2020) y NaOH (Ismail et al., 2018; Yilmaz et al., 2010), concluyendo que se obtiene mejores resultados cuando el generador tiene mayor cantidad de celdas (Subramanian & Thangavel, 2020), cuando los electrodos se colocan verticalmente (Zammit et al., 2012) por facilitar la expulsión de burbujas creadas durante la electrólisis (Zoulias & Varkaraki, 2004) y con un peso molar de  $1 \text{ ML}^{-1}$  debido



a que la corriente eléctrica aumentaba drásticamente reduciendo la producción de HHO (Appleby et al., 1978) con una separación de celdas electrolíticas de 1.6 mm (Yadav Milind et al., 2011). Para optimizar la medición de gas HHO se puede utilizar un microcontrolador (Baltacioğlu, 2019), o bien usando técnicas de lógica difusa para controlar las condiciones de trabajo del electrolizador utilizando el ciclo de trabajo de Modulación de ancho de pulso (PWM) para producir gas HHO (Conker, 2019).

Otras investigaciones mezclaron el gas HHO con otro combustible convirtiéndolo en híbrido, como es el caso del biodiesel utilizando un electrolizador de tipo seco de celdas electrolíticas de SS 316 L con solución NaOH como electrolito con potencia del electrolizador controlada electrónicamente a través de la fuente de 2 baterías conectadas en serie (Baltacioğlu et al., 2019) produciendo más cantidad de NO<sub>x</sub> en motores de combustión interna (Kenanoğlu et al., 2020), además Ivy (2004) reportó que a pesar del beneficio del hidrógeno, una de sus desventajas más fuertes, era que para la producción de hidrógeno el proceso es muy costoso en relación con otro tipo de gases naturales.

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1. Identificación del problema

Las fuentes de combustibles fósiles se agotan continuamente motivando a las empresas a desarrollar tecnologías renovables (Bajpai, 2020), debido a que el uso del combustible fósil altera negativamente la vida en nuestro planeta dañándolo a gran escala y a largo plazo (Root et al., 2003) a los ecosistemas marinos (Hughes et al., 2017), dinámica de plagas forestales (Logan et al., 2003), el carbono orgánico del suelo (Smith et al., 2008), los ríos (Miller & Russell, 1992), la agricultura (Mendelsohn et al., 1994), y la salud humana (Martens et al., 1995; Patz et al., 2005).

Por consiguiente se considera al hidrógeno como uno de los elementos portadores de energía más limpia y sostenible que solo emite agua como subproducto en su combustión sin emisiones de carbono (Shiva Kumar & Himabindu, 2019) y este se puede conseguir a través de diferentes métodos (Çelik & Yıldız, 2017), especialmente el reformado con el vapor de metano (Lighthart et al., 2011), el reformado de petróleo/nafta (Ma et al., 2017), gasificación de petróleo (Burmistrz et al., 2016; Seyitoglu et al., 2017), biomasa (Abdul Mujeebu, 2016; Salam et al., 2018), fuentes biológicas (Ibrahim & Akilli, 2019) y electrólisis del agua (Abdin et al., 2015).

Asimismo el hidrógeno se utiliza principalmente en muchas aplicaciones industriales, celdas de combustible, fertilizantes, procesos de refinación de petróleo, petroquímicos, e industrias químicas (B. Lee et al., 2017; Lim, 2015); es importante resaltar sus propiedades como su alta energía (140 MJ kg<sup>-1</sup>), que es más de dos veces mayor a la de combustibles sólidos típicos (50 MJ kg<sup>-1</sup>) (Chi & Yu, 2018). Los diferentes tipos de celdas que separan las moléculas de hidrógeno y oxígeno creados por investigadores

como lo es el acumulador celular de membrana de polímero electrolítico (PEMFC) (Charradi et al., 2019; H. Chen et al., 2019; J. Y. Lee et al., 2019; Ostroverkh et al., 2019; Pourrahmani et al., 2019; T. Wang et al., 2019; Zhang et al., 2019), celdas de combustible de metanol directo (DMFC) (Abrego-Martínez et al., 2017; Colpan & Ouellette, 2018; Ercelik et al., 2017; Falcão et al., 2016; Gwak et al., 2015; J. Lee et al., 2017; Masdar et al., 2017; Zuo et al., 2018), celdas de combustible alcalinas (AFC) (Yang et al., 2014), celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC) (Ito, 2017), celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC) (Ahn et al., 2018; Della Pietra et al., 2016; Mehrpooya et al., 2019), y celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) (B. Chen et al., 2019; Ilbas & Kumuk, 2019; Jaiswal et al., 2019; Miao et al., 2019; Pirasaci, 2019; Saadabadi et al., 2019; Yan et al., 2019) llaman la atención de todo el mundo.

Sin embargo, la desventaja que presenta la generación de hidrógeno conlleva un proceso muy costoso (Ivy, 2004) en comparación con el gas natural (Argonne National Laboratory, 2004) debido a la baja eficiencia y al costo de energía eléctrica (O'M Bockris, 2003); por otro lado, aún se sigue explorando ampliamente el uso de combustibles alternativos (Dincer & Acar, 2017) debido a que disminuirá la participación del combustible fósil según proyecciones del 2025 y 2040 (International Energy Agency, 2016).

Por consiguiente la industria automotriz de generación de energía de plantas estacionarias y celdas de combustible cada vez se vuelven más prometedoras (Hissel & Pera, 2016), el hidrógeno y sus aplicaciones en celdas de combustible todavía tiene algunos obstáculos como la fiabilidad y durabilidad de la celda, Por lo cual, la presente investigación busca encontrar una forma de producir el hidrógeno rentable económica y sustentable energéticamente para la población en general, analizando la producción de gas HHO con los materiales económicos y de larga durabilidad.

## **2.2. Enunciados del problema**

### **2.2.1. Enunciado General**

¿Cuál es el mantenimiento adecuado del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L que maximizará la producción del gas HHO al trabajar con KOH y con una batería de 12 voltios?

### 2.2.2. Enunciados Específicos

- a) ¿Cuánto es la tasa de producción del gas HHO del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L al trabajar con KOH a  $1 \text{ ML}^{-1}$  y con una batería de 12 voltios?
- b) ¿Cuál es el tiempo de uso para un mantenimiento adecuado del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L al trabajar con KOH a  $1 \text{ ML}^{-1}$  y con una batería de 12 voltios?

### 2.3. Justificación

En el actual contexto operacional que vivimos se necesita reducir al máximo los distintos componentes dañinos emitidos por la combustión de combustibles fósiles ya que su efecto va directamente sobre la salud del ser humano y de toda vida existente en el planeta. La situación energética mundial requiere de un modelo de fuente inagotable, y que al mismo tiempo contemple el cuidado del medioambiente y la salud humana, es por esto mismo que se necesita de un diseño portátil que disminuya el uso de combustibles convencionales. Reducir las emisiones de gases contaminantes producto del uso inadecuado de combustible fósil que hoy en día utilizamos como energía en el medio de transporte, industria, y otros procesos es la principal línea del uso del hidrógeno como combustible.

La industria automotriz se somete continuamente a procesos de renovación y diseños de construcción en sus motores, con el propósito que este consuma menos en todos sus ámbitos y sea más económico, eficiente, y amigable ambientalmente; aumentar el conocimiento sobre el uso adecuado del hidrógeno y gas HHO como combustible, el consumo de un combustible renovable, limpio y no tóxico.

El gas HHO producto de la electrólisis por la inyección de energía en las celdas electrolíticas SS 316 L fue ampliamente estudiado en los últimos años, sin resultados favorables para motores de combustión Diésel, sin embargo, para los motores de combustión de ciclo Otto que utilizan gasolina como combustible, resultó muy favorable, el resultado de muchas investigaciones llegan a la conclusión que este disminuye hasta un 30 % del combustible, entre el 10 al 30 % el  $\text{CO}_2$ , y otros elementos contaminantes que emite la combustión de combustibles fósiles, los resultados alternos y muy diferenciados en el uso apropiado de las dimensiones de las celdas electrolíticas, el voltaje

y amperaje apropiado, resulta confuso para el lector, por lo que se plantea desde una perspectiva más específica el mantenimiento adecuado para que sea acorde a la rentabilidad del usuario convencional o investigador.

En múltiples investigaciones, se habla sobre el uso de las celdas electrolíticas SS 316 L para la producción de gas HHO, mientras que el mantenimiento y la vida útil del generador, queda vacío, por lo que la presente investigación demostrará la producción de gas HHO a través de dichas celdas considerando parámetros para un mantenimiento.

## 2.4. Objetivos

### 2.4.1. Objetivo general

Determinar el mantenimiento adecuado del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L que maximizará la producción del gas HHO al trabajar con KOH y con una batería de 12 voltios.

### 2.4.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la tasa de producción de gas HHO del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L al trabajar con KOH a  $1 \text{ ML}^{-1}$  y con una batería de 12 voltios.
- b) Determinar el tiempo de uso para un mantenimiento adecuado del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L al trabajar con KOH a  $1 \text{ ML}^{-1}$  y con una batería de 12 voltios.

## 2.5. Hipótesis

### 2.5.1. Hipótesis general

El mantenimiento adecuado del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L maximiza la producción del gas HHO al trabajar con KOH y con una batería de 12 voltios.

### 2.5.2. Hipótesis específicas

- a) La tasa de producción del gas HHO del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L al trabajar con KOH a  $1 \text{ ML}^{-1}$  y con una batería



de 12 voltios disminuye gradualmente a causa de la oxidación en las celdas electrolíticas.

- b) El tiempo de uso y los parámetros de mantenimiento de las celdas electrolíticas SS 316 L al trabajar con KOH a  $1 \text{ ML}^{-1}$  y con una batería de 12 voltios determinan un mantenimiento adecuado.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de estudio

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Puno, región de Puno, Perú, ubicado a una latitud de  $15^{\circ} 50' 36''$  y a una longitud  $70^{\circ} 01' 25''$ , a 3856 m s.n.m., al oeste del Lago Titicaca. La temperatura más altas en promedio es en el mes de noviembre, aproximando a  $10.3^{\circ}\text{C}$ , julio es el mes más frío con temperaturas promedio de  $6.4^{\circ}\text{C}$  (Merkel, 2019).

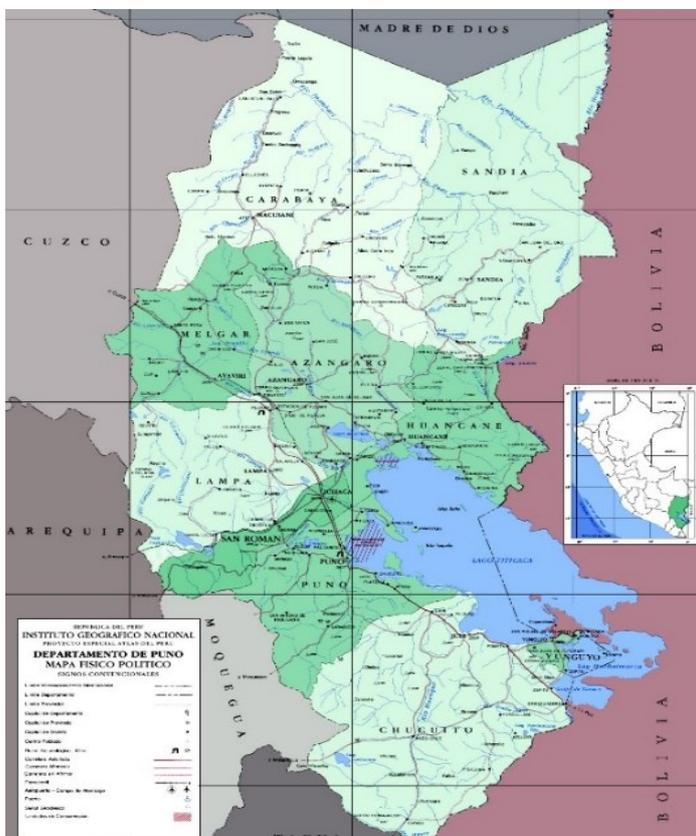


Figura 4. Mapa de Puno

Fuente: (Instituto Geográfico Nacional, 2011)

### **3.2. Población**

La población está definida por las configuraciones en el electrolizador para generar gas HHO a partir de la electrólisis con celdas de acero inoxidable 316 L, solución electrolítica a  $1 \text{ ML}^{-1}$  de KOH y con voltaje y corriente continua suministrada por una batería de 12 voltios.

### **3.3. Muestra**

En esta investigación el muestreo es no probabilístico, debido a que se tuvo en cuenta 3 muestras del diseño óptimo para la generación de gas HHO. Estas 3 muestras fueron elegidas intencionalmente, al inicio (0 horas), en el intermedio (77 horas) y al final (143 horas) debido a que se desconoce el tiempo de funcionamiento de las celdas electrolíticas antes de que empiece a reducir la capacidad de producción de gas HHO. El diseño óptimo consta de una configuración de un cátodo, cinco neutros y un ánodo, debido a que tiene un mejor desempeño en cuanto a la división eléctrica y por tanto a producción de gas HHO.

### **3.4. Método de investigación**

El trabajo de investigación tiene un enfoque cuantitativo del tipo experimental y descriptivo, del tipo experimental en el primer objetivo debido a que se estudia la producción de gas HHO en relación al estado de las placas en tres tiempos diferentes, al inicio (0 h), en el intermedio (77 h) y al final (139 h), y del tipo descriptivo longitudinal en el segundo objetivo debido a que se determina el tiempo de uso del diseño óptimo para un mantenimiento, por lo que se toma los parámetros de mantenimiento en unidades eléctricas.

### **3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos**

#### **3.5.1. Diseño de muestreo**

##### **Objetivo Especifico 01**

Determinar la tasa de producción de gas HHO del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L al trabajar con KOH a  $1 \text{ ML}^{-1}$  y con una batería de 12 voltios.

## Objetivo Especifico 02

Determinar el tiempo de uso para un mantenimiento adecuado del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L al trabajar con KOH a  $1 \text{ ML}^{-1}$  y con una batería de 12 voltios.

### 3.5.2. Descripción detallada del uso de materiales, equipos, insumos, entre otros.

Los materiales que se utilizó fueron dos plancha de SS 316 L 0.5mm X4'X8' del cual a través de corte a laser se obtuvo las celdas electrolíticas; juntas de goma con espesor de 2.5 mm con agujero de 3/8" para la separación de las celdas electrolíticas; tubos de PVC transparente de 3/8" que aisló la varilla roscada UNC Ø 5/16"; varilla roscada UNC Ø 5/16" cubierto de tubo PVC transparente de 3/8" atravesó las celdas electrolíticas y las juntas planas de goma; dos recipientes de plástico grueso transparente que contuvieron el electrolizador y el agua para el burbujeador; agua destilada; KOH al 98% de pureza el cual se realizó la conversión al 100% para su uso en la solución electrolítica; batería de 12 voltios 75 Ah de vehículo; un recipiente con agua; una probeta de vidrio graduada de 1000 mL para medir la producción de gas HHO; un soporte universal una con nuez metálica y una pinza de extensión de 3 dedos para sostener la probeta graduada de forma invertida; cargador de batería Einhell CE-BC 4 M; balanza digital 0.01g/500g; tres multímetros con precisión  $\pm(0.7\%+3)$  de resolución de 10 mV; pinza amperimétrica con precisión  $\pm(2\%+3)$  de resolución de 10mA ; cables eléctricos para conexiones; EPPs. Los instrumentos de medición fueron comprados y desempacados en octubre del 2021, fotos de la garantía en el Anexo 01.

El proceso para producir gas HHO consistió en energizar con la batería de 12 V el electrolizador de celdas húmedas de SS 316 L con una solución electrolítica de KOH a  $1 \text{ ML}^{-1}$ . Se utilizó las celdas húmedas SS 316 L debido a sus características físicas, su resistencia a la corrosión y su bajo costo, los cuales son ideales para la producción de gas HHO, las mismas que al estar energizadas y sumergidas en agua conductiva, separan las moléculas de  $\text{H}_2$  y O de forma gaseosa. El burbujeador fue utilizado para purificar el gas producido. La batería con carga completa fue utilizada para suministrar energía al electrolizador, juntamente se conectó a la batería el cargador de batería para aumentar el tiempo de funcionamiento del electrolizador y así obtener

una mayor cantidad de gas HHO producida. El cilindro graduado invertido se introdujo dentro de un recipiente de agua para contrastar la cantidad de gas producido. Los voltajes se midieron con los multímetros y el amperaje se obtuvo con la pinza amperimétrica. La batería, el terminal positivo estuvo conectado al ánodo y el terminal negativo estuvo conectado al cátodo.

### 3.5.3. Métodos

#### i. Para el diseño óptimo de las celdas electrolíticas

Se realizaron diferentes configuraciones con el fin de analizar el consumo eléctrico en las placas neutras.

Tabla 4

*Configuraciones de las celdas electrolíticas*

N°	Configuraciones	Diseño	GN	Celdas electrolíticas fuera	
				Izq	Der
1	C-A	C-A	0	0	0
2	C-1N-A	C-N-A	1	0	0
3	C-2N-A	C-NN-A	1	0	0
4	C-3N-A	C-NNN-A	1	0	0
5	C-4N-A	C-NNNN-A	1	0	0
6	C-5N-A	C-NNNNN-A	1	0	0
7	C-6N-A	C-NNNNNN-A	1	0	0
8	C-7N-A	C-NNNNNNN-A	1	0	0
9	C-8N-A	C-NNNNNNNN-A	1	0	0
10	C-9N-A	C-NNNNNNNNN-A	1	0	0
11	3C-35N-3A	C-NNNNNNNN-A	5	0	0
12	3C-40N-3A	C-NNNNNNNNN-A	5	0	0
13	2C-27N-2A	C-NNNNNNNNN-A	3	0	0
14	24N-C-A-24N	24N-C-A-24N	0	24	24
15	23N-C-2N-A-23N	23N-C-NN-A-23N	1	23	23
16	22N-C-4N-A-22N	22N-C-NNNN-A-22N	1	22	22

Se construyeron 16 configuraciones para la producción de gas HHO debido a que se contaba con una cantidad limitada de material, además desde la configuración 1 hasta la 10 se consideraron solo un grupo neutro; desde la configuración 11 hasta la 13 se consideraron con varios grupos neutros; y desde la configuración 14 hasta la 16 se consideraron con celdas fuera de los electrodos cátodo y ánodo, dichas configuraciones se usaron para analizar el consumo eléctrico por celda electrolítica con el fin de determinar el diseño óptimo y así analizar la producción de gas HHO.

Para el análisis del consumo eléctrico de las celdas electrolíticas neutras se consideró como método 1 a la medición de voltajes en las configuraciones del 1 al 13, como muestra la Figura 5 y el registro de datos es según la Tabla 5.

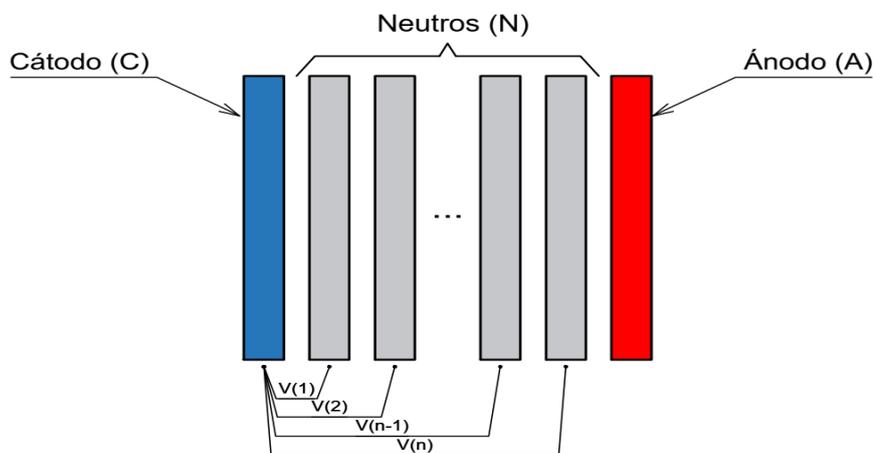


Figura 5. Medición del voltaje entre los electrodos y las celdas electrolíticas neutras

El registro de voltajes medidos en las celdas electrolíticas de la Figura 5, donde  $V(1)$  es el voltaje medido entre el cátodo y el primer neutro,  $V(2)$  es el voltaje entre el cátodo y el segundo neutro, y así consecutivamente hasta medir el voltaje entre el cátodo y el último neutro.

Tabla 5

Registro de datos del primer método

Datos	Voltajes	Descripción
A-1	V(1)	Voltaje entre el C y el primer N
1-2	V(2)-V(1)	Diferencia de voltaje entre V(2)-V(1)
2-3	V(3)-V(2)	Diferencia de voltaje entre V(3)-V(2)
...	...	...
		Diferencia de voltaje entre el V(VE)-V(n), donde
n-VE	V(VE)-V(n)	V(VE) es el voltaje entre el C y A y V(n) es el voltaje entre el C y el ultimo neutro

Para el análisis del consumo eléctrico de las celdas electrolíticas fuera de los cátodos y ánodos se consideró como método 2 a la medición de voltajes en las configuraciones del 14 al 16 según la Figura 6.

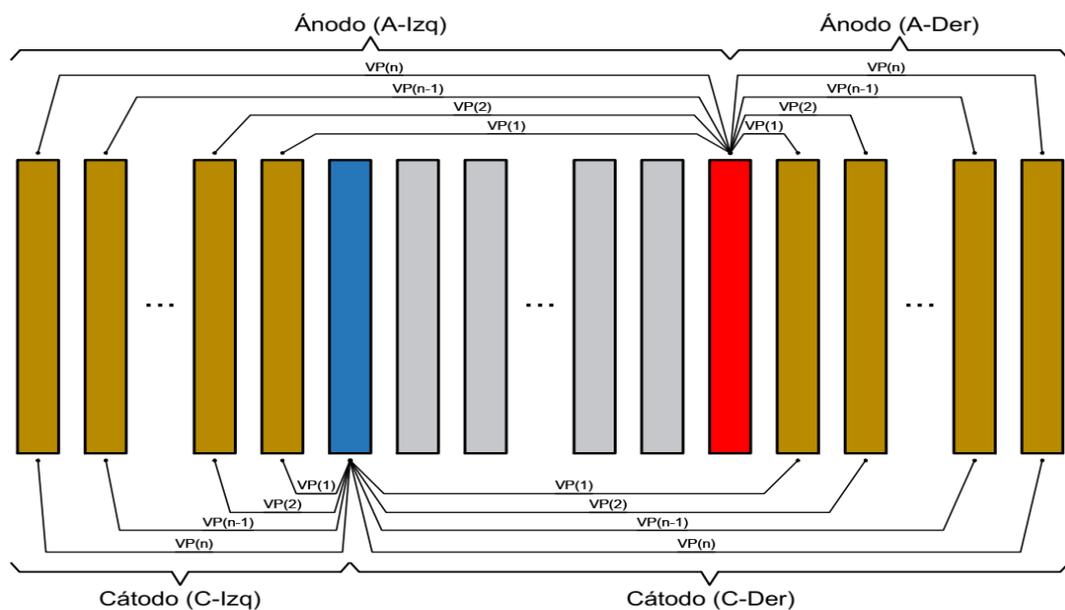


Figura 6. Medición del voltaje de las celdas electrolíticas fuera de los cátodos y ánodos

El registro de voltajes medidos en las celdas electrolíticas de la Figura 6, donde VP(1) es el voltaje medido entre el electrodo cátodo o ánodo con la primera celda fuera del cátodo y ánodo, VP(2) es el voltaje medido entre el electrodo cátodo o ánodo con la segunda celda fuera del cátodo y ánodo, y así consecutivamente hasta

medir el voltaje entre el electrodo cátodo o ánodo y la última placa fuera del cátodo y ánodo.

Asimismo, se midió el voltaje directamente de los terminales de la batería, conjuntamente con los electrodos de las celdas de combustible según muestra la Figura 7 a lo que se consideró método 3 en las configuraciones del 1 al 10.

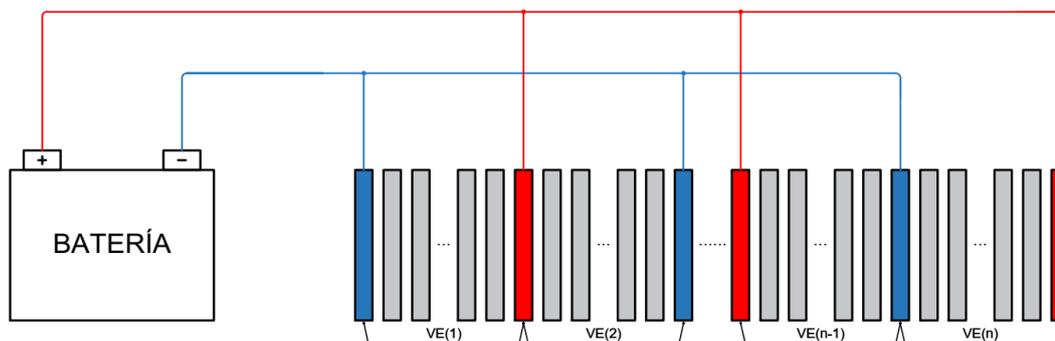


Figura 7. Medición del voltaje en la batería y electrodos

Según la Figura 7, VE(1) es la medida de voltaje entre el primer cátodo con el primer ánodo, VE(2) es la medida de voltaje entre el primer ánodo con el segundo cátodo, y así consecutivamente hasta medir el voltaje entre ultimo cátodo y el último ánodo.

## ii. Para la generación y contabilización de gas HHO

Se diseño según la Figura 8.

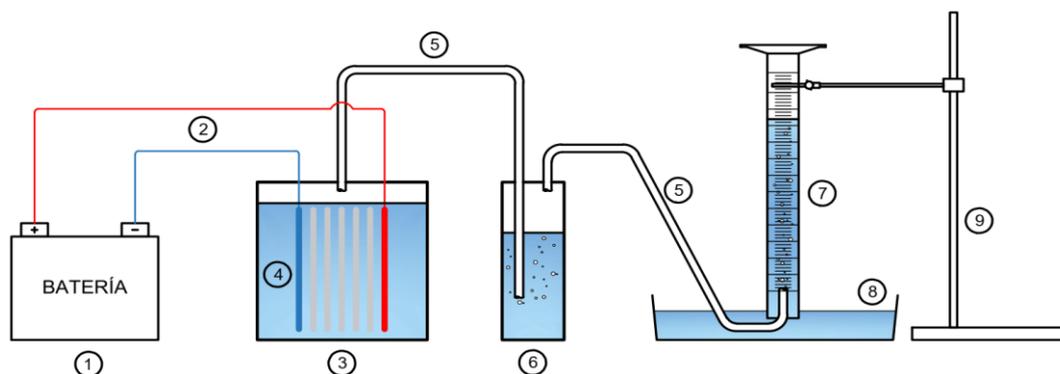


Figura 8. Esquema del generador de gas HHO

Donde (1) es la batería convencional de 12 V, (2) son los cables eléctricos, (3) el electroizador que contiene el agua conductiva y (4) las celdas electrolíticas, (5) es el tubo de PVC, (6) es el burbujeador, (7) es la probeta de vidrio graduada invertida, (8) es el recipiente con agua, y (9) es el soporte universal con una nuez metálica y una pinza de extensión de 3 dedos.

La contabilización de gas HHO se hará mediante el método de desplazamiento de agua, que consiste en desplazar el agua dentro del cilindro graduado invertido que está colocado dentro del recipiente de agua, como se muestra en la Figura 8, este método es adecuado para el gas hidrógeno.

### **iii. Para el mantenimiento de las celdas**

Los parámetros para un mantenimiento en las celdas electrolíticas son las siguientes: Después de 5 minutos de funcionamiento del generador de gas HHO, el voltaje registrado en los polos de la batería no debe ser igual o mayor a 12.95 V, debido a que la batería completamente cargada y buen estado muestra un valor de 13 V (Plaza, 2020), asimismo, la diferencia de 0.05 V es por el tiempo que se usó en esta investigación. Del mismo modo, el amperaje no deberá ser mayor a 0.084 A/cm<sup>2</sup>, según Michael Faraday se debe respetar la relación de A/cm<sup>2</sup> para que las celdas no se sobrecalienten (Hydrogen Fuel System, 2017). El área de las celdas electrolíticas es 75 cm<sup>2</sup> y el área de las gomas que separan las celdas es 3.46 cm<sup>2</sup>, por consiguiente, el área útil de las celdas es 71.54 cm<sup>2</sup> multiplicándolo muestra un resultado de 6 A, lo cual no deberá pasar para no sobrecalentar las celdas electrolíticas.

Al respetar los parámetros de mantenimiento, se analizará los datos del primer, medio y último funcionamiento de las celdas electrolíticas antes del mantenimiento con un análisis de varianza ANOVA de un factor para observar la significancia y así saber si disminuye la producción de gas HHO a través del tiempo de uso del electrolizador.

#### **3.5.4. Descripción de las variables analizadas en los objetivos específicos**

Para el desarrollo de los objetivos, se tuvo primeramente que determinar el diseño óptimo del generador de gas HHO, para luego analizar la producción de gas HHO de este diseño óptimo y así determinar un mantenimiento adecuado a través de los parámetros de mantenimiento.

##### **Objetivo Especifico 01**

Para el desarrollo de primer objetivo, se contabilizó la cantidad de gas HHO producido a través del tiempo, respetando los parámetros de mantenimiento.

### **Objetivo Especifico 02**

Para el desarrollo del segundo objetivo se determinó el tiempo de funcionamiento del generador de gas HHO hasta llegar a los parámetros de mantenimiento. En el caso de voltaje, se empezó con una carga completa de la batería hasta llegar a los 12 voltios, Y para la corriente según al área útil de las celdas electrolíticas no debe pasar los 6 amperios.

#### **3.5.5. Descripción de variables a ser analizados en el objetivo específico**

##### **Objetivo Especifico 01**

Variable Dependiente: Producción de gas HHO (mL/min)

Variable Independiente: Tiempo (min)

##### **Objetivo Especifico 02**

Variable Dependiente: Voltaje (V)

Corriente (A)

Variable Independiente: Tiempo (min).

#### **3.5.6. Aplicación de prueba estadística inferencial**

##### **Objetivo Especifico 01**

Para el primer objetivo se hizo la prueba de normalidad y homocedasticidad, mostrando normalidad y varianzas iguales respectivamente en los datos, después se hizo la prueba de ANOVA de un solo factor.

##### **Objetivo Especifico 02**

Para el segundo objetivo se hizo la prueba de normalidad y homocedasticidad, para las pruebas paramétricas se aplicó el T-student para muestras independientes, y para muestras no paramétricas se aplicó U de Mann Whitney para muestras independientes.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Diseño óptimo de las celdas electrolíticas

Se empezó el registro de datos a 12.9 V registrados en el voltaje en los electrodos, se inició con las configuraciones que tiene un grupo neutro según muestra la Figura 5, mediante el método 1, en las 3 primeras configuraciones hay mayor voltaje en las celdas electrolíticas neutras más cercanas al ánodo, en la configuración C-5N-A hay poca variación de voltaje de las celdas electrolíticas neutras entre el cátodo y ánodo, mientras que en todas las demás configuraciones hay mayor voltaje en las celdas electrolíticas neutras más cercanas al cátodo. En la Figura 9 se observa que después de la configuración C-5N-A en las demás configuraciones hay una curva más pronunciada hacia el cátodo; y que mientras más neutros tiene una celda de combustible, más será la diferencia de voltaje entre las celdas electrolíticas neutras.

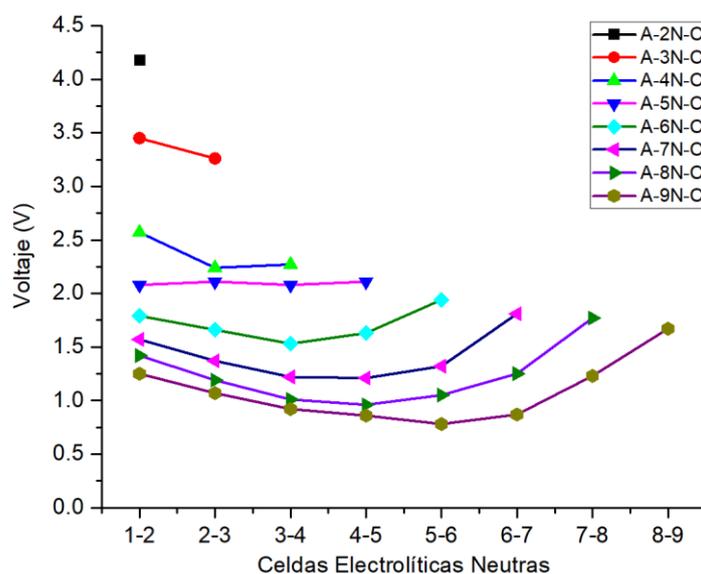


Figura 9. Voltaje entre las celdas electrolíticas neutras en diferentes configuraciones

Según la Figura 9 la configuración C-5N-A es la más estable de todas las configuraciones, ya que reparte la energía equitativamente entre las celdas y así provocar que todas las celdas se oxiden casi al mismo tiempo, razón por la cual se hizo cuatro repeticiones a fin de detectar irregularidades y aumentar la precisión en la medición del diseño óptimo, según muestra la Figura 10.

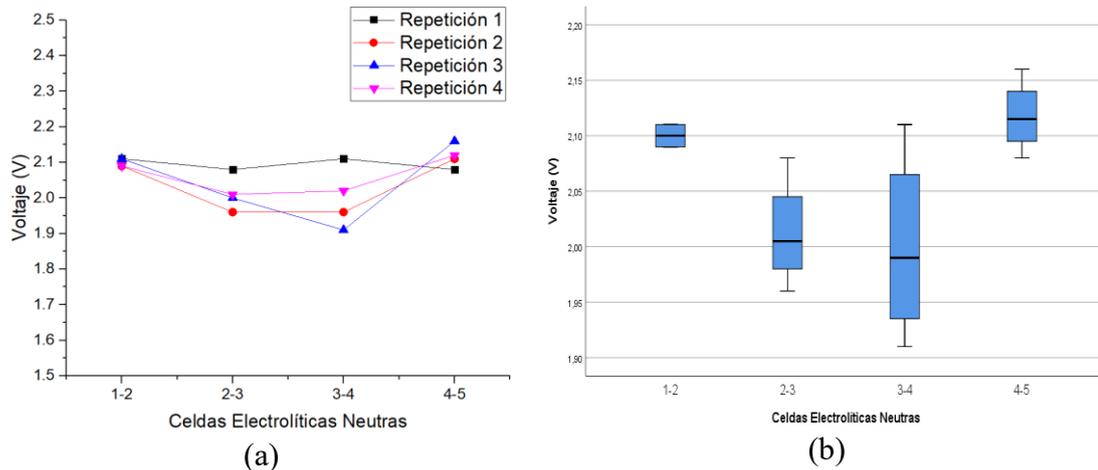
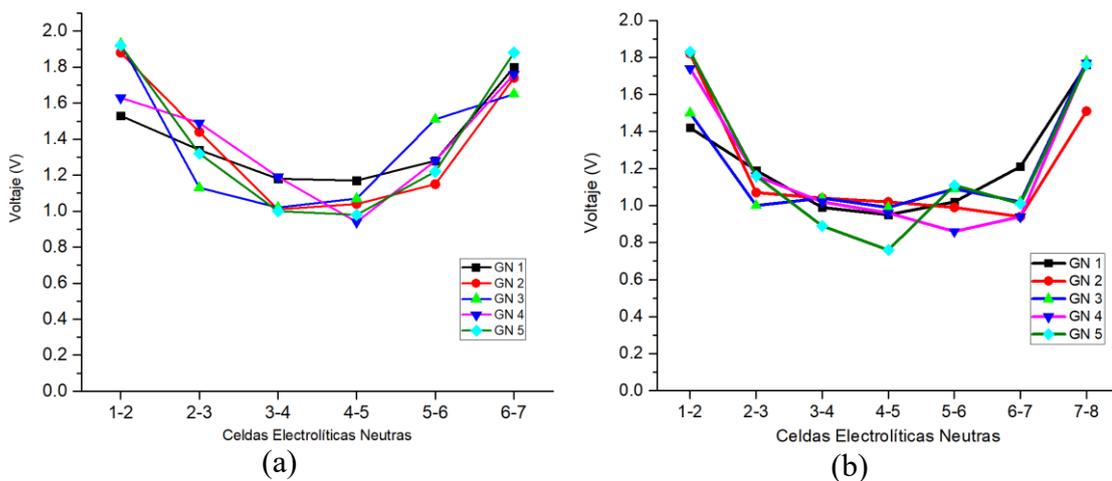
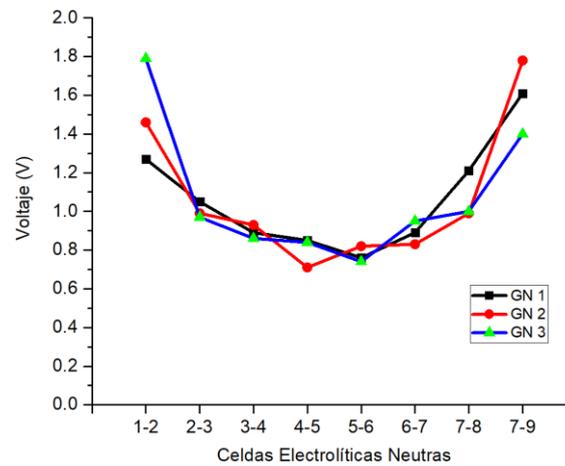


Figura 10. Voltaje de las celdas del diseño óptimo

(a) Voltaje entre placas neutras, (b) Diagrama de caja

Para las configuraciones que tienen más de un grupo neutro, como son las configuraciones 11, 12 y 13 de la Tabla 4, por el método 1, muestra que mientras haya más celdas electrolíticas neutras dentro de un grupo neutro, hay mayor curvatura tal como muestra la Figura 11.





(c)

Figura 11. Voltaje entre celdas electrolíticas neutras

(a) 3C-35N-3A, (b) 3C-40N-3A, (c) 2C-27N-2A

Según Göllei (GÖLLEI, 2014) el voltaje se divide proporcionalmente entre las celdas electrolíticas neutras de un bloque completo; Nabil & Khairat Dawood (Nabil, 2019; Nabil & Khairat Dawood, 2019) mencionan que el número de celdas electrolíticas neutras dividen el voltaje de la fuente en partes iguales entre las celdas; Nabil y Dawood (Nabil & Dawood, 2019) indican que el número de celdas electrolíticas neutras divide el voltaje de la fuente en partes iguales entre las celdas. No obstante, la Figura 9 y 11 demuestra que la división de voltaje entre las celdas electrolíticas neutras no es en partes iguales, la configuración C-5N-A muestra la mayor aproximación hacia una división de voltaje en relación con las celdas electrolíticas neutras entre los electrodos.

En relación al voltaje consumido para generar gas HHO, según el método 3 el voltaje registrado en las configuraciones con un solo grupo neutro disminuye conforme aumenta las celdas electrolíticas neutras.

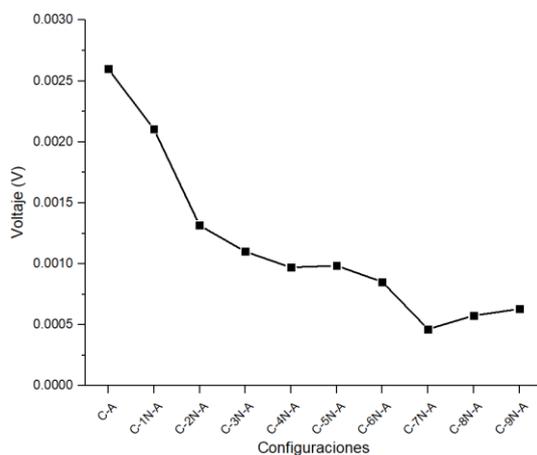


Figura 12. Disminución del voltaje en las diferentes configuraciones

Se visualizó una diferencia entre el voltaje de la batería y el voltaje de los electrodos al generar gas HHO, dicha diferencia se muestra en la Figura 12 y 13, siendo el voltaje de la batería mayor al voltaje en los electrodos para todas las configuraciones.

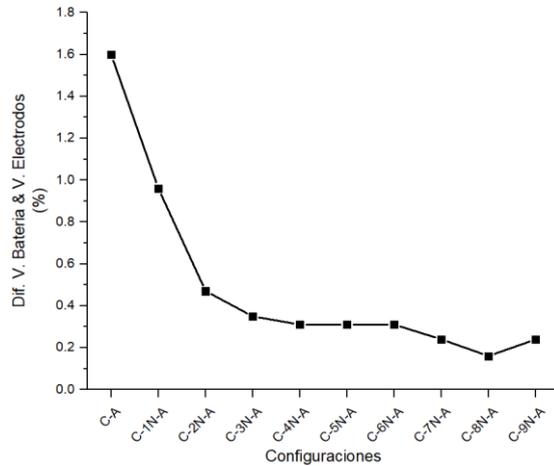
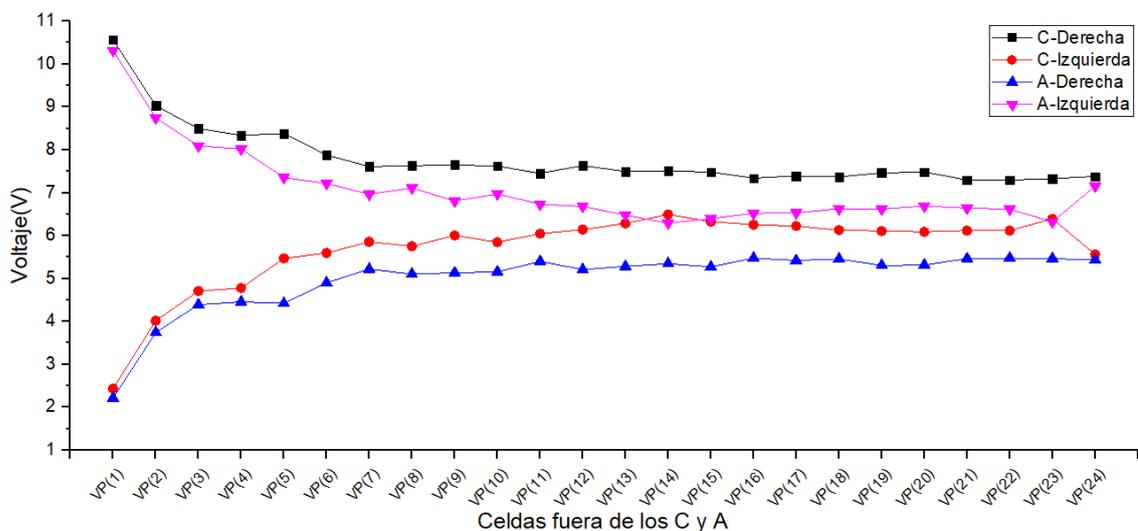


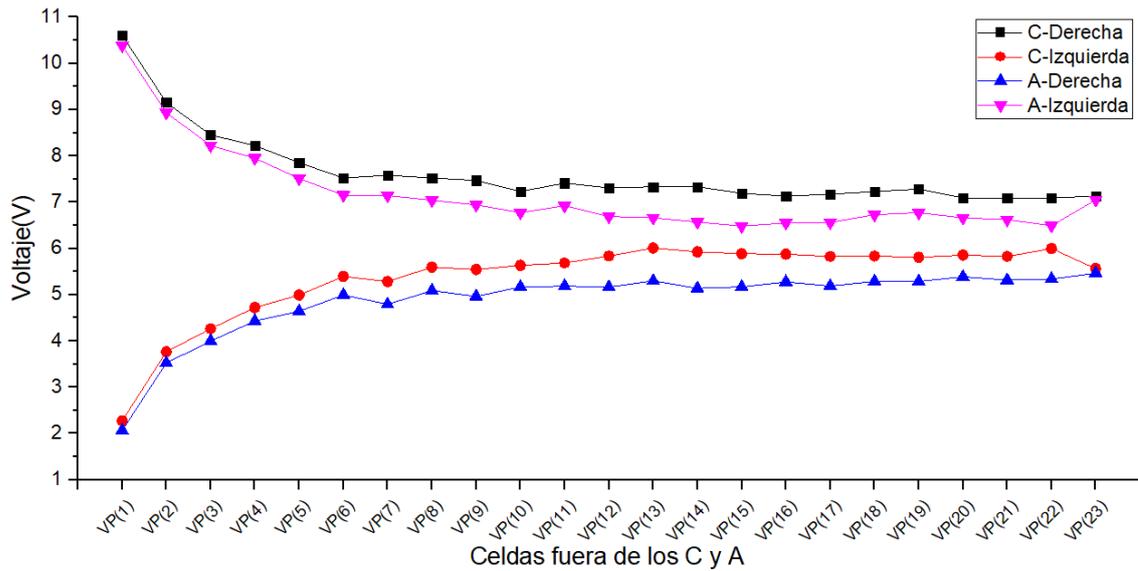
Figura 13. Diferencia de voltaje entre la batería y los electrodos (C y A)

Al introducir celdas electrolíticas neutras en el electrolizador, no hay división de voltaje en la batería ni en los electrodos (C y A), solo hay división de voltaje entre las celdas electrolíticas neutras.

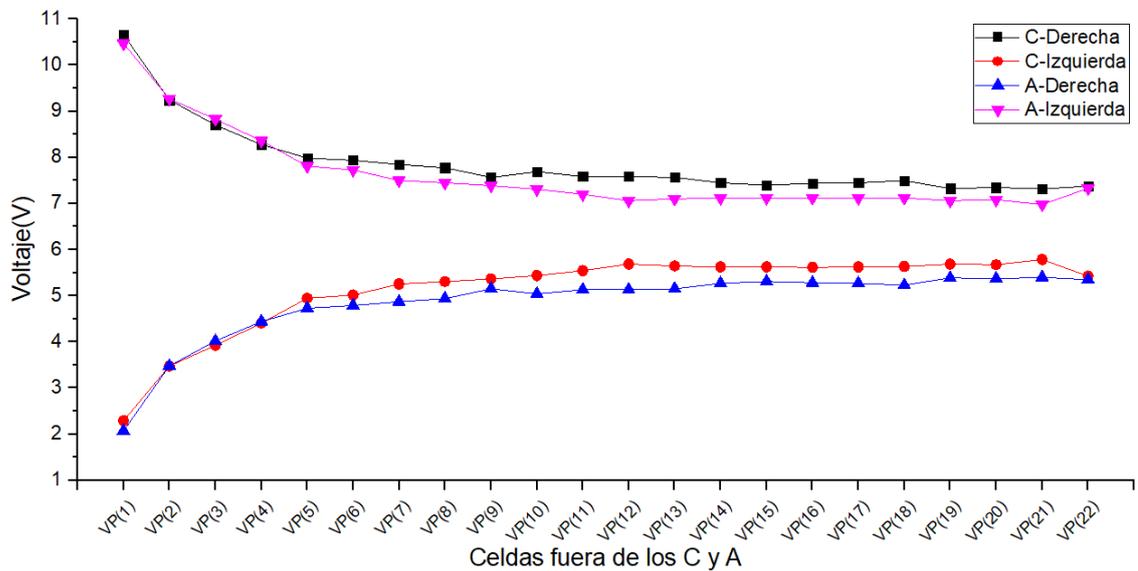
La Figura 14 muestra la medición de voltaje en celdas electrolíticas fuera los cátodos y ánodos, mostrando una disminución de voltaje entre el cátodo y las celdas electrolíticas fuera más cercanas al ánodo (C-Derecha), y el ánodo y las celdas electrolíticas fuera de más cercanas al cátodo (A-Izquierda), también muestra menos distorsión en la lectura de datos cuando la configuración se acerca a 5N.



(a)



(b)



(c)

Figura 14. Voltajes en las placas fuera del cátodo y ánodo

(a) 24N-C-A-24N, (b) 23N-C-2N-A-23N, (c) 22N-C-4N-A-22N

En cuanto a la potencia consumida, antes de energizar las celdas de combustible, se verificó que el VB era de 12.95 V para la comparación entre las configuraciones de C-A y 24N-C-A-24N, según la Figura 15 mediante el método 4, se observa que en la configuración con placas fuera, el voltaje de inicio era mayor y disminuye rápidamente, la corriente de inicio es menor y aumenta lentamente; mientras que, en la configuración sin placas fuera, el voltaje de inicio es menor y baja muy lentamente, la corriente de inicio

es mayor y aumenta más rápidamente que la configuración con placas fuera; por lo tanto, la potencia consumida a través del tiempo es mayor en la configuración sin placas fuera.

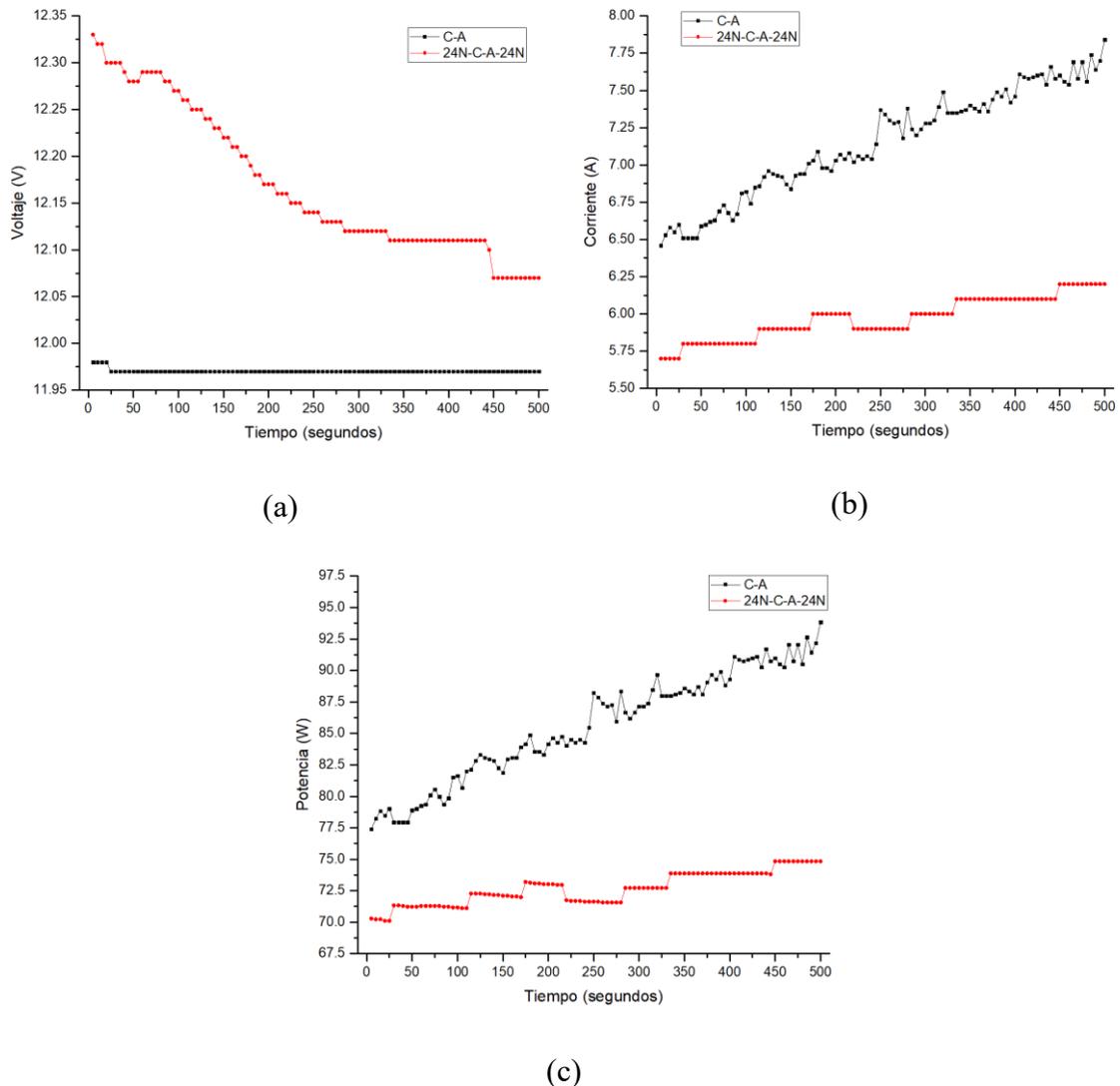


Figura 15. Comparación de voltaje, amperaje y potencia entre las configuraciones C-A y 24N-C-A-24N

(a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia

Después de verificar el comportamiento eléctrico de las celdas electrolíticas neutras en el generador de gas HHO, se concluye que el diseño óptimo está formado por cinco celdas electrolíticas neutras, sin importar la cantidad de grupos neutros, ya que el consumo eléctrico depende de la aplicación que se le dé; también especificar que por temas económicos y de espacio, no se debe utilizar las placas electrolíticas fuera, a pesar de que la potencia consumida sea menor que la configuración sin placas fuera. En este diseño no muestra resultados diferentes al variar el tamaño del contenedor para la solución electrolítica y el electrolizador.

## 4.2. Producción de gas HHO del diseño óptimo de las celdas electrolíticas SS 316 L

Para demostrar resultados en la producción de gas HHO, se utilizó el diseño de la Figura 8, en la cual se hicieron dos pruebas en las mismas condiciones, excepto por la temperatura de ambiente. Según la Figura 16 muestra mayor producción de gas HHO al pasar el tiempo, sin embargo, esta mayor producción de gas HHO, se debe principalmente al aumento de temperatura en el electrolizador lo que produce evaporación y reduce la eficiencia del generador, por tal razón se optó por detener pruebas adicionales, ya que la tesis busca producir la mayor cantidad de gas HHO reduciendo la mayor cantidad de materiales y elementos químicos con un mantenimiento adecuado.

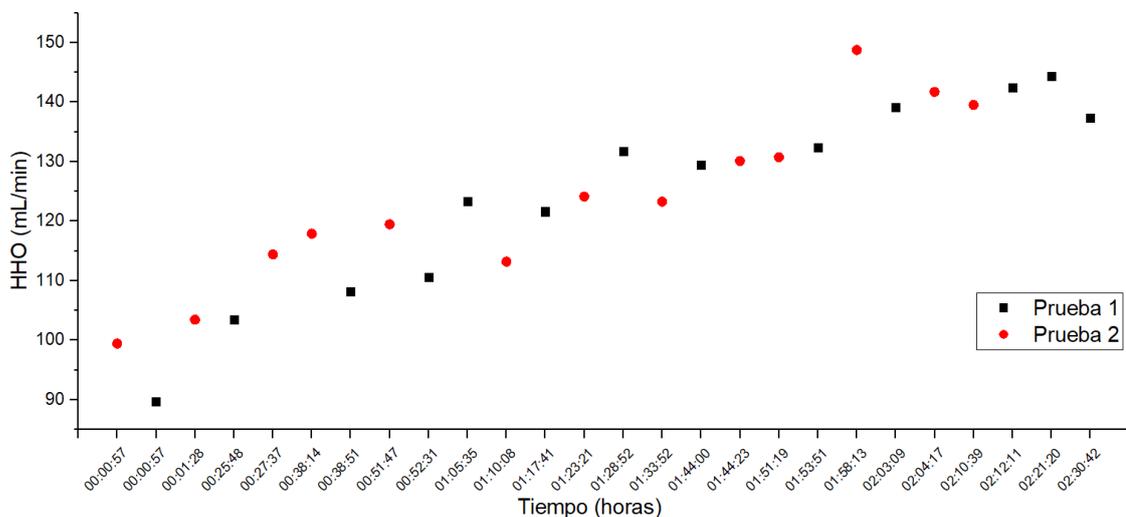


Figura 16. Producción de gas HHO sin mantenimiento

La prueba 1 se hizo a las 3:00 a.m. en una temperatura de ambiente fría, y la prueba 2 se hizo a las 12:00 m. en una temperatura de ambiente cálida, motivo por el cual, la producción de gas HHO en la prueba 1 es ligeramente menor a la prueba 2.

Al notar la evaporación en ambas pruebas, se añadió un envase extra con agua que refrigere al electrolizador. También se añadiendo el cargador de batería conectado a la batería para que tuviese mayor utilidad el electrolizador.

Las pruebas para la producción de gas HHO se realizaron en 62 ensayos, cada ensayo consistió en un inicio de que la batería este completamente cargada, el envase del electrolizador y el burbujeador estén bien selladas, y para finalizar cada ensayo se observó que el voltaje de la batería no baje más de 12 V, ya que se deteriora más rápidamente y reduce su vida útil (Plaza, 2020).

Según el diseño óptimo, el uso de las 5 celdas electrolíticas neutras es eficiente, según la Figura 17, ya que reparte casi teóricamente el voltaje entre las placas, y así demostraría que el diseño este hecho para un uso eficiente del acero inoxidable.

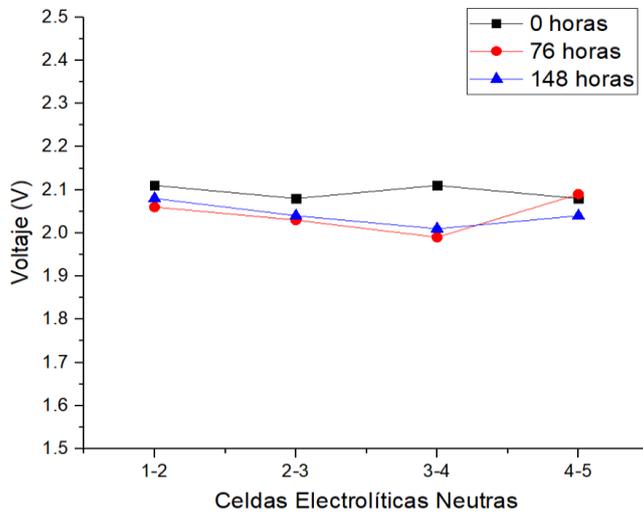
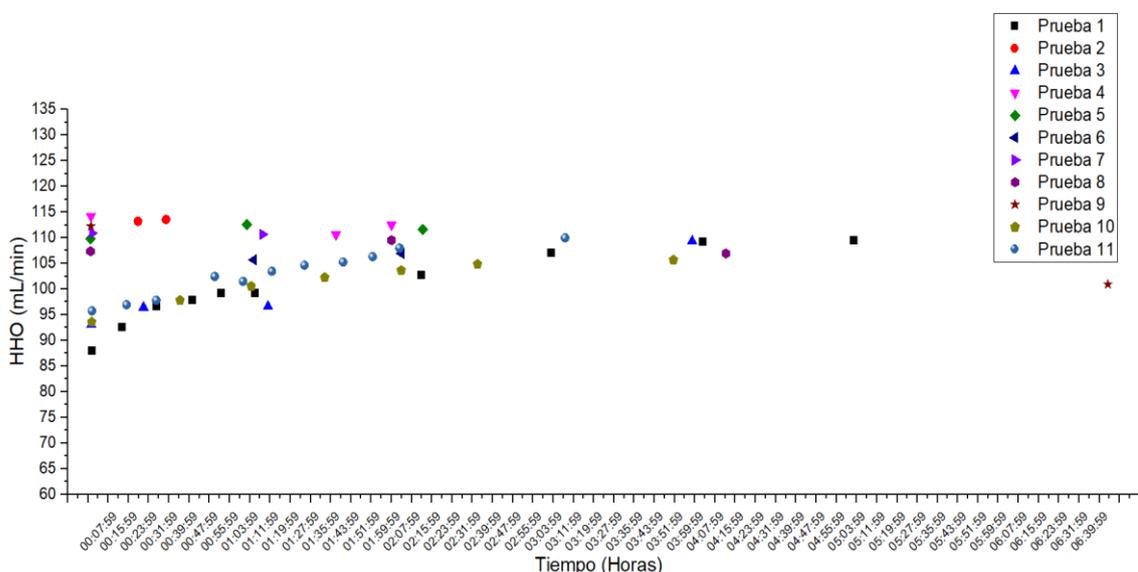


Figura 17. Voltaje entre celdas electrolíticas neutras

La producción de gas HHO en el electrolizador varía entre un rango de 88.1 mL/min hasta un máximo de 114.2 mL/min según la Figura 18, la variación de producción de gas HHO antes de las 1 h 20 min se debe a la temperatura de ambiente, las pruebas con más producción de gas HHO antes de las 1 h 20 min se debe a que se realizaron en la mañana y tarde, mientras que las pruebas con menos producción de gas HHO antes de las 1 h 20 min se debe a que se realizaron en la noche y madrugada. Al pasar 1 h 20 min, la producción de gas HHO en todas las pruebas reducen el rango entre 102 mL/min a 112 mL/min.



*Figura 18.* Producción de gas HHO

Las pruebas anteriormente observadas fueran hechas continuamente, alcanzando las 148 h 23 min. Llegando a un resultado de producción de 104.24 mL/min con un electrolizador de 1C-5N-1A.

Antes de aplicar el ANOVA a los datos, se hizo la prueba de normalidad y homocedasticidad en los datos registrados a las 0 horas, 77 horas y 139 horas.

Tabla 6

*Pruebas de normalidad*

Tiempo	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
0 horas	0.158	10	.200*	0.949	10	0.655
77 horas	0.170	7	.200*	0.925	7	0.508
139 horas	0.139	11	.200*	0.961	11	0.781

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

La Tabla 6 muestra todas las pruebas 0 horas, 77 horas y 139 horas, todas las pruebas tienen menos a 50 datos, por lo que se utilizó Shapiro-Wilk. La misma tabla expone las significancias de todos los grupos, de manera que todas las significancias resultantes muestran valores mayores a 0.05, por lo que se deduce aceptar la hipótesis nula y rechazamos la hipótesis alterna, entonces todas las pruebas tienen una distribución normal.

Tabla 7

*Prueba de homocedasticidad*

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Se basa en la media	1.396	2	25	0.266
Se basa en la mediana	1.025	2	25	0.373
Se basa en la mediana y con gl ajustado	1.025	2	20.196	0.377
Se basa en la media recortada	1.471	2	25	0.249

En vista de que p-valor obtenido ( $p=0.266 > \alpha=0.05$ ) en la Tabla 7, entonces no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Este resultado confirma que los datos presentan varianzas iguales.

Una vez confirmado la normalidad de datos y la homocedasticidad, se aplica la prueba de ANOVA de un solo factor.

Tabla 8

*Prueba estadística - ANOVA*

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	37.537	2	18.769	0.610	0.551
Dentro de grupos	769.053	25	30.762		
Total	806.591	27			

La Tabla 8 muestra un  $p = 0.551$  lo cual es mayor a 0.05, lo que demuestra que no existe suficiente evidencia para rechazar a la hipótesis nula. De igual forma el resultado de la significancia confirma que la producción de gas HHO no disminuye antes de las 143 de uso a pesar de tener óxido en la superficie de las celdas electrolíticas.

La producción de gas HHO no disminuye antes de las 143 horas de uso debido a que de alguna manera la corriente que disminuye por la oxidación al pasar el tiempo es compensada por el aumento de voltaje.

### 4.3. Mantenimiento adecuado para la producción de gas HHO

#### 4.3.1. Tiempo de funcionamiento en relación al voltaje

Se mantuvo en funcionamiento el generador de gas HHO hasta llegar a los parámetros para un mantenimiento, por lo que después del primer uso del generador para la producción de gas HHO, al llegar las 143 horas de uso se observó que después de 5 minutos de funcionamiento, el voltaje era 12.95 voltios según muestra la Figura 19.

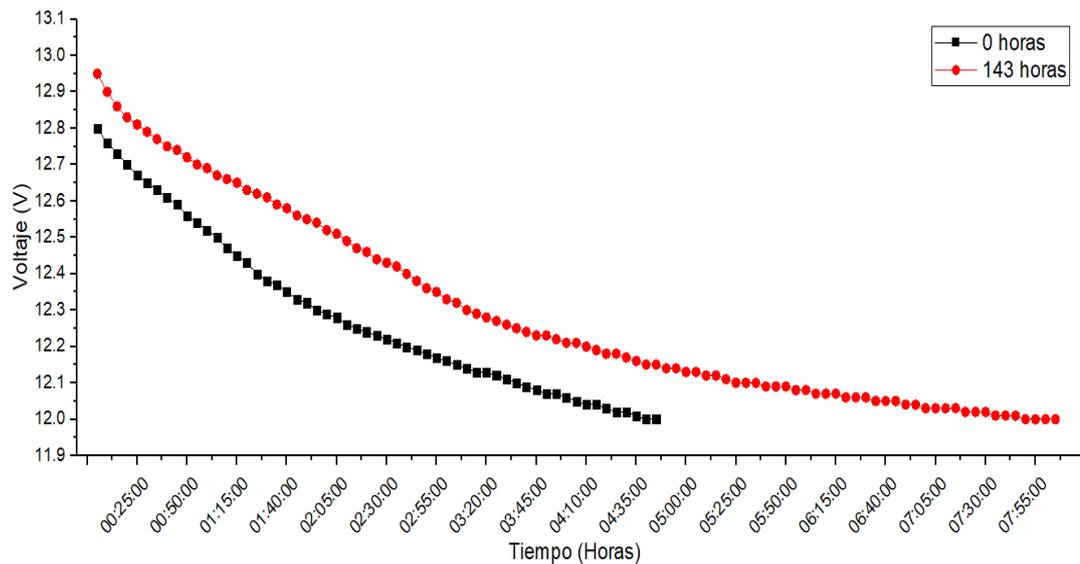


Figura 19. Diferencia de voltajes entre la primera y última prueba

La Figura 19 muestra que mientras las celdas electrolíticas tengan mayor tiempo de uso, es necesario mayor voltaje para la producción de gas HHO.

Tabla 9

*Pruebas de normalidad*

Horas	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
0 horas	0.110	57	0.085	0.920	57	0.001
143 horas	0.147	97	0.000	0.887	97	0.000

a. Corrección de significación de Lilliefors

La Tabla 9 muestra las dos pruebas 0 horas y 143 horas, el primer grupo tiene 57 datos y el segundo grupo tiene 97 datos, por lo que se utilizó Kolmogorov-Smirnov. La misma tabla expone las significancias de los dos grupos, de manera que el primer grupo tiene  $p > 0.05$  y el segundo grupo tiene  $p < 0.05$ , por lo que se deduce que en el primer grupo se acepta la hipótesis nula y rechazamos la hipótesis alterna, y en el segundo grupo, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna, entonces se aplicó métodos paramétricos y no paramétricos debido a la significancia de los dos grupos.

Tabla 10

*Prueba de homocedasticidad*

	<b>Estadístico de Levene</b>	<b>gl1</b>	<b>gl2</b>	<b>Sig.</b>
Se basa en la media	2.786	1	152	0.097
Se basa en la mediana	1.240	1	152	0.267
Se basa en la mediana y con gl ajustado	1.240	1	146.426	0.267
Se basa en la media recortada	2.364	1	152	0.126

En vista de que p-valor obtenido ( $p=0.097 > \alpha=0.05$ ) en la Tabla 10, entonces no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Este resultado confirma que los datos presentan varianzas iguales.

Una vez confirmado la normalidad de datos y la homocedasticidad, se aplicó el T-student para muestras independientes en el sentido de ser una prueba paramétrica, según muestra la Tabla 11.

Tabla 11

*Prueba paramétrica de muestras independientes*

	<b>Prueba t para la igualdad de medias</b>		
	<b>Sig. (bilateral)</b>	<b>Diferencia de medias</b>	<b>Diferencia de error estándar</b>
Se asumen varianzas iguales	0.815	-0.00991	0.04222
No se asumen varianzas iguales	0.807	-0.00991	0.04056

Según muestra la Tabla 11, p-valor obtenido ( $p=0.815 > \alpha=0.05$ ) entonces se afirma que no hay una diferencia significativa entre estos dos grupos 0 horas y 143 horas.

Calculando como una prueba no paramétrica, se aplicó U de Mann Whitney para muestras independientes.

Tabla 12

*Prueba no paramétrica de muestras independientes*

	Voltaje (V)
U de Mann-Whitney	2706.500
W de Wilcoxon	7459.500
Z	-0.217
Sig. asintótica(bilateral)	0.828

Según muestra la Tabla 12, p-valor obtenido ( $p=0.828 > \alpha=0.05$ ) entonces se afirma que no hay una diferencia significativa entre estos dos grupos 0 horas y 143 horas.

Asimismo, se concluye que no hay diferencia significativa entre los dos grupos 0 horas y 143 horas en relación al voltaje con pruebas paramétricas y no paramétricas.

#### 4.3.2. Tiempo de funcionamiento en relación a la corriente

Desde el primer uso hasta el último, el electrolizador no consume más de 6 amperios según muestra la Figura 20, por lo que estaría respetando el parámetro para un mantenimiento.

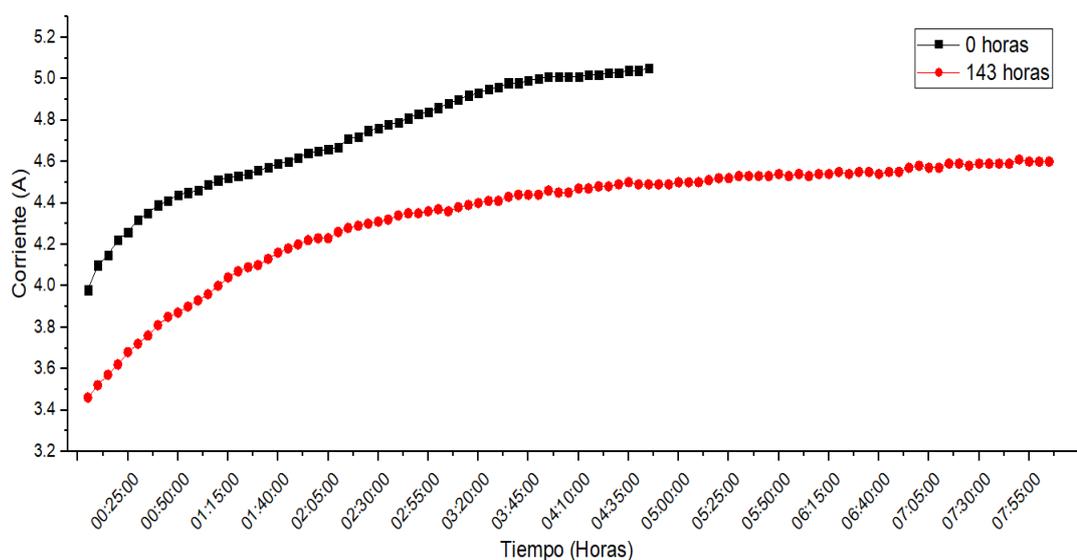


Figura 20. Diferencia de corriente entre la primera y última prueba

La Figura 20 muestra que mientras las celdas electrolíticas tengan mayor tiempo de uso, el consumo de corriente es menor a través del tiempo para la producción de gas HHO.

Tabla 13

*Pruebas de normalidad*

Horas	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
0 horas	0.111	57	0.079	0.928	57	0.002
143 horas	0.193	97	0.000	0.805	97	0.000

La Tabla 13 muestra las dos pruebas 0 horas y 143 horas, el primer grupo tiene 57 datos y el segundo grupo tiene 97 datos, por lo que se utilizó Kolmogorov-Smirnov. La misma tabla expone las significancias de los dos grupos, de manera que el primer grupo tiene  $p > 0.05$  y el segundo grupo tiene  $p < 0.05$ , por lo que se deduce que en el primer grupo se acepta la hipótesis nula y rechazamos la hipótesis alterna, y en el segundo grupo, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna, entonces se aplicó métodos paramétricos y no paramétricos debido a la significancia de los dos grupos.

Tabla 14

*Prueba de homocedasticidad*

	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Se basa en la media	0.396	1	152	0.530
Se basa en la mediana	1.147	1	152	0.286
Se basa en la mediana y con gl ajustado	1.147	1	136.680	0.286
Se basa en la media recortada	0.732	1	152	0.393

En vista de que p-valor obtenido ( $p=0.530 > \alpha=0.05$ ) en la Tabla 14, entonces no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Este resultado confirma que los datos presentan varianzas iguales.

Una vez confirmado la normalidad de datos y la homocedasticidad, se aplicó el T-student para muestras independientes, según muestra la Tabla 15.

Tabla 15

*Prueba paramétrica de muestras independientes*

	Prueba t para la igualdad de medias		
	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar
Se asumen varianzas iguales	0.000	0.36478	0.04686
No se asumen varianzas iguales	0.000	0.36478	0.04676

Según muestra la Tabla 15, p-valor obtenido ( $p=0.000 < \alpha=0.05$ ) entonces se afirma que hay una diferencia de corriente significativa entre estos dos grupos 0 horas y 143 horas.

Calculando como una prueba no paramétrica, se aplicó U de Mann Whitney para muestras independientes.

Tabla 16

*Prueba no paramétrica de muestras independientes*

	Voltaje (V)
U de Mann-Whitney	982.500
W de Wilcoxon	5735.500
Z	-6.670
Sig. asintótica(bilateral)	0.000

Según muestra la Tabla 16, p-valor obtenido ( $p=0.000 > \alpha=0.05$ ) entonces se afirma que hay una diferencia significativa entre estos dos grupos 0 horas y 143 horas.

Asimismo, se concluye que hay diferencia significativa entre los dos grupos 0 horas y 143 horas en relación a la corriente con pruebas paramétricas y no paramétricas.

Del mismo modo que la corriente disminuye el voltaje aumenta tal como muestran las Figuras 19 y 20, esto es debido a que la película de oxido que se forma en las celdas electrolíticas no permite la transferencia de energía entre las celdas electrolíticas.

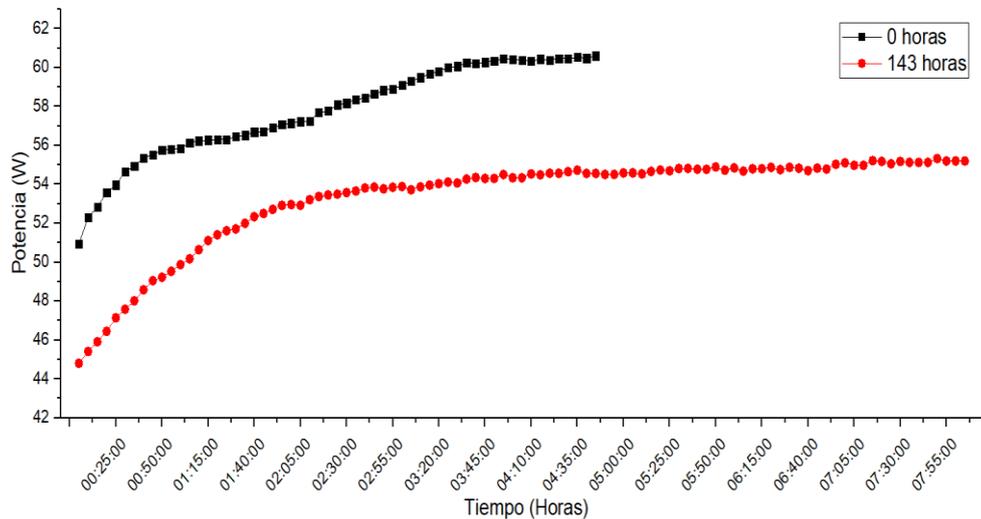
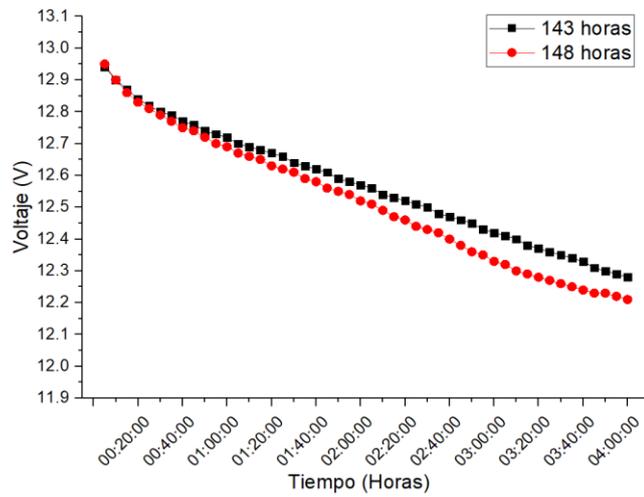


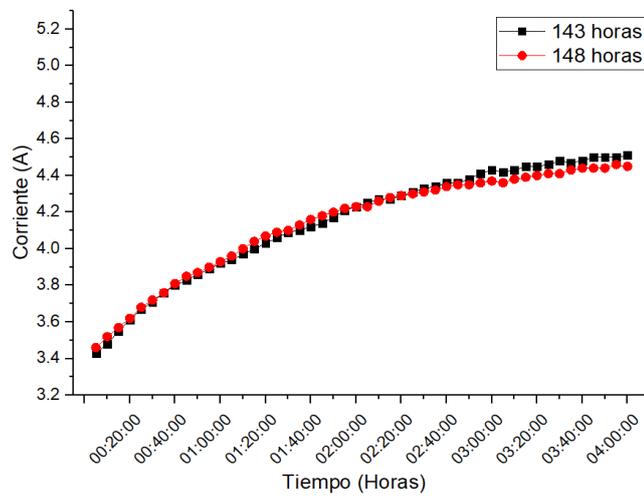
Figura 21. Diferencia de potencia consumida entre la primera y última prueba

En cuanto al consumo de potencia, el primer uso del generador de gas HHO es la que consume más energía, sin embargo, las celdas que tienen oxido en su superficie después de 143 horas de uso consume menos energía produciendo casi la misma cantidad de gas HHO.

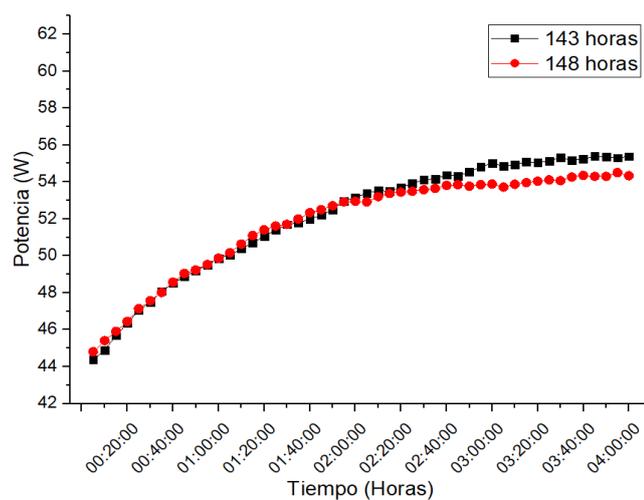
El mantenimiento de las celdas electrolíticas a partir de las 143 horas hacia adelante es necesario, ya que la película de oxido en las celdas electrolíticas disminuye el paso de corriente, por tal motivo el voltaje aumenta, compensando de una manera la potencia necesaria para la producción de gas HHO, sin embargo, el voltaje no pasará de los 12.95 V de la batería por su tiempo de uso, como muestra la Figura 19, ya que una batería completamente cargada y buen estado muestra un valor de 13 V, del mismo modo, el amperaje no aumentará, ya que no hay buena transferencia de corriente debido al oxido que rodea a las celdas electrolíticas, por tanto se recomienda a partir de las 143 horas un mantenimiento a las celdas electrolíticas.



(a)



(b)



(c)

Figura 22. Diferencia eléctrica entre las 143 y 148 horas de uso

(a) Voltaje, (b) Corriente, (c) Potencia

La Figura 22 muestra que después de las 143 horas de uso, el voltaje y amperaje disminuye, lo que demuestra que ya no hay compensación eléctrica para la producción de gas HHO, a partir de las 143 horas, es necesario un mantenimiento.

#### 4.4. Discusión

La producción de gas HHO a través de las celdas húmedas tiene muchas ventajas en relación con las celdas de tipo seco, tales como, mayor producción de gas HHO, fácil mantenimiento y manufactura; sus desventajas es que necesita mayor corriente, genera más calor en el electrolizador, y tiene más corrosión (Ismail et al., 2018), no obstante, la oxidación en las celdas húmedas no juega un papel en contra cuando hay un alimentador de energía continua, ya que genera casi la misma cantidad de gas HHO en comparación desde su primer uso hasta antes de las 143 horas, asimismo, la limpieza de las celdas de SS 316 L es sencillo cuando sale del electrolizador.

La producción de gas HHO respecto a la celda optima produce aproximadamente 104 mL/min, en relación a otras investigaciones que construyeron sus propios diseños, no consideraron el tema de temperatura, debido a que baja la eficiencia del generador de gas HHO por la evaporación de la solución electrolítica, del mismo modo tampoco consideraron el tema de división de voltaje equilibrado entre celdas electrolíticas neutras, ya que había una confusión con otros autores que mencionan que las celdas electrolíticas neutras dividen el voltaje en partes iguales (GÖLLEI, 2014; Nabil, 2019; Nabil & Khairat Dawood, 2019), contrariamente la Figura 9 y 11 demuestran que la división de voltaje en celdas electrolíticas no es en partes iguales, además los diseños que proponen una producción alta de gas HHO 1.16 L/min (El Soly et al., 2021), 0.866 L/min (El Kady et al., 2020) y 0.75 L/min (Gad & Abdel Razek, 2021) fueron utilizados en un periodo de tiempo corto. Asimismo, la manipulación de amperaje en el electrolizador produce mayor cantidad de gas HHO.

## CONCLUSIONES

Primer objetivo: La producción de gas HHO utilizando el diseño óptimo antes del mantenimiento no reduce la producción de gas antes de las 143 horas de uso continuo por arriba de los 12 voltios; por el contrario, disminuye el consumo eléctrico produciendo aproximadamente la misma cantidad de gas HHO en el electrolizador desde el primer uso hasta las 143 horas de uso. No obstante, las horas de uso del electrolizador provoca un requerimiento mayor de voltaje y menor de corriente, lo que provoca un menor consumo de potencia y aumenta la generación de gas en un periodo más largo de tiempo. La producción de gas HHO después de las 1:30 horas es aproximadamente 104 mL/min.

Segundo objetivo: El mantenimiento de las celdas electrolíticas antes de las 143 horas para la producción de gas HHO no es necesario debido a que no llega a los límites en voltaje y amperaje establecidos para un mantenimiento. Después de las 143 horas de uso el mantenimiento de las celdas electrolíticas es necesario, ya que el óxido que cubre a las celdas disminuye el paso de corriente, por tal motivo el voltaje aumenta, lo que significa que está compensando de una manera la potencia necesaria para la producción de gas HHO. El voltaje no pasa los 12.95 voltios debido al tiempo de uso de la batería, ya que una batería completamente cargada y en buen estado llega a los 13 voltios, del mismo modo, el amperaje no aumenta, ya que no hay buena transferencia de corriente debido al óxido que rodea a las celdas electrolíticas.

Diseño óptimo: La presencia de placas neutras en el generador de gas HHO no reduce el voltaje o la diferencia de potencial en la batería y en los electrodos (C y A), solo hay división de voltaje entre las placas neutras dentro y fuera de los electrodos (C y A). Asimismo, la presencia de placas fuera de los electrodos (C y A) en el generador de gas HHO aumenta el voltaje registrado en la batería y los electrodos (C y A) y además causa un menor consumo de energía en comparación de la configuración que no tiene placas fuera de los electrodos. Del mismo modo el incremento de placas neutras entre los electrodos (C y A): Reduce la corriente en los cables principales antes que se dividan; reduce la variación registrada entre en el voltaje de la batería y el voltaje de los electrodos (C y A); aumenta la curva en forma de U entre los voltajes registrados de las placas neutras; y mejorar la estabilidad en el consumo energético.



## RECOMENDACIONES

El electrolizador y el burbujeador debe estar bien sellados ya que la molécula gaseosa del hidrógeno es demasiado pequeña, y no permite una adecuada cuantificación de datos.

Se debe producir y cuantificar el hidrógeno en una zona amplia y con ventilación exterior, ya que el hidrógeno es un combustible gaseoso, inodoro y explosivo.

Los tubos de PVC transparentes que transportan el gas HHO al burbujeador y a la probeta invertida no deben tener el diámetro interior mayor a 7 mm, ya que crea pequeños golpes de ariete que perjudican el sellado del electrolizador y el burbujeador.

Para futuras investigaciones, usar materiales que sean más resistentes en cuanto a dureza, oxidación y corrosión.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdin, Z., Webb, C. J., & Gray, E. M. (2015). Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(39), 13243–13257. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.129>
- Abdul Mujeebu, M. (2016). Hydrogen and syngas production by superadiabatic combustion - A review. *Applied Energy*, 173, 210–224. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.018>
- Abhilash, R., Gopalakrishna, K., & Venkatesh, K. (2015). Performance evaluation of an IC Engine using Oxyhydrogen as a fuel supplement. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 74, 176–179.
- Abrego-Martínez, J. C., Moreno-Zuria, A., Wang, Y., Cuevas-Muñiz, F. M., Arriaga, L. G., Sun, S., & Mohamedi, M. (2017). Fabrication and evaluation of passive alkaline membraneless microfluidic DMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(34), 21969–21975. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.120>
- Ahn, J., Park, S. H., Lee, S., Noh, Y., & Chang, D. (2018). Molten carbonate fuel cell (MCFC)-based hybrid propulsion systems for a liquefied hydrogen tanker. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(15), 7525–7537. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.015>
- Al-Rousan, A. A. (2010). Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(23), 12930–12935. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.144>
- Anahara, R. (1992). Phosphoric acid fuel cells (PAFCs) for commercialization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 17(5), 375–379. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(92\)90175-V](https://doi.org/10.1016/0360-3199(92)90175-V)
- Appleby, A. J., Crepy, G., & Jacquelin, J. (1978). High efficiency water electrolysis in alkaline solution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3(1), 21–37. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(78\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0360-3199(78)90054-X)
- Arat, H. T., Baltacıoğlu, M. K., Özcanlı, M., & Aydın, K. (2016). Effect of using Hydroxy - CNG fuel mixtures in a non-modified diesel engine by substitution of diesel fuel.

- International Journal of Hydrogen Energy*, 41(19), 8354–8363.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.183>
- Argonne National Laboratory. (2004). *Basic Research Needs for the Hydrogen Economy; Report on the Basic Energy Sciences Workshop on Hydrogen Production, Storage, and Use*.
- Atlam, O., & Kolhe, M. (2011). Equivalent electrical model for a proton exchange membrane (PEM) electrolyser. *Energy Conversion and Management*, 52(8–9), 2952–2957. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.007>
- Bajpai, P. (2020). Renewable energy versus fossil resources. In P. Bajpai (Ed.), *Biotechnology in the Chemical Industry* (pp. 23–30). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818402-8.00003-3>
- Balamurugan, A., Rajeswari, S., Balossier, G., Rebelo, A. H. S., & Ferreira, J. M. F. (2008). Corrosion aspects of metallic implants — An overview. *Materials and Corrosion*, 59(11), 855–869.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/maco.200804173>
- Baltacıoğlu, M. K., Arat, H. T., Özcanlı, M., & Aydın, K. (2016). Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(19), 8347–8353. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.185>
- Baltacıoğlu, M. K. (2019). A novel application of pulse width modulation technique on hydroxy gas production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), 9726–9734. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.228>
- Baltacıoğlu, M. K., Kenanoglu, R., & Aydın, K. (2019). HHO enrichment of bio-diesohol fuel blends in a single cylinder diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(34), 18993–19004. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.060>
- Bari, S., & Mohammad Esmaeil, M. (2010). Effect of H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*, 89(2), 378–383.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.030>
- Bidault, F., Brett, D. J. L., Middleton, P. H., Abson, N., & Brandon, N. P. (2009). A new

- application for nickel foam in alkaline fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(16), 6799–6808. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.035>
- Bidault, F., Brett, D. J. L., Middleton, P. H., Abson, N., & Brandon, N. P. (2010). An improved cathode for alkaline fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(4), 1783–1788. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.035>
- Boyano, A., Blanco-Marigorta, A. M., Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2011). Exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming process for hydrogen production. *Energy*, 36(4), 2202–2214. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.020>
- Burmistrz, P., Chmielniak, T., Czepirski, L., & Gazda-Grzywacz, M. (2016). Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification. *Journal of Cleaner Production*, 139, 858–865. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.112>
- Calvert, J. (2008). *Hydrogen*. <http://mysite.du.edu/~jcalvert/phys/hydrogen.htm>
- Çelik, D., & Yıldız, M. (2017). Investigation of hydrogen production methods in accordance with green chemistry principles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), 23395–23401. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.104>
- Charradi, K., Ahmed, Z., Cid, R. E., Aranda, P., Ruiz-Hitzky, E., Ocon, P., & Chtourou, R. (2019). Amelioration of PEMFC performance at high temperature by incorporation of nanofiller (sepiolite/layered double hydroxide) in Nafion membrane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(21), 10666–10676. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.183>
- Chen, B., Xu, H., Tan, P., Zhang, Y., Xu, X., Cai, W., Chen, M., & Ni, M. (2019). Thermal modelling of ethanol-fuelled Solid Oxide Fuel Cells. *Applied Energy*, 237, 476–486. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.025>
- Chen, H., Xu, S., Pei, P., Qu, B., & Zhang, T. (2019). Mechanism analysis of starvation in PEMFC based on external characteristics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(11), 5437–5446. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.135>
- Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen

- production. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390–394.  
[https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)
- Colpan, C. O., & Ouellette, D. (2018). Three dimensional modeling of a FE-DMFC short-stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(11), 5951–5960.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.123>
- Conker, Ç. (2019). A novel fuzzy logic based safe operation oriented control technique for driving HHO dry cell systems based on PWM duty cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), 9718–9725.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.243>
- Davis, J. R. (1995). ASM speciality handbook: Stainless steels. *Materials and Corrosion*, 46(8), 499. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/maco.19950460815>
- Della Pietra, M., McPhail, S. J., Prabhakar, S., Desideri, U., Nam, S. W., & Cigolotti, V. (2016). Accelerated test for MCFC button cells: First findings. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(41), 18807–18814.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.021>
- Di Carlo, A., Bocci, E., & Dell’Era, A. (2011). Comparison by the use of numerical simulation of a MCFC-IR and a MCFC-ER when used with syngas obtained by atmospheric pressure biomass gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7976–7984. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.095>
- Dincer, I., & Acar, C. (2017). Innovation in hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(22), 14843–14864.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.107>
- Durairaj, R. B., Shanker, J., & Sivasankar, M. (2012). HHO gas with bio diesel as a dual fuel with air preheating technology. *Procedia Engineering*, 38, 1112–1119.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.140>
- El-Kassaby, M. M., Eldrainy, Y. A., Khidr, M. E., & Khidr, K. I. (2016). Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 243–251.  
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.016>

- El Kady, M. A., El Fatih Farrag, A., Gad, M. S., El Soly, A. K., & Abu Hashish, H. M. (2020). Parametric study and experimental investigation of hydroxy (HHO) production using dry cell. *Fuel*, 282, 118825. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118825>
- El Soly, A. K., El Kady, M. A., Farrag, A. E. F., & Gad, M. S. (2021). Comparative experimental investigation of oxyhydrogen (HHO) production rate using dry and wet cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(24), 12639–12653. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.110>
- Elsharnouby, O., Hafez, H., Nakhla, G., & El Naggar, M. H. (2013). A critical literature review on biohydrogen production by pure cultures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4945–4966. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.032>
- Ercelik, M., Ozden, A., Devrim, Y., & Colpan, C. O. (2017). Investigation of Nafion based composite membranes on the performance of DMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2658–2668. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.215>
- Falcão, D. S., Pereira, J. P., & Pinto, A. M. F. R. (2016). Numerical simulations of anode two-phase flow in Micro-DMFC using the volume of fluid method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(43), 19724–19730. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.264>
- Gad, M. S., & Abdel Razek, S. M. (2021). Impact of HHO produced from dry and wet cell electrolyzers on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(43), 22277–22291. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.077>
- Ghouse, M., Abaoud, H., Al-Boeiz, A., & Al-Zaharani, S. (1998). Fabrication and characterisation of the graphite bi-polar plates used in A 0.25 kW PAFC stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(8), 721–730. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00114-6)
- Giordano, N., Antonucci, P. L., Passalacqua, E., Pino, L., Aricò, A. S., Antonucci, V., Alderucci, V., & Recupero, V. (1994). Effect of platinum particle size on the

- performance of PAFC O<sub>2</sub> reduction electrocatalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19(2), 165–168. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(94\)90122-8](https://doi.org/10.1016/0360-3199(94)90122-8)
- GÖLLEI, A. (2014). Measuring and optimization of HHO dry cell for energy efficiency. *Acta Tehnica Corviniensis - Bulletin of Engineering*, 7(4), 19–22.
- Gulati, R. (2013). *Maintenance and Reliability Best Practices*.
- Gwak, G., Lee, K., Ferekh, S., Lee, S., & Ju, H. (2015). Analyzing the effects of fluctuating methanol feed concentration in active-type direct methanol fuel cell (DMFC) systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(15), 5396–5407. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.062>
- Hao Liu, J. C. Q. O., & Su, H. (2016). A review on prognostics of proton exchange membrane fuel cells. *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016*, 1–6.
- Hissel, D., & Pera, M. C. (2016). Diagnostic & health management of fuel cell systems: Issues and solutions. *Annual Reviews in Control*, 42, 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.09.005>
- Hoegh-Guldberg, O., & Bruno, J. F. (2010). The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science*, 328(5985), 1523–1528. <https://doi.org/10.1126/science.1189930>
- Hu, Q., Li, G., Pan, J., Tan, L., Lu, J., & Zhuang, L. (2013). Alkaline polymer electrolyte fuel cell with Ni-based anode and Co-based cathode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(36), 16264–16268. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.125>
- Huang, J., & Dincer, I. (2014). Parametric analysis and assessment of a coal gasification plant for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(7), 3294–3303. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.054>
- Huang, Y. guo, Fan, H. lin, Chen, Z. kai, Gu, C. bing, Sun, M. xue, Wang, H. qiang, & Li, Q. yu. (2016). The effect of graphene for the hydrogen evolution reaction in alkaline medium. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(6), 3786–3793. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.113>

- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., Babcock, R. C., Beger, M., Bellwood, D. R., Berkelmans, R., Bridge, T. C., Butler, I. R., Byrne, M., Cantin, N. E., Comeau, S., Connolly, S. R., Cumming, G. S., Dalton, S. J., Diaz-Pulido, G., ... Wilson, S. K. (2017). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, *543*, 373. [10.1038/nature21707](https://doi.org/10.1038/nature21707)
- Hydrogen Fuel System. (2017). *Calculation of maximum Hydrogen output*. <https://hydrogenfuelsystems.com.au/calculation-maximum-hydrogen-output/>
- Ibrahim, A. B. A., & Akilli, H. (2019). Supercritical water gasification of wastewater sludge for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(21), 10328–10349. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.184>
- Ilbas, M., & Kumuk, B. (2019). Numerical modelling of a cathode-supported solid oxide fuel cell (SOFC) in comparison with an electrolyte-supported model. *Journal of the Energy Institute*, *92*(3), 682–692. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.03.004>
- Instituto Geográfico Nacional. (2011). *Departamento de Puno*. [www.ign.gob.pe/](http://www.ign.gob.pe/)
- International Energy Agency. (2016). *World Energy Outlook 2016*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>
- International Energy Agency. (2018). *CO2 emissions from fuel combustion* (2018th ed.). [https://webstore.iea.org/download/direct/2505?fileName=CO2\\_Emissions\\_from\\_Fuel\\_Combustion\\_2019\\_Overview.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/2505?fileName=CO2_Emissions_from_Fuel_Combustion_2019_Overview.pdf)
- International Energy Agency. (2019). *Key world energy statistics*. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2019>
- IPCC. (2022). IPCC PRESS RELEASE 4. In *IPCC press releases* (Issue April). <https://www.ipcc.ch/2022/04/04/ipcc-ar6-wgiii-pressrelease/>
- Iranshahi, D., Pourazadi, E., Paymooni, K., Rahimpour, M. R., Jahanmiri, A., & Moghtaderi, B. (2011). A dynamic membrane reactor concept for naphtha reforming, considering radial-flow patterns for both sweeping gas and reacting materials. *Chemical Engineering Journal*, *178*, 264–275. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.08.005>

- Ismail, T. M., Ramzy, K., Abelwhab, M. N., Elnaghi, B. E., El-Salam, M. A., & Ismail, M. I. (2018). Performance of hybrid compression ignition engine using hydroxy (HHO) from dry cell. *Energy Conversion and Management*, *155*, 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.076>
- Ito, H. (2017). Economic and environmental assessment of phosphoric acid fuel cell-based combined heat and power system for an apartment complex. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(23), 15449–15463. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.038>
- Ivy, J. (2004). *Summary of Electrolytic Hydrogen Production: Milestone Completion Report*. [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)
- Jaiswal, N., Tanwar, K., Suman, R., Kumar, D., Upadhyay, S., & Parkash, O. (2019). A brief review on ceria based solid electrolytes for solid oxide fuel cells. *Journal of Alloys and Compounds*, *781*, 984–1005. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.015>
- Kalinci, Y., Hepbasli, A., & Dincer, I. (2009). Biomass-based hydrogen production: A review and analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *34*(21), 8799–8817. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.078>
- Kenanoğlu, R., Baltacıoğlu, M. K., Demir, M. H., & Erkinay Özdemir, M. (2020). Performance & emission analysis of HHO enriched dual-fuelled diesel engine with artificial neural network prediction approaches. *International Journal of Hydrogen Energy*, *xxxx*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.108>
- Kim, J.-H., Yonezawa, S., & Takashima, M. (2010). Preparation and characterization of Ni-PTFE plate as an electrode for alkaline fuel cell: Effects of conducting materials on the performance of electrode. *International Journal of Hydrogen Energy*, *35*(16), 8707–8714. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.05.110>
- Kovendhan, M., Kang, H., Jeong, S., Youn, J. S., Oh, I., Park, Y. K., & Jeon, K. J. (2019). Study of stainless steel electrodes after electrochemical analysis in sea water condition. *Environmental Research*, *173*(November 2018), 549–555. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.069>
- Kumar, G. A., & Rao, G. V. (2013). Performance characteristics of Oxy Hydrogen gas

- on two stroke petrol engine. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 6(7), 358–366.
- Kwok, C. T. (2012). *Laser Surface Modification of Alloys for Erosion and Corrosion Resistance*.
- Le Anh, T., Nguyen Duc, K., Tran Thi Thu, H., & Cao Van, T. (2013). Improving performance and reducing pollution emissions of a carburetor gasoline engine by adding HHO gas into the intake manifold. *SAE Technical Papers*, 1(March). <https://doi.org/10.4271/2013-01-0104>
- Lee, B., Chae, H., Choi, N. H., Moon, C., Moon, S., & Lim, H. (2017). Economic evaluation with sensitivity and profitability analysis for hydrogen production from water electrolysis in Korea. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(10), 6462–6471. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.153>
- Lee, J., Lee, S., Han, D., Gwak, G., & Ju, H. (2017). Numerical modeling and simulations of active direct methanol fuel cell (DMFC) systems under various ambient temperatures and operating conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(3), 1736–1750. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.087>
- Lee, J. Y., Lee, J. H., & Kim, T. S. (2019). Thermo-economic analysis of using an organic Rankine cycle for heat recovery from both the cell stack and reformer in a PEMFC for power generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(7), 3876–3890. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.071>
- Leelakrishnan, E., Lokesh, N., & Suriyan, H. (2013). Performance and Emission Characteristics of Brown'S Gas Enriched Air in Spark Ignition Engine. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(2), 393–404. <https://doi.org/2319-8753>
- Leonard, M. D., Michaelides, E. E., & Michaelides, D. N. (2020). Energy storage needs for the substitution of fossil fuel power plants with renewables. *Renewable Energy*, 145, 951–962. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.066>
- Levin, D. B., Pitt, L., & Love, M. (2004). Biohydrogen production: Prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(2), 173–185. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(03)00094-6)

- Ligthart, D. A. J. M., Van Santen, R. A., & Hensen, E. J. M. (2011). Influence of particle size on the activity and stability in steam methane reforming of supported Rh nanoparticles. *Journal of Catalysis*, 280(2), 206–220. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2011.03.015>
- Lim, H. (2015). Hydrogen selectivity and permeance effect on the water gas shift reaction (WGSR) in a membrane reactor. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(8), 1522–1527. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0359-x>
- Lindstrom, O., & Lavers, W. (1997). Cost engineering of power plants with alkaline fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(8), 815–823. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(96\)00232-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(96)00232-7)
- Logan, J. A., Régnière, J., & Powell, J. A. (2003). Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(3), 130–137. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0130:ATIOWG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0130:ATIOWG]2.0.CO;2)
- Lynch, J. (1995). Reliability, Maintainability and Supportability: A Probabilistic Approach. *Technometrics*, 37(1), 122. <https://doi.org/10.1080/00401706.1995.10485907>
- Ma, Z., Xiao, R., & Zhang, H. (2017). Catalytic steam reforming of bio-oil model compounds for hydrogen-rich gas production using bio-char as catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(6), 3579–3585. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.107>
- Marra, D. (2008). Gas distribution inside an MCFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(12), 3173–3177. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.03.005>
- Marra, D., & Bosio, B. (2007). Process analysis of 1MW MCFC plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(7), 809–818. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.016>
- Martens, W. J., Niessen, L. W., Rotmans, J., Jetten, T. H., & McMichael, A. J. (1995). Potential impact of global climate change on malaria risk. *Environmental Health Perspectives*, 103(5), 458–464. <https://doi.org/10.1289/ehp.95103458>
- Masdar, M. S., Dedikarni, Zainoodin, A. M., Rosli, M. I., Kamarudin, S. K., & Daud, W.

- R. W. (2017). Performance and stability of single and 6-cell stack passive direct methanol fuel cell (DMFC) for long-term operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14), 9230–9242. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.123>
- Masjuki, H. H., Ruhul, A. M., Mustafi, N. N., Kalam, M. A., Arbab, M. I., & Rizwanul Fattah, I. M. (2016). Study of production optimization and effect of hydroxyl gas on a CI engine performance and emission fueled with biodiesel blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(33), 14519–14528. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.273>
- McLean, G. F., Niet, T., Prince-Richard, S., & Djilali, N. (2002). An assessment of alkaline fuel cell technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(5), 507–526. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00181-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00181-1)
- Mehrpooya, M., Ghorbani, B., & Moradi, M. (2019). A novel MCFC hybrid power generation process using solar parabolic dish thermal energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(16), 8548–8565. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.014>
- Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994). The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. *The American Economic Review*, 84(4), 753–771. <http://www.jstor.org/stable/2118029>
- Merkel, A. (2019). *Climate-data*. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/peru/puno/puno-1013/>
- Miao, H., Chen, B., Wu, X., Wang, Q., Lin, P., Wang, J., Yang, C., Zhang, H., & Yuan, J. (2019). Optimizing strontium titanate anode in solid oxide fuel cells by ytterbium doping. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(26), 13728–13736. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.111>
- Milewski, J., Discepoli, G., & Desideri, U. (2014). Modeling the performance of MCFC for various fuel and oxidant compositions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(22), 11713–11721. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.151>
- Miller, J. R., & Russell, G. L. (1992). The impact of global warming on river runoff. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D3), 2757–2764.

- <https://doi.org/10.1029/91JD01700>
- Moyle, M. P., Morrison, R. B., & Churchill, S. W. (1960). Detonation characteristics of hydrogen-oxygen mixtures. *AIChE Journal*, 6, 92–96. <https://doi.org/10.1002/aic.690060118>
- Musmar, S. A., & Al-Rousan, A. A. (2011). Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines. *Fuel*, 90(10), 3066–3070. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.013>
- Nabil, T. (2019). Efficient Use of Oxy-hydrogen Gas (HHO) in Vehicle Engines. *Journal Europeen Des Systemes Automatises*, 52(1), 87–96. <https://doi.org/https://doi.org/10.18280/jesa.520112>
- Nabil, T., & Dawood, M. K. (2019). Impact of addition oxy-hydrogen gas (HHO) on vehicle engines performance and emissions. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 3(2), 177–190. <https://doi.org/10.30464/jmee.2019.3.2.177>
- Nabil, T., & Khairat Dawood, M. M. (2019). Enabling efficient use of oxy-hydrogen gas (HHO) in selected engineering applications; transportation and sustainable power generation. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117798. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117798>
- Nachlas, J. A. (1995). Fiabilidad. In *Isdefe Ingeniería de Sistemas*.
- National Kwikmetal Service. (2022). *Aceros Inoxidables 316 y 316L*. <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/aceros-inoxidables-316/>
- Nikolić, V. M., Žugić, D. L., Maksić, A. D., Šaponjić, D. P., & Marčeta Kaninski, M. P. (2011). Performance comparison of modified poly (vinyl alcohol) based membranes in alkaline fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(17), 11004–11010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.164>
- O'Connor, K. (n.d.). Hydrogen. In *NASA Glenn Safety Manual*.
- O'M Bockris, J. (2003). On hydrogen futures: toward a sustainable energy system. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 28). [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00030-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00030-7)

- Oh, Y., Kim, S.-K., Peck, D.-H., Jung, D.-H., & Shul, Y. (2014). Effects of membranes thickness on performance of DMFCs under freeze-thaw cycles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(28), 15760–15765. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.031>
- Omasa, R. (2008). *Hydrogen-oxygen gas generator and hydrogen-oxygen gas generating method using the generator*. Google Patents.
- Ostroverkh, A., Johánek, V., Dubau, M., Kúš, P., Khalakhan, I., Šmíd, B., Fiala, R., Václavů, M., Ostroverkh, Y., & Matolín, V. (2019). Optimization of ionomer-free ultra-low loading Pt catalyst for anode/cathode of PEMFC via magnetron sputtering. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.206>
- Pareta, M., Choudhury, S. R., Somaiah, B., Rangarajan, J., Matre, N., & Palande, J. (2011). Methanol reformer integrated phosphoric acid fuel cell (PAFC) based compact plant for field deployment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(22), 14771–14778. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.044>
- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310–317. <https://doi.org/10.1038/nature04188>
- Peña Arias, I. K., Trinke, P., Hanke-Rauschenbach, R., & Sundmacher, K. (2017). Understanding PEM fuel cell dynamics: The reversal curve. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(24), 15818–15827. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.087>
- Pirasaci, T. (2019). Non-uniform, multi-stack solid oxide fuel cell (SOFC) system design for small system size and high efficiency. *Journal of Power Sources*, 426, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.04.037>
- Plaza, D. (2020). *Porcentaje de carga de la batería del coche*. <https://www.motor.es/noticias/comprobar-estado-bateria-del-coche-202067832.html>
- Pourrahmani, H., Moghimi, M., & Siavashi, M. (2019). Thermal management in PEMFCs: The respective effects of porous media in the gas flow channel.

- International Journal of Hydrogen Energy*, 44(5), 3121–3137.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.222>
- Putha, P. K., & Babu, G. S. (2015). Performance of I.C engines using HHO Gas. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 04(16), 2994–2998.
- Rahimpour, M. R., Jafari, M., & Iranshahi, D. (2013). Progress in catalytic naphtha reforming process: A review. *Applied Energy*, 109, 79–93.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.080>
- Rahman, S. N. A., Masdar, M. S., Rosli, M. I., Majlan, E. H., Husaini, T., Kamarudin, S. K., & Daud, W. R. W. (2016). Overview biohydrogen technologies and application in fuel cell technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 137–162.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.047>
- Rakib, M. A., Grace, J. R., Lim, C. J., Elnashaie, S. S. E. H., & Ghiasi, B. (2010). Steam reforming of propane in a fluidized bed membrane reactor for hydrogen production. *Renewable Energy*, 35(12), 6276–6290.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.136>
- Recupero, V., Alderucci, V., Di Leonardo, R., Lagana, M., Zappala, G., & Giordano, N. (1994). 1 kW PAFC stack: a case history. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19(7), 633–639. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(94\)90223-2](https://doi.org/10.1016/0360-3199(94)90223-2)
- Rhodes, W. A. (1967). *Multicell oxyhydrogen generator*. Google Patents.
- Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C., & Pounds, J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421(6918), 57–60. <https://doi.org/10.1038/nature01333>
- Saadabadi, S. A., Thallam Thattai, A., Fan, L., Lindeboom, R. E. F., Spanjers, H., & Aravind, P. V. (2019). Solid Oxide Fuel Cells fuelled with biogas: Potential and constraints. *Renewable Energy*, 134, 194–214.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.028>
- Salam, M. A., Ahmed, K., Akter, N., Hossain, T., & Abdullah, B. (2018). A review of hydrogen production via biomass gasification and its prospect in Bangladesh.

- International Journal of Hydrogen Energy*, 43(32), 14944–14973.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.043>
- Salek, F., Zamen, M., & Hosseini, S. V. (2020). Experimental study, energy assessment and improvement of hydroxy generator coupled with a gasoline engine. *Energy Reports*, 6, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.009>
- Samuel, S., & McCormick, G. (2010). Hydrogen Enriched Diesel Combustion. *SAE Technical Paper Series*, 1(x). <https://doi.org/10.4271/2010-01-2190>
- Santilli, R. M. (2006). A new gaseous and combustible form of water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(9), 1113–1128.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.11.006>
- Seyitoglu, S. S., Dincer, I., & Kilicarslan, A. (2017). Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2592–2600. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.228>
- Shah, S. A. Q., Ali, Z., Larik, J., & Kaimkhani, A. A. (2018). Comparative study of dry cell and wet cell for the HHO gas generation as a supplement fuel for I.C. engine. *2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies: Invent, Innovate and Integrate for Socioeconomic Development, ICoMET 2018 - Proceedings, 2018-Janua*, 1–8.  
<https://doi.org/10.1109/ICOMET.2018.8346422>
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 810–853.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012>
- Sharma, D., Pathak, D. K., & Chhikara, K. (2015). Performance analysis of a four stroke multi-cylinder spark ignition engine powered by a Hydroxy gas booster. *Journal of Aeronautical and Automotive Engineering*, 2(1), 11–15.  
<http://www.krishisanskriti.org/jaae.html>
- Sharma, P. K., Sharma, D., Soni, S. L., Jhalani, A., Singh, D., Sharma, S., Kumar Sharma, P., Sharma, D., Lal Soni, S., Jhalani, A., Singh, D., & Sharma, S. (2020). Energy, exergy, and emission analysis of a hydroxyl fueled compression ignition engine under dual fuel mode. *Fuel*, 265(November 2019), 116923.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116923>

Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen Production by PEM Water Electrolysis – A Review. *Materials Science for Energy Technologies*.  
<https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>

Siracusano, S., Baglio, V., Briguglio, N., Brunaccini, G., Di Blasi, A., Stassi, A., Ornelas, R., Trifoni, E., Antonucci, V., & Aricò, A. S. (2012). An electrochemical study of a PEM stack for water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1939–1946. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.019>

Smith, P., Fang, C., Dawson, J. J. C., & Moncrieff, J. B. B. T.-A. in A. (2008). Impact of Global Warming on Soil Organic Carbon. *Advances in Agronomy*, 97, 1–43.  
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)00001-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)00001-6)

Song, R.-H., & Shin, D. R. (2001). Influence of CO concentration and reactant gas pressure on cell performance in PAFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(12), 1259–1262. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00064-7)

Subramanian, B., & Thangavel, V. (2020). Analysis of onsite HHO gas generation system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(28), 14218–14231.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.159>

Usman, M., Farooq, M., Naqvi, M., Saleem, M. W., Hussain, J., Naqvi, S. R., Jahangir, S., Usama, J., Muhammad, H., & Idrees, S. (2020). Use of Gasoline, LPG and LPG-HHO Blend in SI Engine: A Comparative Performance for Emission Control and Sustainable Environment. *Processes*, 8(1), 74.

Verhaert, I., Verhelst, S., Janssen, G., Mulder, G., & De Paepe, M. (2011). Water management in an alkaline fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(17), 11011–11024. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.172>

Viall, E. (1921). *Gas Torch and Thermit Welding*. Creative Media Partners, LLC.  
<https://books.google.com.pe/books?id=7aeJtAEACAAJ>

Wang, S., Ji, C., Zhang, J., & Zhang, B. (2011a). Comparison of the performance of a spark-ignited gasoline engine blended with hydrogen and hydrogen–oxygen mixtures. *Energy*, 36(10), 5832–5837.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.042>
- Wang, S., Ji, C., Zhang, J., & Zhang, B. (2011b). Improving the performance of a gasoline engine with the addition of hydrogen–oxygen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(17), 11164–11173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.05.138>
- Wang, T., Li, Q., Yin, L., & Chen, W. (2019). Hydrogen consumption minimization method based on the online identification for multi-stack PEMFCs system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4, 5074–5081. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.181>
- Wang, Y., Zheng, L., Han, G., Lu, L., Wang, M., Li, J., & Wang, X. (2014). A novel multi-porous and hydrophilic anode diffusion layer for DMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(33), 19132–19139. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.098>
- Xu, J., Chen, L., Tan, K. F., Borgna, A., & Saeys, M. (2009). Effect of boron on the stability of Ni catalysts during steam methane reforming. *Journal of Catalysis*, 261(2), 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2008.11.007>
- Yadav Milind, S., Sawant, S. M., Anavkar Jayesh, A., & Chavan Hemant, V. (2011). Investigations on generation methods for oxy-hydrogen gas, its blending with conventional fuels and effect on the performance of internal combustion engine. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 3(9), 325–332.
- Yan, Z., He, A., Hara, S., & Shikazono, N. (2019). Modeling of solid oxide fuel cell (SOFC) electrodes from fabrication to operation: Correlations between microstructures and electrochemical performances. *Energy Conversion and Management*, 190, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.002>
- Yang, P., Zhu, Y., Zhang, P., Zhang, H., Hu, Z., & Zhang, J. (2014). Performance evaluation of an alkaline fuel cell/thermoelectric generator hybrid system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(22), 11756–11762. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.166>
- Ye, F., Zhu, T., Mori, K., Xu, Q., Song, Y., Wang, Q., Yu, R., Wang, B., & Cao, X. (2021). Effects of dislocations and hydrogen concentration on hydrogen

- embrittlement of austenitic 316 stainless steels. *Journal of Alloys and Compounds*, 876, 160134. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160134>
- Yilmaz, A. C., Uludamar, E., & Aydin, K. (2010). Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 11366–11372. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.040>
- Zammit, G., Farrugia, M., & Ghirlando, R. (2012). Experimental investigation of the effects of hydrogen enhanced combustion in SI and CI engines on performance and emissions. *HEFAT 2012*.
- Zhang, Z., Liu, W., & Wang, Y. (2019). Three dimensional two-phase and non-isothermal numerical simulation of multi-channels PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(1), 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.149>
- Zoulias, E., & Varkaraki, E. (2004). A review on water electrolysis. *Tcjst*, 4(2), 41–71. <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/jorna1/docs/zoulias.pdf>
- Zuo, K., Yuan, Z., Cao, C., & Hao, Y. (2018). The mass transport based on convection effects in a passive DMFC under open-circuit conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(52), 23463–23474. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.196>
- Züttel, A. (2004). Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften*, 91(4), 157–172. <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>

## ANEXOS

### Anexo 1. Instrumentos de medición



Pinza Amperimétrica



Sello de garantía de la Pinza Amperimétrica



Multímetro



Sello de garantía del Voltímetro



Voltímetro 02



Balanza digital y su error respecto a pesas de calibración

## Anexo 2. Materiales e insumos



Batería



Cargador de batería



Hidroxido de Potasio (KOH)



Celdas SS 316 L



Agua Destilada



Probetas y Soporte Universal



Varilla roscada

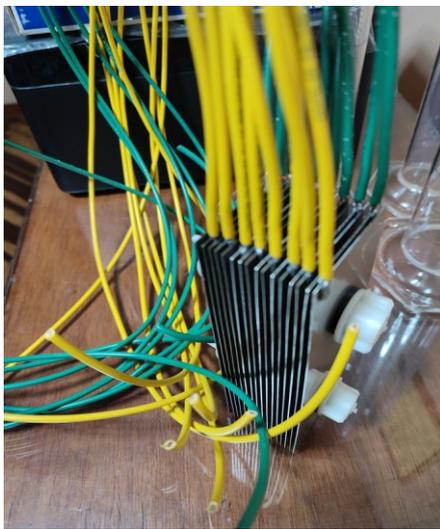


Juntas de goma

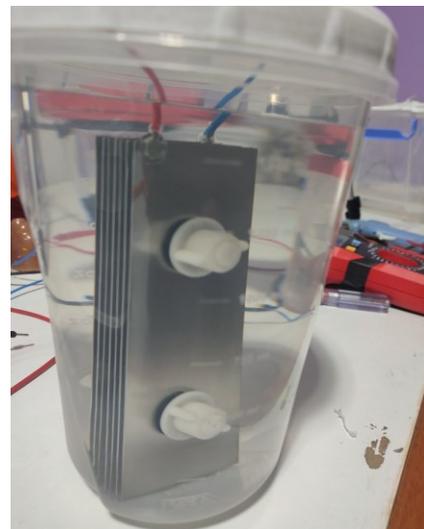
### Anexo 3. Generador de gas HHO



Materiales e instrumentos para el armado del generador HHO



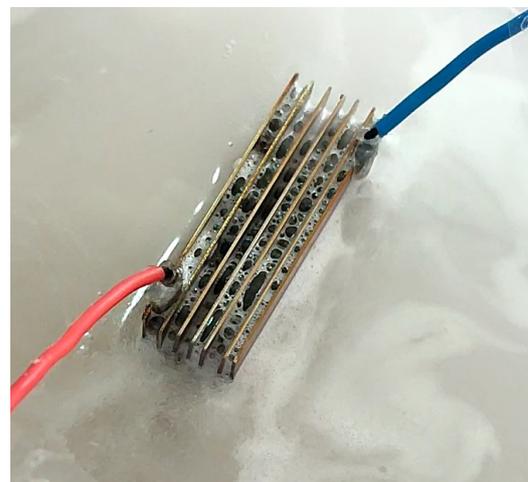
Armado de las celdas para el diseño óptimo



Armado de las celdas para la producción de gas HHO



Armado de las celdas para el registro de datos

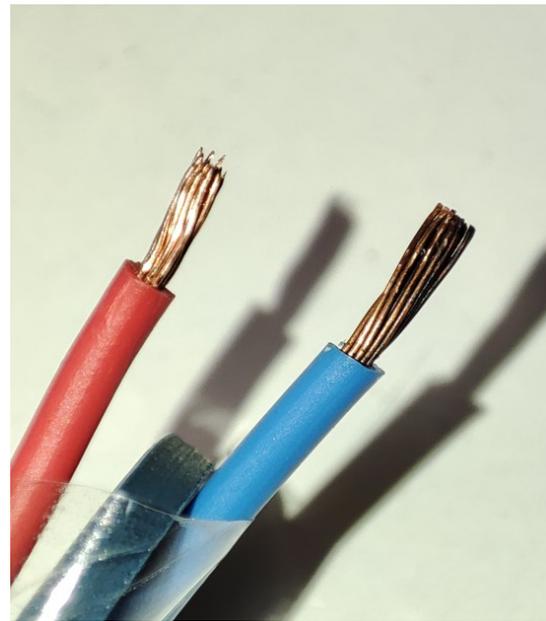


Producción de gas HHO en celdas electrolíticas

#### Anexo 4. Problemas en la generación de gas HHO

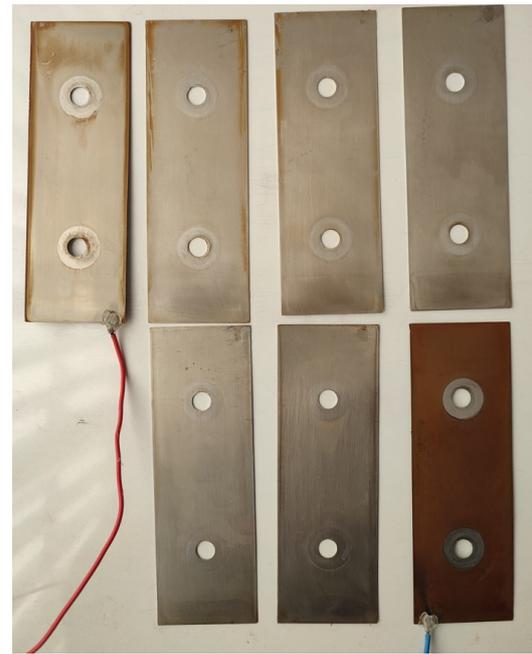
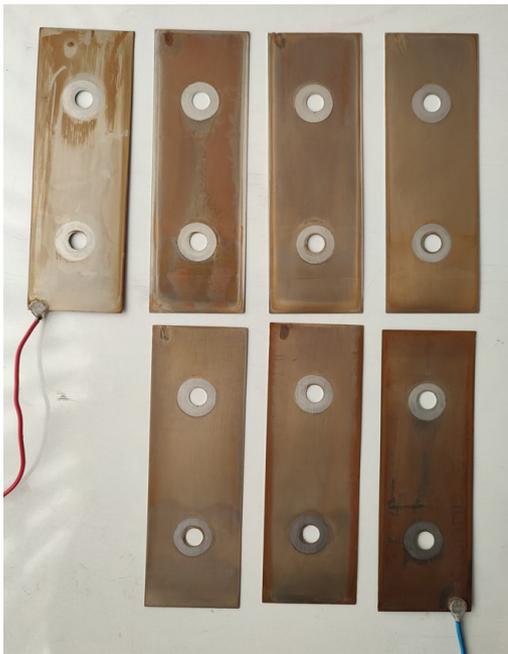


Comparación del cable de cobre utilizado en el electrodo y un cable sin uso

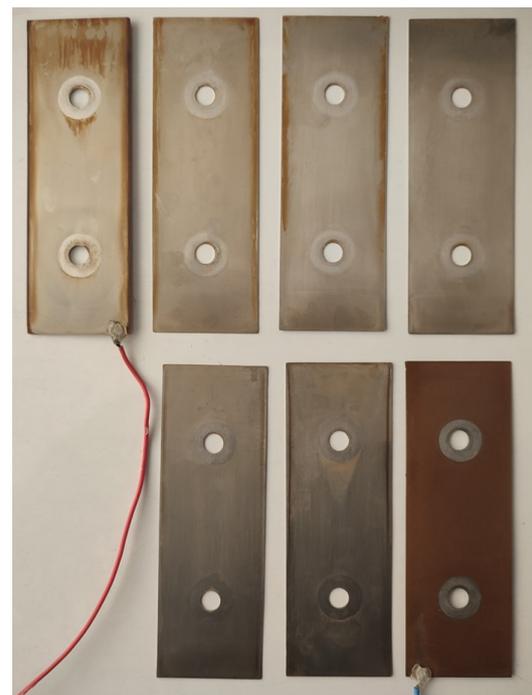
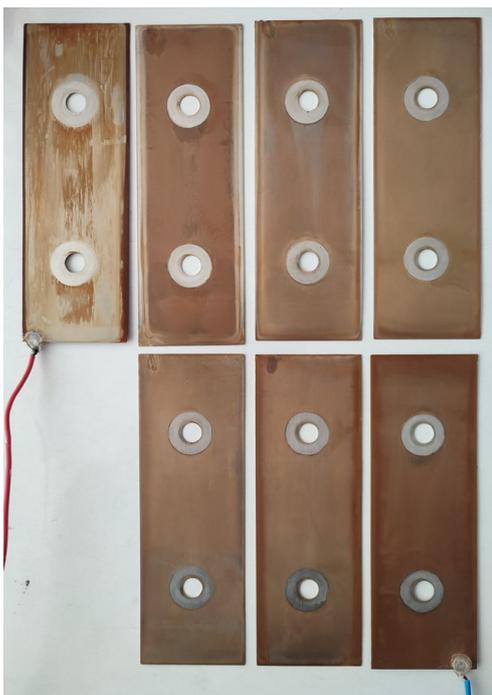


Comparación del cable de cobre sin uso (rojo) y el cable utilizado entre la batería y el electrolizador (azul)

Anexo 5. Fotos de las celdas después de 76 y 148 horas de uso



Celdas electrolíticas a las 76 horas de uso



Celdas electrolíticas a las 148 horas de uso

Anexo 6. Oxidación en las celdas electrolíticas después de 76 horas de uso



Cátodo Lado  
derecho



Cátodo Lado  
izquierdo



Primer neutro lado  
derecho



Primer neutro lado  
izquierdo



Segundo neutro  
lado derecho



Segundo neutro  
lado izquierdo



Tercer neutro lado  
derecho



Tercer neutro lado  
izquierdo



Cuarto neutro lado  
derecho



Cuarto neutro lado  
izquierdo



Quinto neutro lado  
derecho



Quinto neutro lado  
izquierdo



Ánodo Lado  
derecho



Ánodo Lado  
izquierdo

Anexo 7. Oxidación en las celdas electrolíticas después de 148 horas de uso



Cátodo Lado  
derecho



Cátodo Lado  
izquierdo



Primer neutro lado  
derecho



Primer neutro lado  
izquierdo



Segundo neutro  
lado derecho



Segundo neutro  
lado izquierdo



Tercer neutro lado  
derecho



Tercer neutro lado  
izquierdo



Cuarto neutro lado  
derecho



Cuarto neutro lado  
izquierdo



Quinto neutro lado  
derecho



Quinto neutro lado  
izquierdo



Ánodo Lado  
derecho



Ánodo Lado  
izquierdo