



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

# DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO ADAPTADO A UN MOTOR DE DOS (2) TIEMPOS EN UNA BICICLETA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

*Design, construction and evaluation of a hydrogen generator adapted  
to a two (2) stroke engine on a bicycle in the city of Bogotá*

YIMI LEANDRO RODRÍGUEZ RAMÍREZ<sup>1</sup>, SONIA ALEXANDRA SANDOVAL SUÁREZ<sup>2</sup>,  
DAVID SEBASTIÁN SANTOS MORENO<sup>3</sup>

*Recibido: 12 de abril de 2021. Aceptado: 30 de mayo de 2021*

DOI: <http://dx.doi.org/10.21017/rimci.2022.v9.n18.a121>

## Resumen

El presente artículo muestra la segunda fase de desarrollo de la propuesta de diseño, construcción y evaluación de un generador de hidrógeno para bicicleta que será incorporado a un motor de dos (2) tiempos como alternativa de movilidad en la ciudad de Bogotá. La fase 1 consiste en el análisis de mercado que fue presentado y publicado en la edición anterior de la presente revista. El objetivo de este trabajo hace parte del aprovechamiento de H<sub>2</sub> para contribuir en el desarrollo de soluciones que mitiguen el impacto ambiental.

**Palabras clave:** Hidrógeno (H<sub>2</sub>); prototipo; generador; electrólisis; motor; bicicleta.

## Abstract

This article shows the second phase of development of the proposal for the design, construction, and evaluation of a hydrogen generator for bicycles that will be incorporated into a two (2) stroke engine as a mobility alternative in the city of Bogotá. Phase 1 consists of the market analysis that was presented and published in the previous edition of this journal. The objective of this work is part of the use of H<sub>2</sub> to contribute to the development of solutions that mitigate the environmental impact.

**Keywords.** Hydrogen (H<sub>2</sub>); prototype; generator; electrolysis; engine; bike.

## I. INTRODUCCIÓN

EN ESTA segunda fase frente a los requerimientos técnicos se basó en el acero 316L, su mecanismo técnico de producción por celda seca, y ajuste de láminas neutras, positivas y negativas. Para el boceto del prototipo se logró diseñar tres versio-

nes con sus correspondientes planos, ajustando estos mediante prueba de ensayo y error en la generación de hidrógeno, hermeticidad y ensamble de todo el sistema embebido llegando a una versión de 3 placas negativas, 2 positivas y las neutras se reemplazaron por cilindros en acrílico y como electrólito el bicarbonato de sodio NaHCO<sub>3</sub>.

1 Ingeniero Industrial–Corporación Universitaria Republicana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9684-435X>. Correo electrónico: [yl.rodriguez@urepublicana.edu.co](mailto:yl.rodriguez@urepublicana.edu.co)

2 Ingeniera Industrial–Corporación Universitaria Republicana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7157-1941>. Correo electrónico: [sa.sandoval@urepublicana.edu.co](mailto:sa.sandoval@urepublicana.edu.co)

3 Ingeniero Industrial–Corporación Universitaria Republicana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7634-0891>. Correo electrónico: [ds.santos@urepublicana.edu.co](mailto:ds.santos@urepublicana.edu.co)

Como resultado de las mediciones presión del gas generado, variación de la corriente, temperatura y concentración del electrólito en las celdas del prototipo se encontró que con 5 amperios de alimentación produce 0,54 gramos de H<sub>2</sub> por cada hora, equivalente a 77,116 KJ de acuerdo con la entalpía de formación del hidrógeno en el proceso de electrólisis. Por otro lado, presiones generadas en función de la concentración del electrólito en g/L; la temperatura y el tiempo, encontrándose que la variable que más afecta la presión es la concentración, siguiendo un comportamiento de tipo cuadrático de la forma  $\text{Presión (g/L)} = 0,0117 (\text{g/L})^2 - 1,9695 (\text{g/L}) + 470,96$ . Siendo entonces 470,96 mm Hg el punto de corte que refiere si se agregase solo agua sin electrólito, matemáticamente se podría decir que el prototipo es capaz de generar gas posiblemente hidrógeno. Finalmente, el rendimiento de generación de hidrógeno en función de la corriente de alimentación del prototipo  $g \text{ H}_2 (\Delta I)$  sigue el modelo de  $g \text{ H}_2 (\Delta I) = 0,3761 (\text{amperios}) - 0,0016$  donde 145 amperios es la cantidad suficiente de hidrógeno y pueda llegar a la potencia un motor de 2,9 HP.

En la tercera fase se realizó una propuesta final de adaptación del prototipo “generador de hidrógeno (H<sub>2</sub>)” a una bicicleta que contiene un motor de dos tiempos como alternativa de movilidad en la ciudad de Bogotá está basada 3 puntos: batería recargable de 12V y 150 amperios; generador de hidrógeno H<sub>2</sub> y la ubicación del motor de 2 tiempos.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La pandemia ocasionada por el COVID-19 obligó a los bogotanos a utilizar nuevamente la bicicleta debido al aforo en el transporte público evitando así aglomeraciones y posibilidad de contagio.

La incorporación de un prototipo denominado “generador de hidrógeno (H<sub>2</sub>)” en medios de transporte como la bicicleta, es una alternativa que satisface la necesidad de desplazarse desde un punto “A” a un punto “B” durante trayectos medianos y largos, evitando el desgaste físico que puede generarle a la persona.

Según los estudios realizados por Peretti, Martins, Spinadel & Zinola enfocados a las

características físicas y químicas del hidrógeno, revelan que su aplicación en la actualidad es viable[1]. La utilización de herramientas tecnológicas permite obtener y producir H<sub>2</sub> y ser aplicado en diferentes medios de transporte, uno de estos, la bicicleta.

El H<sub>2</sub> es un combustible que puede producirse a partir de una gran variedad de compuestos, variadas técnicas y a la vez puede ser utilizado en distintos procesos. Puede ser quemado en un motor a combustión en forma individual o como mezcla con combustible convencional, puede ser utilizado en una celda de combustible para generar electricidad o como reactante para crear otros combustibles sintéticos[2].

De los métodos de obtención de hidrógeno que se conocen en la actualidad, está el proceso de electrólisis, la eficiencia de este proceso no genera residuos contaminantes en comparación a otros métodos existentes logrando ser el candidato para la aplicación e implementación del H<sub>2</sub> en motores de combustión interna, según Vásquez y Salinas, la producción de H<sub>2</sub> puede desarrollarse para cubrir diferentes tipos de necesidades y una de estas la movilidad[2].

## III. HIDRÓGENO (H<sub>2</sub>) COMO COMBUSTIBLE DEL FUTURO

Como se muestra en la tabla I el H<sub>2</sub> es el primer elemento de la tabla periódica. Es el elemento químico más ligero que existe, su átomo está formado por un protón y un electrón en forma de molécula diatómica (H<sub>2</sub>). En condiciones normales se encuentra en estado gaseoso, es insípido, incoloro e inodoro y en la Tierra constituye aproximadamente el 75% de la materia del Universo[3].

Las características físicas y químicas del hidrógeno como lo define Causape en su libro “las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en vehículos y su proyección de futuro”, el hidrógeno es el gas menos denso, como se observa en la tabla II este tiene una densidad de 0,08376 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C y 1 bar. Su poder calorífico inferior es muy elevado por unidad de masa (119,83 kJ/g frente a 55,53 KJ/g del metano) pero, debido a su baja densidad, su poder calorífico inferior por unidad de volumen es muy bajo (10,050 KJ/m<sup>3</sup>) frente a, por

**Tabla I.** Propiedades del hidrógeno[4]

Propiedades del hidrógeno	
Z	1
Peso atómico	1,0079
Densidad (gr/ml)	0,0700
Volumen molar (mls)	28,6
Punto de fusión (K)	13.957 K a 54 mm. (punto triple)
Punto de ebullición (K)	20,39 K
Calor vaporización (KJ. mol <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )	0,903
Potencial ionizante (eV)	13,54
Energía de hidratación H + (Kcal. mol <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )	269
Energía de enlace H-H (Kcal. mol <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> )	104,2
Radio covalente (en H <sub>2</sub> )	0,3707
Electroafinidad (eV)	0,715
Radio iónico H- (en LiH)	1,36
Electronegatividad (Pauling)	2,1
Abundancia % (litosfera e hidrosfera)	1% (15,4 átomos)

**Tabla II.** Propiedades termodinámicas del hidrógeno vs metano[5]

Propiedades	Hidrógeno	VS	Metano
Densidad	0,08376 kg/m <sup>3</sup>	VS	0,657 kg/m <sup>3</sup>
Poder calorífico por unidad de masa	119,83 KJ/g	VS	55,53 KJ/g
Poder calorífico por unidad de volumen	10,050 KJ/m <sup>3</sup>	VS	32.560 KJ/m <sup>3</sup>

ejemplo, los 32.560 KJ/m<sup>3</sup> de metano a 15 °C y 1 bar. El hidrógeno tiene muy baja energía de activación y muy amplios rangos de inflamabilidad y explotabilidad, por lo que cualquier mezcla con aire prende o explota fácilmente[5].

Estas propiedades expuestas por Causape han permitido la realización de estudios enfocados en la producción e implementación del hidrógeno, ya que al no encontrarse libre en la naturaleza y para obtenerlo se debe realizar a través de algunos

métodos como “la descomposición electrolítica del agua, gasificación de la biomasa, producción biológica, ciclos termoquímicos, extracción del metano, entre otros”[6].

### A. Métodos de obtención de hidrógeno

El H<sub>2</sub> puede obtenerse de diversas maneras, algunas más eficientes que otras, un factor importante para que el hidrógeno se ajuste a un modelo de energía limpia es que el ciclo completo del mencionado gas sea libre de carbono, para esto es fundamental obtenerlo a través de fuentes energéticas con bajas o nulas emisiones de gases de efecto invernadero u otros desechos contaminantes.

El desarrollo a nivel industrial y aplicación de la producción de H<sub>2</sub> en el mundo muestra cómo a través de los diferentes métodos de obtención de H<sub>2</sub> se puede identificar su aplicabilidad. Dependiendo de la naturaleza de los procesos asociados y de los requerimientos de la demanda, según Jiménez:

“los procesos a base de agua presentan mayor pureza en el hidrógeno producido y los hidrocarburos suelen implicar trazas de monóxido de carbono debido a la clase de reacciones que se llevan a cabo en sus reactores”[7].

Un factor clave para tener en cuenta en el desarrollo de la producción de H<sub>2</sub> es la eficiencia energética (% EE) por cada mol de sustancia involucrada en el proceso, debido a que esta permite identificar a fondo las características de los procesos y cuál es el método que se puede implementar en un determinado proyecto.

A pesar de que existen diferentes métodos como se aprecia en la tabla III, los procesos de obtención de hidrógeno a base de hidrocarburos presentan las mayores eficiencias, pero según Jiménez “generan subproductos indeseados y no son óptimos para el desarrollo de hidrógeno limpio”[7].

En los procesos de utilización del agua está la electrólisis y termólisis, “estos no involucran subproductos a base de carbono y se perfilan como importantes alternativas para la producción limpia de hidrógeno”[7]. En el presente trabajo se enfocará en el método denominado electrólisis es por ello por lo que a continuación se describe más detalladamente.

Tabla III. Principales tecnologías de producción de hidrógeno[7]

Método producción de hidrógeno	Materia prima	Eficiencia Energética (%)
Reformado de vapor	Hidrocarburos	70 - 85
Oxidación parcial	Hidrocarburos	60 - 75
Reformado autotérmico	Hidrocarburos	60 - 75
Reformado de plasma	Hidrocarburos	9 - 85
Gasificación de biomasa	Biomasa	35 - 50
Reformado de fase acuosa	Carbohidratos	35 - 55
Electrólisis	H <sub>2</sub> O	50 - 70
Termólisis	H <sub>2</sub> O	50 - 70
Fotólisis	H <sub>2</sub> O	0,5

La electrólisis es el mejor método conocido para la producción de hidrógeno puro en pocas cantidades; esta es una técnica desarrollada desde el año 1820 por M. Faraday en la que se produce la disociación de la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno por el paso de una corriente eléctrica como lo indica Mahecha[8].

La descomposición electrolítica del agua a través del proceso de electrólisis ya es utilizada en la industria para descomponer el agua en sus respectivas moléculas; consiste en pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos (positivo y negativo) que se sumergen en un electrólito (agua con algún tipo de sal) formando la siguiente reacción química:

#### Reacción química en la electrólisis de agua

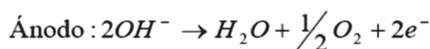
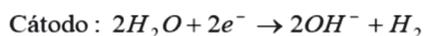


Fig. 1. Reacción química en la electrólisis de agua[9].

Para hacer la descomposición de agua se puede utilizar entre bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>), soda (agua carbonatada), o sal de cocina (NaCl) para formar el compuesto ionizable requerido. A

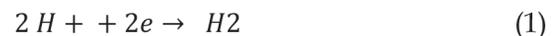
este se le aplica una corriente generando una diferencia de potencial entre los electrodos, lo cual causa que los iones positivos de oxígeno se muevan hacia el electrodo y los iones negativos de hidrógeno se mueven hacia el electrodo positivo simultáneamente.

Allí tanto el oxígeno como el hidrógeno se descargan y se depositan con átomos de oxígeno y de hidrógeno respectivamente. La cantidad de material que se deposita en cada electrodo, en este proceso cumple la ley de Faraday, la cual afirma que esta cantidad de material es proporcional a la intensidad de la corriente que pasa por el electrodo, y que las masas de los distintos elementos que surgen de la reacción son directamente proporcionales a sus masas equivalentes, lo que significa que equivalen a sus masas atómicas divididas por sus valencias.

#### Reacción química de la electrólisis del agua:

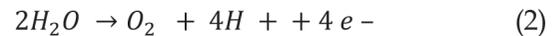
En el cátodo se obtiene el gas hidrógeno dado a su carga positiva y por el ánodo se desprende el Oxígeno por su carga negativa"[10].

#### Reacción en el cátodo:



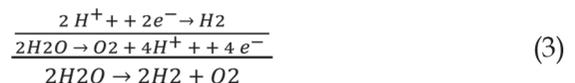
"Es decir; 2 moléculas de Hidrógeno + 2 electrones producen Hidrógeno diatómico" [10].

#### Reacción en el ánodo:



Es decir; 2 moléculas de agua producen Oxígeno diatómico + 4 moléculas de Hidrógeno + 4 electrones [10].

Igualación de ecuaciones:



Con la reacción química del agua en los procesos de electrólisis podemos identificar la cantidad de electrones del hidrógeno presentes en el proceso, de igual manera a través de la aplicación de las leyes de Faraday en la electrólisis podemos identificar la cantidad de hidrógeno producido en el generador en un determinado tiempo.

**Primera ley de Faraday:** la masa de un elemento depositada en una célula electrolítica es independiente de la composición química del electrolito, con la condición de que funcione siempre con la misma valencia”[11].

**Segunda Ley de Faraday:** la masa de diversos elementos depositados en un mismo circuito es proporcionales a sus pesos atómicos e inversamente proporcional a la valencia”[11].

Se deduce luego que las cantidades depositadas son proporcionales a los equivalentes químicos de modo que se cumple:

$$\frac{M^1}{M^2} = \frac{\frac{PESO ATÓMICO 1}{VALENCIA 1}}{\frac{PESO ATÓMICO 2}{VALENCIA 2}} \quad (4)$$

Donde según Brito dice que “un equivalente químico es un mol de la función química con que actúa una sustancia”[12].

**Tercera ley de Faraday:** La masa de un elemento depositado en una celda electroquímica depende de la cantidad total de electricidad que circule por ella y es proporcional a ésta”[11]. Se tiene:

$$M = E \cdot q. \quad (5)$$

Donde E es una constante para cada elemento conocida como equivalente electroquímico y representa la masa del elemento depositada por unidad de electricidad “Q” es la cantidad de electricidad.

Donde Q = F (constante de Faraday  
 $96500 \frac{\text{coulomb}}{\text{mol}}$ )

$$E = q \frac{1}{F} \frac{PESO ATÓMICO}{VALENCIA} \quad (6)$$

## B. Tipos de celdas electrolizadores

Existen 2 tipos de celdas que tienen el mismo principio de funcionamiento, los cuales son la celda electrolizadora húmeda o celda sumergible y la celda electrolizadora seca o no sumergible. La

*celda húmeda (Wet cell)* o sumergible constan de un contenedor lleno con un electrolito en el que los electrodos están total o parcialmente sumergidos.



Fig. 2 Ejemplo de celda electrolizadora húmeda[13].

Por lo general están hechos de placas de acero inoxidable, espirales de alambre, tornillos u otros materiales. Cuando la energía se aplica a los electrodos se produce el hidrógeno, que se propaga hacia arriba a través del baño electrolítico y escapa a través de un puerto instalado en la parte superior. Este tipo de electrolizador generalmente es menos eficiente, pero presenta algunas ventajas sobre las celdas secas, ya que son fáciles de construir y tienen menos componentes”[13].

La *celda seca (Dry cell)* o no sumergible consiste en un dispositivo que las mismas celdas sirven como contenedor, lo cual permite que contenga la solución electrolítica dentro de sí. Además de la solución tiene los electrodos que permiten el proceso de la electrólisis.



Fig. 3 Ejemplo de celda seca[13].

Por lo que “la celda seca es más compacta y liviana, a diferencia de una celda húmeda, que es más pesada y voluminosa. Por lo tanto, las celdas secas son menos riesgosas, mientras que las celdas húmedas son más riesgosas debido al fluido potencialmente dañino que puede derramarse y disipar calor” [13].

### C. Motor de dos tiempos

Son motores de combustión interna que llevan a cabo las cuatro fases del ciclo termodinámico (admisión, compresión, explosión y escape) en sólo dos movimientos lineales del pistón (uno de subida y otro de bajada) y pueden ser encontrados en el ciclo Otto o en ciclo diésel. A continuación, se describe las fases o ciclos de un motor:

- **Primer tiempo:** En esta parte del proceso se realiza la compresión y aspiración, en donde el pistón ascendente comprime en el cilindro la mezcla de aire y combustible creando un vacío al final del pistón, dejando libre la lumbrera de aspiración para que sea llenada con la mezcla carburada de combustible.
- **Segundo tiempo:** En esta parte se genera la explosión y escape de gases generada por una chispa provocada por la bujía que incendia la mezcla comprimida, creando una explosión que empuja el pistón con gran fuerza hacia abajo. En el cárter la mezcla es pre-comprimida por el pistón descendente, preparándose para en el momento preciso dejar libre el canal de escape para que la mezcla pre-comprimida expulse los últimos restos de gases.

Así mismo a los motores de dos tiempos se le realizan pruebas de revisión de emisiones contaminantes, que consisten en verificar por medio de un analizador de gases el cumplimiento de las emisiones de dichos gases y humos bien sean en un motor de motocicleta o de un automóvil, que a su vez no superen los límites máximos permitidos por la NTC 5365 (2012-02-22). El software y anali-

zador de gases deben cumplir con los parámetros definidos en la Resolución 910 del 2008 para la medición de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y HC y aprobar o reprobar los vehículos si cumplen o no cumplen con estos requisitos.

## IV. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO GENERADOR DE H<sub>2</sub> DE CELDA SECA PARA BICICLETA

En esta fase se realizó inicialmente un bosquejo del prototipo denominado “generador de hidrógeno (H<sub>2</sub>)” en el programa **FreeCAD**<sup>4</sup> que es un modelador 3D paramétrico de código abierto hecho principalmente para diseñar objetos de la vida real de cualquier tamaño. El modelado paramétrico le permite modificar fácilmente su diseño volviendo atrás en el historial del modelo y cambiando sus parámetros.

A partir del bosquejo se realizó un listado de requerimientos (materiales) para la construcción del prototipo que involucra cantidad y costos de cada uno de ellos. En los meses de agosto del 2020 se comenzó la construcción y ensamble del prototipo, en el cual salieron tres (3) versiones que fueron reajustadas de acuerdo con pruebas de diseño, ajuste y evaluación por inspección visual.

En este apartado se muestran los resultados para el diseño del prototipo, pasado primero por la ingeniería de concepto mediante bocetos y estudio de los posibles materiales de las partes que lo componen; así mismo la fase de construcción ensamblado y puesta en marcha de este.

### A. Bocetos del diseño del prototipo de generador de hidrógeno

Lo primero que se realizó fue la ideación del prototipo mediante diferentes propuestas conceptuales a partir del estado del arte y prototipos comerciales como los que muestran en la Fig. 4 del marco teórico del presente documento; como resultado se tiene estos bocetos de cómo sería la construcción de las placas y celdas por vía seca.

1 [https://www.freecadweb.org/?lang=es\\_ES](https://www.freecadweb.org/?lang=es_ES)

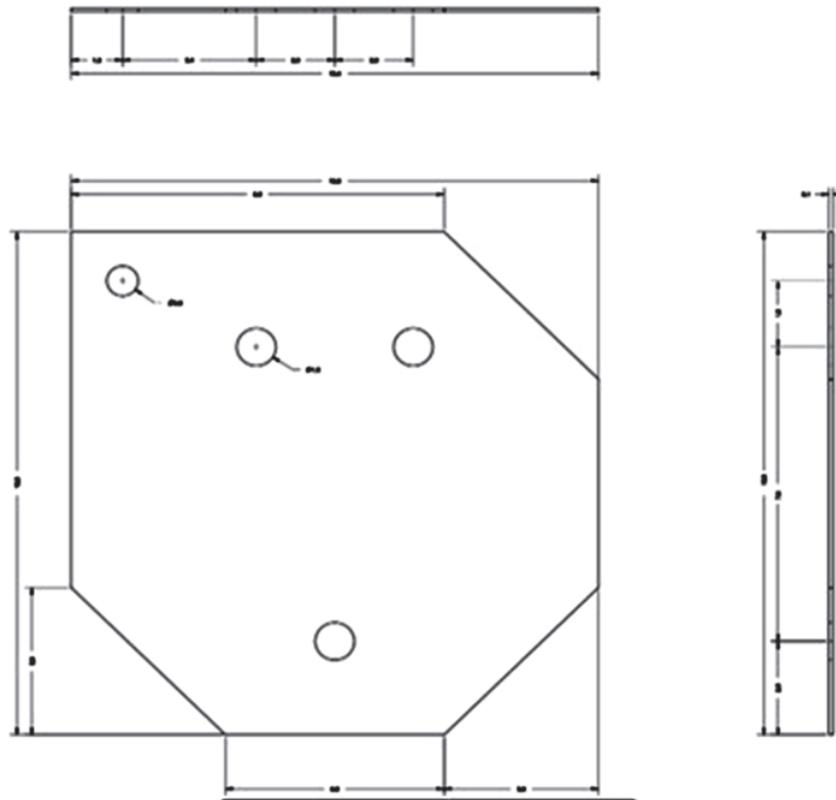


Fig. 4. Bocetos del generador de hidrógeno de celdas secas para adaptarse a bicicleta. (a). Vista frontal de la placa. Fuente: Elaboración propia

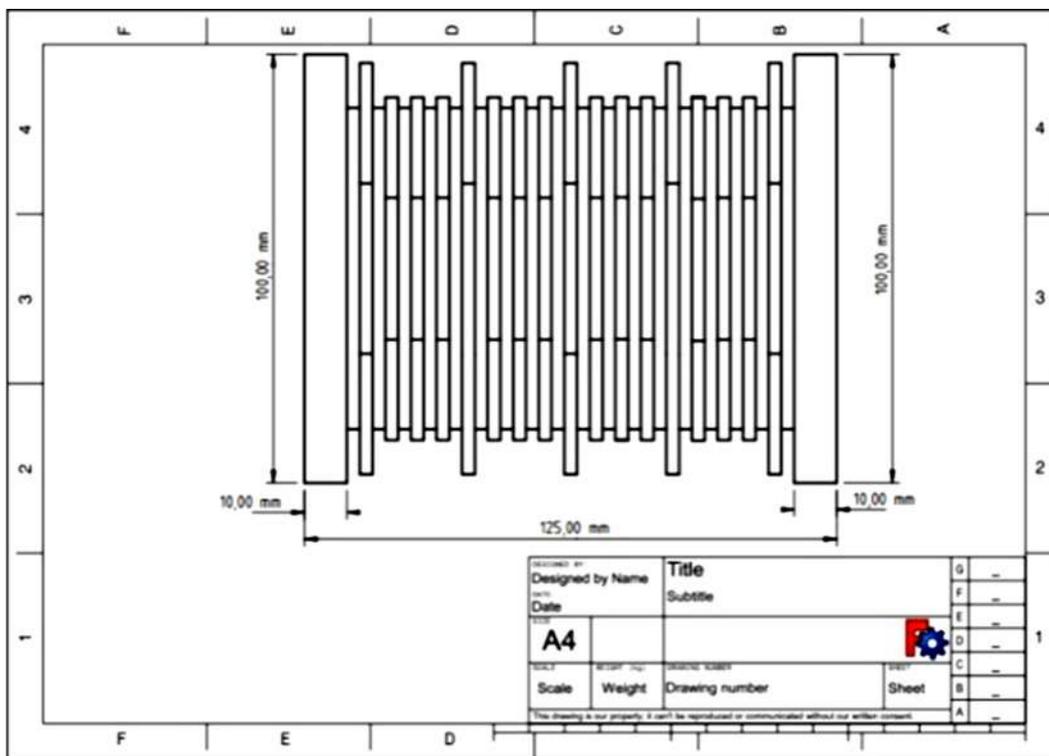


Fig. 5. Bocetos del generador de hidrógeno de celdas secas para adaptarse a bicicleta. (b). Vista lateral del prototipo generador de H<sub>2</sub>. Fuente: Elaboración propia

El generador fue pensado para tener una serie de 15 placas conductoras (10 neutras, n°; 2 negativas, (-) y 3 positivas (+)) sucesivas que entre cada una de ellas pudiese albergar un electrólito comercial como la sal de cocina (NaCl con yodo), donde se pudiesen conectar las dos terminales entrada y salida de voltaje, que fuese ligero, con materiales resistentes a corrosión por electricidad y ataque químico, además que se consiguen comercialmente y con sistema de ensamble no complejo.

Para ello, se pensó que las placas pudiesen ir un tras de otra mediante agujeros, por el cual pasan 4 tornillos que adaptan y sujetan a presión cada una de ellas, adicional se pensó en un sistema de alimentación o inyección del electrólito con cierre hermético mediante un caucho o empaque de retención, así de esta manera, se logra tener el electrólito encerrado y sin contacto con el agua, para hacer la electrólisis, de esta manera se hace referencia un prototipo que usa una celda seca.

## B. Estudio de los materiales para el prototipo generador de H<sub>2</sub> por celda seca

Para la construcción del “generador de hidrógeno (H<sub>2</sub>)” se realizó el levantamiento de materiales de acuerdo con los planos o bocetos iniciales. En este sentido se estudió la composición y la importancia de cada uno de ellos, y su funcionalidad en la estructura física del prototipo denominado “generador de hidrógeno H<sub>2</sub> para bicicleta”, estos resultados se presentan a continuación:

- Acero inoxidable y placas para el generador de hidrógeno (H<sub>2</sub>)

Las placas o láminas del generador se proponen que sean de acero inoxidable puesto que este tipo de aleación y características lo hace resistentes a los ataques químicos, además de ser buen conductor. En la misma familia de los aceros inoxidables la resistencia a la corrosión varía considerablemente de un tipo al otro. En el grupo del cromo níquel, los tipos 301 y 302 son menos resistentes a la corrosión que los tipos 310 y 316. En el grupo más sencillo al cromo, los tipos 405 y 410 son menos resistentes a la corrosión que los tipos 430 y 442[14].

Para la realización de las placas en acero inoxidable como se muestra en la tabla IV se tiene en

cuenta las propiedades químicas y físicas de dicho material con el fin de elegir el calibre adecuado para implementar en el dispositivo.

A continuación, se describe la aplicación mecánica de cada uno de ellos:

**Acero inoxidable 301:** Es un acero inoxidable de cromo-níquel austenítico que proporciona alta resistencia y buena ductilidad al trabajar en frío.

**Acero inoxidable 304:** Estas aleaciones representan una excelente combinación de resistencia a la corrosión y facilidad de fabricación.

**Acero inoxidable 316:** Es un acero inoxidable de cromo níquel austenítico que contiene molibdeno y proporciona mayor resistencia a temperaturas elevadas. Las propiedades son similares a las del Tipo 304 pero la resistencia a la corrosión es mejor, particularmente contra ácidos sulfúrico, hidrociorhídrico, acético, fórmico y tartárico; sulfatos ácidos y cloruros alcalinos.

**Acero inoxidable 409:** Es un acero inoxidable ferrítico estabilizado que proporciona mejor resistencia a la oxidación y corrosión en comparación con el acero al carbón.

**Acero inoxidable 439:** Es un acero inoxidable ferrítico diseñado para resistir a la corrosión puede usarse en muchos entornos oxidantes, pero está sujeto al agrietamiento por corrosión de tensión de cloruro.

**Acero inoxidable 430:** Es un acero inoxidable ferrítico de bajo contenido de carbón que, en entornos levemente corrosivos o exposiciones atmosféricas, presenta resistencia a la corrosión cercana a la de algunos aceros inoxidables con níquel, esta aleación es resistente a la oxidación a temperaturas elevadas.

Con la información obtenida respecto a los distintos aceros inoxidables se evidencia que para proyectos involucrados con aguas salinas o soluciones de agua y un catalizador, el acero 316 es un acero inoxidable que “contiene entre 2% y 3% de molibdeno”[15] gracias a esto es capaz de resistir la corrosión causada por ácidos sulfúrico, hidrociorhídrico, acético, fórmico y tartárico, así como los sulfatos ácidos y los cloruros alcalinos.

Tabla IV. Propiedades de los aceros inoxidable.

Propiedad	Acero 301	Acero 304	Acero 316	Acero 409	Acero 439	Acero 430
Densidad (libra/pulg. <sup>^2</sup> ) a RT	0.285	0.29	0.29	0.28	0.278	0.278
Módulo de elasticidad en tensión (psi x 10 <sup>^6</sup> )	28.0	28.0	28.0	29	29.0	29.0
Calor específico (BTU/o F/libra) 32 a 212 °F (0 a 100 °C)	0.12	0.12	0.12	0.114	0.11	0.11
Conductividad térmica (BTU/h/pies <sup>^2</sup> /pies) 212 °F	9.4	9.4	9.4	14.4	168.0	13.8
Coefficiente promedio de expansión térmica (pulg. x 10 <sup>^-6</sup> por o F) 32 a 212 °F (0 a 100 °C)	9.4	9.2	8.9	5.84	5.6	5.7
Coefficiente promedio de expansión térmica (pulg. x 10 <sup>^-6</sup> por o F) 32 a 600 °F (0 a 316 °C)	9.9	9.9	9.0	6.12	6.4	0
Coefficiente promedio de expansión térmica (pulg. x 10 <sup>^-6</sup> por o F) 32 a 1000 °F (0 a 538 °C)	10.2	10.2	9.7	6.60	6.9	6.2
Coefficiente promedio de expansión térmica (pulg. x 10 <sup>^-6</sup> por o F) 32 a 1200 °F (0 a 649 °C)	10.4	10.4	10.3	6.86	0	0
Resistividad eléctrica (micromhos por cm) a 70 °F (21 °C) a 70 °F (21 °C)	27.4	72	29.4	60	63	60
Conductividad eléctrica (μS/cm)	0,036	0,013	0,034	0,016	0,016	0,016

Fuente: Elaboración propia

### C. Tapas o bases del generador en acrílico

Para dar soporte y visibilidad se decidió utilizar el acrílico puesto que es un termoplástico rígido transparente y se produce con un agente absorbedor de luz ultravioleta, es resistente a la intemperie por más tiempo que otros plásticos, menos propenso a rayarse y no adquiere tono amarillo con el tiempo.

### D. Electrolito en las en las celdas

El agua pura o destilada tiene una conductividad eléctrica baja oscila entre los 0 - 0,05 (μS/cm) algunas aguas naturales llegan a tener 1 (μS/cm) y el agua del grifo tiene entre 80 - 200 (μS/cm), es por ello que se hace necesario elevar la conductividad con alguna sal que genere aniones y cationes (electrolitos) en el agua, así de esta manera de

acuerdo a la ley de OHM<sup>2</sup>, al disminuir la resistividad eléctrica  $\rho$ , también disminuye la Resistencia eléctrica como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$R = \rho L/A. \quad (7)$$

De esta manera con una sal se logra incrementar la conductividad eléctrica  $\sigma = (1/\rho)$  que es la fuente principal para la obtención de hidrógeno a partir de la molécula del agua.

Como sal que se puede disociar fuertemente en el agua se puede encontrar la soda cáustica, cloruro de sodio, bicarbonato de sodio, agua de mar, entre otros. Para el trabajo por ejemplo se utilizó el NaCl y el NaHCO<sub>3</sub> que, en concentraciones de 0,9 g/L puede subir la conductividad del agua a 1500 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

### E. Caucho como cierre hermético e hidrófobo

Este material permite unir las placas de acero inoxidable al dispositivo generador de hidrógeno, cumpliendo la función de sellado y repelente al agua. Ya que al adherirse en cada una de las placas no permite que el agua insertada en el dispositivo escape.

### F. Ensamblaje de las placas para generación de hidrógeno

Después de tener un diseño de entrada y los materiales correspondientes se procedió a revisar algo de literatura frente a cómo otros investigadores han realizado este proceso, por ejemplo:

Quezada E. y Torres D, propusieron el orden de las placas de acero inoxidable con 2 placas de polo negativo, 1 placa de polo positivo y 8 placas neutras, debido a que con esta configuración se obtendrá más hidrógeno ya que en la electrólisis en el polo negativo se genera hidrógeno y en el polo positivo oxígeno[16].

Sin embargo, Chávez decidió aumentar sus proporciones del dispositivo para que este logre desarrollar una mayor producción, el cual constaba

de 4 placas de polo negativo, 3 placas de polo positivo y 18 placas neutras. Esto arrojó un aumento de producción de 61.25% con respecto a la primera configuración de 9 placas[17].

Según Ramos, realiza un diseño que consiste en 21 placas de acero inoxidable 316 distribuidas en 2 placas positivas, 3 negativas y 16 neutras con dimensiones de 13,45 cm el cual fue usado en un Mazda 323[18].

A partir de esta revisión de proyectos anteriores, se define que el prototipo como se muestra en la tabla V el proyecto contará con 15 placas, 10 neutras de las cuales 3 son negativas, 2 positivas con 10 cauchos y acrílicos redondos que cumplen la función de contener el agua en el generador.

**Tabla V.** Materiales utilizados en el primer diseño del generador

Materiales	Cantidad
Láminas positivas	2
Láminas negativas	3
Láminas neutras	10
Base acrílica	2
Fuente de electricidad	12 voltios / 5 amperios

Fuente: Elaboración propia

### G. Ensamble del primer diseño del generador

En esta fase se describe como resultado de manera cualitativa el armado, construcción y/o ensamblaje se procedió a realizar los siguientes paso a paso:

- Identificar los acrílicos o bases del generador.
- Realizar orificios en acrílicos y láminas de acero acorde a la medida del tornillo a utilizar.
- En cada uno de los orificios del acrílico o bases insertar un tornillo.
- Identificar y clasificar las láminas por su polaridad en tres grupos, positivas, neutras y negativas.
- Colocar caucho entre láminas.
- Colocar una lámina negativa.
- Colocar un caucho al final de la lámina.
- Colocar caucho.

<sup>2</sup>  $V = IR$

- i) Colocar dos láminas de acero con polo neutro separadas con su respectivo caucho.
- j) Colocar una lámina de acero con polo positivo.
- k) Repetir el mismo proceso del punto 3 al 10 hasta finalizar.
- l) Terminar con un acrílico de base.

Después de realizar estos pasos como se muestra en la Fig. 6 se termina de realizar el proceso, se conectan las pinzas a su respectivo polo (positivo o negativo) por medio del tornillo que sujeta la estructura, este permite conducir la electricidad suministrada por la fuente hacia las láminas de acero, con el fin de ejecutar el proceso de la electrólisis.



Fig. 6 Ensamble del primer prototipo generador de H<sub>2</sub> celda seca. Fuente: Elaboración propia

Así mismo en la fig. 7 se aprecia que la última lámina de acrílico se encuentra unificados previamente los acoples correspondientes que permiten

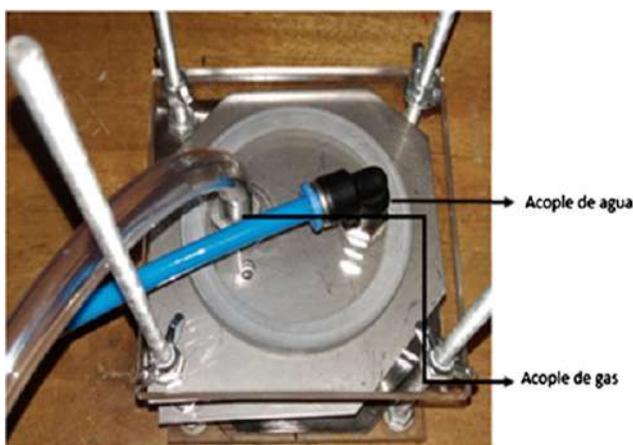


Fig. 7 Acoples del prototipo. Fuente: Elaboración propia

el paso de agua para que esta pueda atravesar sin problemas todas las láminas de acero, para que cuando se coloque la eléctrica mediante una fuente esta pueda generar el proceso de la electrólisis, y a su vez el otro acople permite la extracción del hidrógeno y el oxígeno por la manguera.

## V. EVALUACIÓN DE LA FUNCIONALIDAD DEL PROTOTIPO GENERADOR DE HIDRÓGENO

### A. Prueba inicial generador con solución de NaCl

En un recipiente se procede a realizar una mezcla de 100 gramos de NaCl con 150 ml de agua para tener una concentración final de 0,6 g/L. Posteriormente se ingresa al prototipo como muestra la Fig. 8 mediante el acople de agua, permitiendo así tener contacto con las láminas de acero positivas como negativas, evidenciándose que el NaCl ataca las láminas de acero desprendiendo Fe (OH)<sub>2</sub> y Fe (OH)<sub>3</sub> de color marrón y verdoso, por lo cual se descarta este electrólito.



Fig. 8 Ilustración del cambio de color del agua en el prototipo. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, se rescata de este proceso que al ingresar el electrólito a las celdas se evidencia inmediatamente el proceso de burbujeo (posiblemente electrólisis). También se evidenció que el generador presentaba fugas de agua entre láminas, ya que los cauchos no permiten sellar en su

totalidad el prototipo. A través de la realización de esta prueba se logra identificar y establecer un nuevo diseño con adecuaciones que mejoren el funcionamiento del generador.

### B. Prueba del generador con solución de Bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ )

En un recipiente se procedió a realizar una mezcla de 100 gramos de  $\text{NaHCO}_3$  con 150 ml de agua para tener una concentración final de 0,6 g/L. Se repite el mismo procedimiento que en la prueba anterior y se evidencia que la sal de  $\text{NaHCO}_3$  generó a nivel visual mayor burbujeo que el  $\text{NaCl}$  (ver Fig. 9), indicando que la producción de hidrógeno puede ser más efectiva con este segundo electrólito.

Esta segunda prueba también incluye la modificación de retirar las láminas neutras y reemplazarlas por láminas en acrílico con el fin de disminuir el volumen del tamaño total del dispositivo.



Fig. 9. Segunda prueba prototipo. [Izquierda] prueba de burbujeo cámara hidroneumática, [Derecha] Conexión eléctrica en sus distintas polaridades.

Fuente: Elaboración propia.

### C. Prueba de presión del gas generado por el prototipo.

Esta prueba consistió en colocar un manómetro en la manguera de salida para medir la correspondiente presión como se observa en la Fig. 10. En este segundo prototipo se agregaron acrílicos cilíndricos huecos que permiten aumentar el tamaño y así almacenar más solución en comparación al diseño anterior, de igual manera se realiza una prueba utilizando únicamente placas positivas y negativas sin la presencia de las neutras con el fin de evidenciar si se produce o no un incremento en la producción de hidrógeno.



Fig. 10. Ensamble del segundo diseño del prototipo.  
Fuente: Elaboración propia

La prueba consistió en revisar la aguja del manómetro hasta donde se alcanzaba la presión máxima en determinado tiempo. Este se hizo por repetición 30 veces, como se muestra en la tabla VI.

Tabla VI. Resultados primera toma de tiempos segundo diseño del generador

Número de intentos (30)	Tiempo (s)	mmHg	atm
Promedio	45,43	297,6	0,391

mmHg: Milímetros de mercurio  
atm: Atmósferas

Fuente: Elaboración propia

Las anteriores tablas muestran el promedio obtenido en la toma de tiempos de la presión ejercida por el gas producido en el generador evidenciado en el anexo 3 los datos de la toma de tiempos del dispositivo.

#### D. Tercer prototipo de generación de hidrógeno por celda seca

En este tercer prototipo después de evaluar las deficiencias de hermeticidad y electrólito además de corregir algunos parámetros de ensambles se procedió a realizar una tercera versión de diseño en esta se colocaron ahora 8 tornillos para apretar las láminas, adicional se configuró de la siguiente manera frente a los anteriores:

**Versión 1:** fueron 3 placas negativas y 2 positivas.

**Versión 2:** fueron 3 placas negativas, 2 positivas y 10 neutras.

**Versión 3:** fueron 3 placas negativas, 2 positivas y las neutras se reemplazaron por cilindros en acrílico.

Como se observa en la Fig. 11 se añadió un acrílico entre cada placa y separador del dispositivo, para que el almacenamiento de la mezcla sea mayor, permitiendo que el proceso de electrólisis sea más efectivo.

De nuevo se procedió a revisar la presión del gas generado conectando el manómetro a esta nueva versión y se tomó el dato de presión en función del tiempo por un intervalo de 30 veces (ver tabla VII) llegando a la generación de los datos es muy similar a la de la versión anterior con una diferencia de más o menos 5 segundos (ver tabla VI).

**Tabla VII.** Resultados segunda toma de tiempos tercer diseño del generador

Número de intentos (30)	Tiempo (s)	mmHg	atm
-------------------------	------------	------	-----

Promedio	40,8666667	300	0,39473684
----------	------------	-----	------------

mmHg: Milímetros de mercurio  
 atm: Atmósferas

Fuente: Elaboración propia

#### E. Prueba cualitativa de color de la llama en la combustión del hidrógeno

Ya en el siglo XVIII, Lavoisier anticipó la elevada capacidad energética de la oxidación del hidrógeno y observó que dicha reacción generaba tonos



**Fig. 11** Ensamble tercer diseño del prototipo.  
 Fuente: Elaboración propia

azules y amarillosos. La implantación del hidrógeno como potencial combustible se enfrenta aún a varios retos; entre ellos, las dificultades técnicas asociadas a su transporte, distribución y almacenamiento.

Se observa en la Fig. 12 la prueba realizada de la llama en donde se acercó un alambre con alcohol al cual se le dio ignición y se acercó a la manguera de salida del gas tornándose de color blancuzco amarillo, prueba que puede evidenciar la presencia de manera cualitativa la salida de hidrógeno, sin embargo al manejar el hidrógeno es un reto por su elevada difusividad e inflamabilidad, las cuales lo hacen propenso a filtraciones y conllevan el riesgo de explosiones, como la ocurrida en junio de 2019 en la hidrogenera de Sandvika, cerca de Oslo[19]. Así pues, la capacidad de controlar y minimizar los riesgos será determinante a la hora de aprovechar el hidrógeno como combustible.



**Fig. 12** Prueba de la llama en el prototipo.  
 Fuente: Elaboración propia

## F. Cálculo de la producción de hidrógeno en el generador a partir de la densidad electrónica

Con la cantidad de energía que atraviesa el sistema se procede a calcular los gramos de hidrógeno generados utilizando. La cantidad de hidrógeno producido depende del número de electrones disponibles.

### Cálculo de la variación de la carga Q:

$$Q = I \cdot t \quad (8)$$

Donde:

I = Corriente (Amperios)

t = tiempo (s)

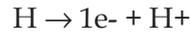
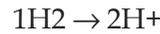
Entonces a partir de la ecuación 8 se procede a calcular la carga en Columbios (C)

$$Q = 5 \text{ amperios} \cdot 60 \text{ segundos} = 300 \text{ Columbios (C)}$$

Y si un electrón equivale a  $1,6 \times 10^{-19}$  Columbios, a partir de este factor de conversión se calculan cuántos electrones se necesitarían para una carga de 300 Columbios.

$$\# \text{ electrones} = (300 \text{ C}) \cdot \left( \frac{1 e^-}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} \right) = 1,87 \times 10^{21} \text{ electrones}$$

Entonces de acuerdo con la ecuación de generación de hidrógeno a partir del agua se encuentra que 2 moles de agua producen 2 moles de hidrógeno. En segunda medida vez un mol de hidrógeno gaseoso produce dos hidrogeniones ( $H^+$ ) y finalmente cada hidrógeno debe ceder un electrón para formar el correspondiente catión.



(9)

A partir de estos datos se procede a calcular la cantidad de gramos de hidrógeno que posiblemente se generaron en la reacción de la electrólisis del agua.

$$\text{Gramos de } H_2 = 1,87 \times 10^{21} e^- \times \frac{1 \text{ átomo } H^+}{1 e^-} \times \frac{1 \text{ mol } H^+}{6,022 \times 10^{23} \text{ átomos } H^+} \times \frac{1 \text{ mol } H_2}{2 \text{ moles } H^+} \times \frac{2 \text{ gramos}}{1 \text{ mol } H_2} = 0,0031 \text{ gramos}$$

## G. Rendimiento del generador de H2 en función de la variación de la concentración del electrólito

En esta prueba, como muestra la tabla VIII, se realizó la variación de la concentración (g/L) del electrólito  $NaHCO_3$  para evaluar el rendimiento de producción de hidrógeno variables de tiempo, presión y temperatura.

Como se ilustra en Fig. 13 se procedió a graficar las distintas presiones generadas en función de la concentración del electrólito en g/L; la temperatura y el tiempo, encontrándose que la variable que más afecta la presión es la concentración, siguiendo un comportamiento de tipo cuadrático de la forma  $f(x) = ax^2 + bx + c$ .

Por lo cual se puede establecer que a mayor conductancia generada por un alto contenido de concentración de electrólito de acuerdo con la función  $\text{Presión (g/L)} = 0,0117 (\text{g/L})^2 - 1,9695 (\text{g/L}) + 470,96$ . Siendo entonces 470,96 mmHg el punto de corte que refiere si se agregase solo agua sin electrólito, matemáticamente se podría decir que el prototipo es capaz de generar gas posiblemente hidrógeno.

Tabla VIII. Resultados del rendimiento de producción de h2 en función de la concentración del electrólito

Toma de datos (promedio)	Agua (L)	Bicarbonato (gr)	Concentración g/L	Tiempo (s)	Presión (mmHg)	Presión (atm)	Temperatura °C
1 prueba	0,25	10	40	60	405,4	0,533	35
2 prueba	0,2	20	100	60	405,4	0,533	37
3 prueba	0,2	25	125	60	409,1	0,538	37
4 prueba	0,2	35	175	60	453,8	0,597	39
5 prueba	0,25	50	200	60	562,5	0,74	34

Fuente: Elaboración propia

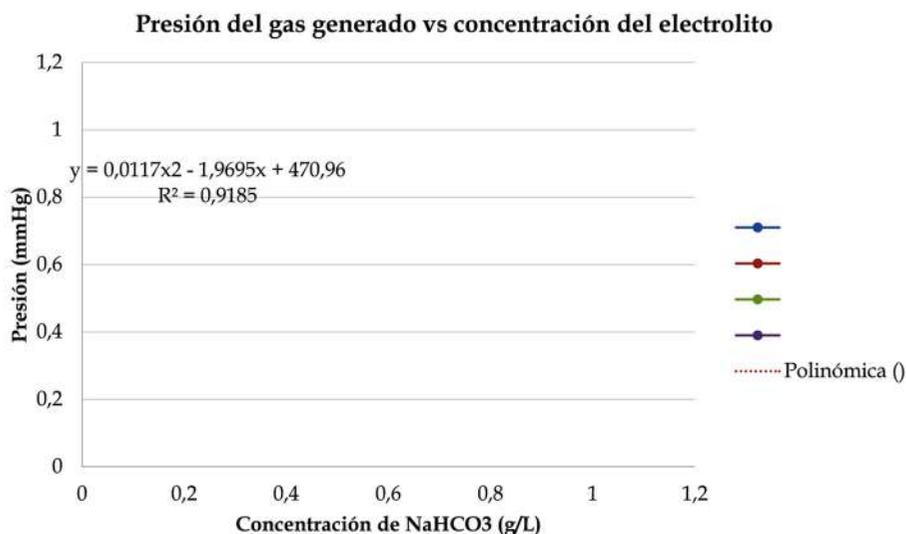


Fig. 13 Volumen y presión totales. Fuente: Elaboración propia

### H. Rendimiento de la producción de hidrógeno en función de la presión

A partir de la presión que se ejerce del gas generado por el prototipo al manómetro se puede calcular el rendimiento (Fig.14) mediante la ecuación de los gases ideales:

$$PV = nRT \quad (10)$$

Para la realización de los cálculos de la producción de hidrógeno se realizó las conversiones de °C a °k en la temperatura (Fig. 15), teniendo en cuenta que en el proceso de electrólisis la presión total del proceso está compuesta por la presión del vapor de agua más la presión del gas en este caso el hidrógeno (H<sub>2</sub>).

$$PRESIÓN\ TOTAL = P\ HIDRÓGENO + P\ VAPOR\ DE\ AGUA \quad (11)$$



Fig. 14. Ilustración de toma de tiempos y temperatura. Fuente: Elaboración propia



Fig. 15. Ilustración de toma de tiempos y temperatura. Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenida la presión del hidrógeno en el manómetro calcula las cantidades de moles de hidrógeno obtenidas en el proceso despejando la ecuación (12).

$$\frac{PV}{RT} = n \quad (12)$$

Cuando se identifican las variables presentes en la ecuación se realizó los cálculos correspondientes del rendimiento de producción de hidrógeno como se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla IX. Resultados toma de datos producción de hidrógeno

Prueba	Presión Vapor de agua (atm)	Presión Hidrógeno (atm)	Presión Total (atm)	Volumen (L)	Temperatura	Constante de los gases (atm*L) / (MOL* °K)	Moles de H <sub>2</sub>	Peso formula (H <sub>2</sub> ) g/mol	Rendimiento gramos de H <sub>2</sub> /min
1	0,062	0,471	0,533	0,22	310	0,082	0,001	2,016	0,0041
2	0,062	0,476	0,538	0,23	310	0,082	0,002	2,016	0,0042
3	0,062	0,535	0,597	0,24	312	0,082	0,004	2,016	0,0049
4	0,062	0,471	0,533	0,26	308	0,082	0,004	2,016	0,0049
5	0,062	0,678	0,740	0,30	307	0,082	0,007	2,016	0,0082

Fuente: Elaboración propia

Con la utilización de los datos experimentales obtenidos durante el proceso de electrólisis del generador de hidrógeno y con la aplicación de la ecuación de los gases ideales se obtuvo los datos cuantitativos de la producción de hidrógeno teniendo en cuenta que entre mayor sea el volumen y la presión como se muestra en la Fig. 16 a mayor volumen en la celda del electrolito se puede generar más gas.

La gráfica anterior muestra los resultados de producción de hidrógeno en cada una de las pruebas realizadas permitiendo identificar que la prueba 5 presenta una mayor producción de hidrógeno con un volumen de 250 ml de agua y 50 gramos de NaHCO<sub>3</sub> durante 60 segundos.

Por otro lado, al graficar los datos experimentales obtenidos en la medición de la presión total y el volumen de llenado en la celda durante el proceso de electrólisis como se muestra en la Fig. 17 la presión del gas de salida se mantiene visualmente constante, sólo a partir de un volumen superior a 0,2 litros se evidencia un punto de inflexión en la presión y rendimiento del hidrógeno superior a 0,009 gramos por cada minuto.

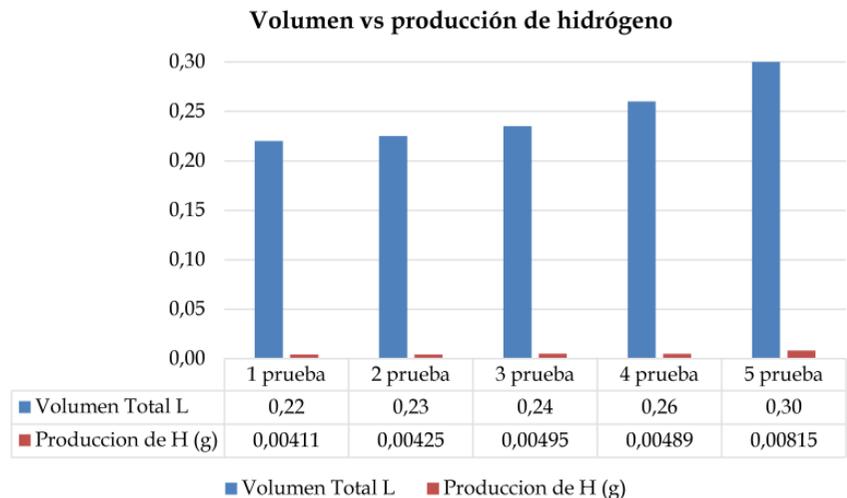


Fig. 16 Volumen VS Producción de hidrógeno (H<sub>2</sub>).

Fuente: Elaboración propia

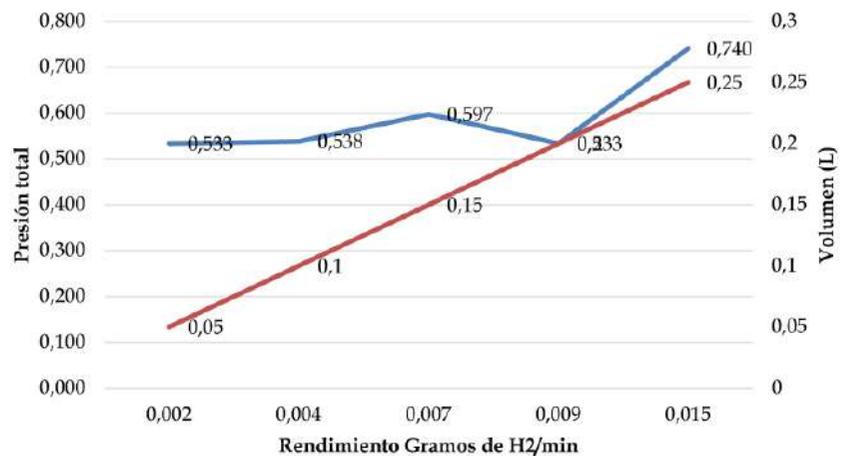


Fig. 17 Diferencias de presiones y volumen en función del rendimiento.

Fuente: Elaboración propia

En las anteriores gráficas se muestran las distintas pruebas realizadas al generador de hidrógeno variando la cantidad de agua que esta debe ser superior a 0,2 L y de bicarbonato de sodio 50 gramos para tener un rendimiento óptimo de la producción de hidrógeno superior a 0.009 gramos por cada minuto, es decir que en una hora será de aproximadamente 0,54 gramos por cada hora; de igual manera se logra evidenciar la presión presente en el dispositivo durante cada una de las pruebas realizadas.

### I. Cálculos de rendimiento energético del generador de hidrógeno

La electrólisis de un mol de agua produce un mol de gas hidrógeno y media mol de gas oxígeno en sus formas normales diatómicas. Un detallado análisis del proceso muestra el uso de los potenciales termodinámicos y la primera ley de la termodinámica. Se supone que este proceso se lleva a 298°K (25 °c)., y una atmósfera de presión, y los valores relevantes se han tomado de una tabla de propiedades termodinámicas.

A partir de los datos planteados se procede a calcular cuánta energía se libera en funcionamiento el generador por una hora:

0,54 gramos de H<sub>2</sub> generados por el prototipo por cada hora x

$$\frac{1 \text{ mol H}_2}{2,0015 \text{ gramos}} \times \frac{285,83 \text{ kJ}}{1 \text{ mol H}_2} = 77,116 \text{ kJ} \times \text{cada hora.}$$

A partir de los diagramas de presión y volumen se puede suponer que el gas de salida entra a un proceso isobárico donde la presión se mantiene constante a partir de ello se puede decir entonces que el trabajo es la presión por el cambio en el volumen:

$$W = P \cdot \Delta V \quad (13)$$

El proceso debe proveer la energía para la disociación, más la energía para expandir los gases producidos. Ambos están incluidos en el cambio de entalpía de la tabla de arriba. A la temperatura de 298°K y una atmósfera de presión, el trabajo del sistema es:

$$W = P \Delta V = (101,3 \times 10^3 \text{ Pa}) (0,269 \text{ moles de H}) \\ (22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}) (298\text{K}/273\text{K}) \\ = 667,30 \text{ J por cada hora en el prototipo.}$$

### VI. PROPUESTA DE ADAPTACIÓN DEL GENERADOR A BICICLETA CON MOTOR DE 2 TIEMPOS

La propuesta es adaptar el prototipo generador de hidrógeno a un motor de dos tiempos como el que se muestra en la Fig. 18, el cual requiere una potencia eléctrica de 2,9 HP (por sus siglas en inglés Horse Power) caballos de fuerza para su funcionamiento.



Fig. 18. Motor de combustión de dos tiempos que funcionaría con H<sub>2</sub>[21]

Tabla X. Datos termodinámicos de la reacción de la electrólisis[20].

Cantidad	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	0,5 O <sub>2</sub>	Cambio
Entalpía	-285,83 kJ	0	0	ΔH = 285,83 kJ
Entropía	69,91 J/K	130,68 J/K	0,5 x 205,14 J/K	TΔS = 48,7 kJ

A partir de esta variable de partida de 2,9 HP se procede a revisar las diferentes ecuaciones, teorías y leyes (ver Tabla XI) que pueden ayudar a explicar cómo las moles de hidrógeno generados por el prototipo pueden mediante la combustión hacer funcionar el motor de dos tiempos e impulse la bicicleta.

Como se calculó en el apartado anterior de acuerdo con el rendimiento energético y termodinámico con 0,54 gramos de hidrógeno generados por el prototipo en forma gaseosa por hora; el generador puede producir 667,30 J x hora de acuerdo con esto se podría entonces con este dato pasar a trabajo eléctrico de la siguiente manera:

$$P = I V \text{ (amperios * voltios = Watts)} \quad (14)$$

$$W = P t \text{ (Potencia por el tiempo)} \\ \text{Trabajo eléctrico} \quad (15)$$

$$W = \Delta P \cdot V * \text{ tiempo J-h Trabajo} \\ \text{termodinámico} \quad (16)$$

A partir de las ecuaciones 12 y 13 se puede igualar el calor desprendido de la electrólisis con el trabajo eléctrico y de allí se despeja la potencia eléctrica.

$$\text{Trabajo termodinámico} = \text{Trabajo eléctrico} \\ 667,30 \text{ J x hora} = P (1 \text{ h}).$$

$$P = 667,3 \text{ J (h/h)} = 667,3 \text{ J } \Delta \text{ Potencia eléctrica}$$

Luego el correspondiente valor de Julios se puede convertir a vatios por hora de la siguiente manera:

$$1 \text{ vatio-hora} = 3600 \text{ julio}$$

$$667,3 \text{ J} \times \frac{1 \text{ vatio hora}}{3600 \text{ J}} = 0,18536 \text{ vatios-hora}$$

$$0,18536 \text{ vatios-hora}$$

**Tabla XI.** Ecuaciones de potencia eléctrica, energía eléctrica, ley de ohm y gases ideales aplicados a un sistema termodinámico de gases

Ecuación	Unidades y descripción
$P = V * I$	Watts = Voltios * Amperios
$W = P * t$	Trabajo eléctrico = Potencia * tiempo
$P = \frac{W}{t}$	Potencia eléctrica = $\frac{\text{Watts}}{\text{tiempo}}$
$\frac{W}{t} = V * I$	$\frac{\text{Watts}}{\text{tiempo}} = \text{Voltaje} * \text{Amperios}$
$P t = P \Delta V$	Watts = Presión * $\Delta$ Volumen
$P t = n R T$	P t: Watts x hora n: # de moles R: Constante de gases ideales T: Temperatura en grados Kelvin
$W = P \Delta V$	Trabajo en gases = Presión * $\Delta$ Volumen (Proceso Isobárico)
$P V = n R T$	P: Presión V: Volumen n: # de moles R: Constante de gases ideales T: Temperatura en grados Kelvin

Fuente: Elaboración propia

Entonces a partir de los vatios por hora se puede calcular la potencia eléctrica generada pasando los vatios por hora a caballos de fuerza de la siguiente manera:

$$\text{Producción de H} = I * t * \frac{1F}{9646 \frac{C}{MOL}} * \frac{2MOL DE H2F*}{2F} * \frac{1,00797 GR}{1 MOL H2} \quad (17)$$

$$0,18536 \text{ vatios-hora} \times \frac{1 \text{ caballo de fuerza}}{735,5 \text{ vatios}} = 0.00025 \text{ HP (caballos de fuerza)}$$

Como se puede observar entonces con un rendimiento de 0,54 gramos de hidrógeno que son producidos por el generador solo se alcanzaría una potencia equivalente a 0, 0.00025 HP (caballos de fuerza).

#### A. Cálculos de producción de hidrogeno requeridos para generar movimiento en el motor de dos tiempos

Se procedió a calcular cuánto se necesitaría de hidrógeno para alcanzar la potencia de funcionamiento del motor que requiere 2,9 HP:

$$2,9 \text{ HP} * \frac{735,5 \text{ Vatio}}{1 \text{ HP}} = 2132,95 \text{ Vatio}$$

Se va a suponer que el motor va a trabajar una hora para calcular el trabajo eléctrico y después pasar a unidades de energía calórica en Joule (J):

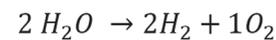
$$2132,95 \text{ Vatio} * 1h * \frac{3600 \text{ Julio}}{1 \text{ Vatio} * h} = 7678620 \text{ Julio}$$

(se necesitaría teóricamente)

Es decir, en kilojulios:

$$7678620 \text{ Julio} * \frac{1 \text{ KJ}}{1000 \text{ Julios}} = 7678,62 \text{ KJ}$$

Como se conoce la entalpía de formación del hidrógeno, a partir de la reacción de electrólisis se puede calcular cuántas moles se necesitarían de hidrógeno para alcanzar este trabajo eléctrico en una hora:



$$\Delta H = 285 \text{ KJ (Entalpía de formación)}$$

$$7678,62 \text{ KJ} * \frac{2 \text{ Mol } H_2}{285 \text{ KJ}} * \frac{1,0078 \text{ g } H_2}{1 \text{ Mol } H_2} = 54,30 \text{ g } H_2$$

**Requeridos por el motor.**

Con las pruebas realizadas al prototipo se evidencia que la corriente (I) que se suministra al generador es de tan solo 5 Amperios, por lo tanto, a través de las leyes de Faraday se procede a calcular la producción de  $H_2$  (Teórico || || || ||) del prototipo variando la intensidad de corriente suministrada al prototipo denominado generador de hidrógeno como se ilustra en la Tabla XII.

Con la realización en la variación de la intensidad de corriente ( $\Delta I$ ) suministrada al prototipo generador de hidrógeno y la producción de hidrógeno (g) como se evidencia en la Fig. 19 es directamente proporcional.

Si se grafica g  $H_2$  ( $\Delta I$ ) se podría decir que la cantidad necesaria para que funcione el motor de dos tiempos que requiere una potencia eléctrica de 2,9 HP según el modelo de regresión lineal de la Fig. 19 donde el modelo es definido por la siguiente ecuación:

$$g \text{ H}_2 (\Delta I) = 0,3761 (\text{amperios}) - 0,0016$$

$$54,3 \text{ g H}_2 = 0,3761 (\text{amperios}) - 0,0016$$

Amperios =  $(54,3 + 0,0016) / 0,3761 = 144,3$  amperios requeridos para suministrar en el prototipo denominado generador de hidrogeno.

Se necesitarían entonces alrededor de 145 amperios para que el prototipo genera la cantidad suficiente de hidrógeno y pueda llegar a la potencia deseada y pueda impulsar la bicicleta.

#### B. Propuesta de adaptación del generador de hidrógeno a un motor de combustión de dos tiempos para que impulse una bicicleta.

La propuesta de adaptación del prototipo generador de hidrógeno  $H_2$  al marco de una bicicleta consiste en 3 puntos como se muestra en la Fig. 20.

Tabla XII. Producción de hidrógeno según la variación de corriente suministrada

Intensidad	tiempo (s)	Producción de hidrógeno/ minuto	Producción de hidrógeno/ Hora
5	60	0,031339102	1,88
10	60	0,062678205	3,76
15	60	0,094017307	5,64
20	60	0,12535641	7,52
25	60	0,156695512	9,40
30	60	0,188034615	11,28
40	60	0,25071282	15,04
50	60	0,313391025	18,80
60	60	0,37606923	22,56
70	60	0,438747435	26,32
80	60	0,50142564	30,09
90	60	0,564103845	33,85
100	60	0,62678205	37,61
110	60	0,689460255	41,37
120	60	0,75213846	45,13
130	60	0,814816665	48,89
140	60	0,87749487	52,65
150	60	0,940173075	56,41
160	60	1,00285128	60,17
170	60	1,065529485	63,93

Fuente: Elaboración propia

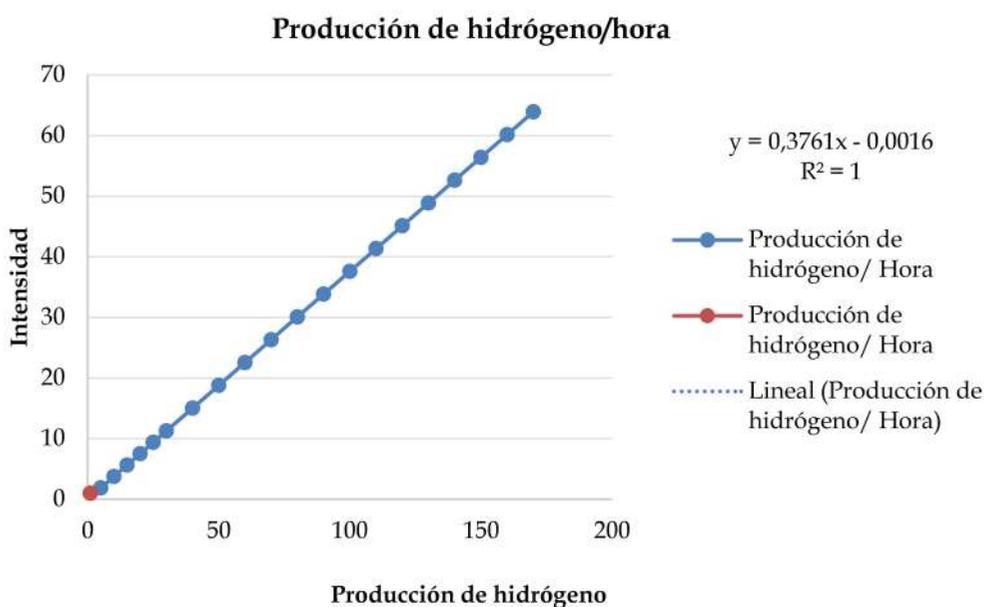


Fig. 19 Producción de hidrógeno según la variación de corriente. Fuente: Elaboración propia

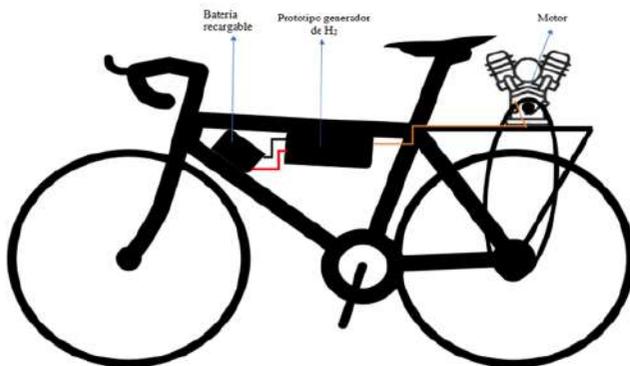


Fig. 20 Boceto de incorporación de prototipo y motor a la bicicleta. Fuente: Elaboración propia

**Batería recargable de 12V y 150 amperios:** Debido a su tamaño y disposición para conectar el cable que permite recargar la batería, esta se ubicaría en la parte del tubo inferior muy cerca del tubo de dirección como se muestra en la Fig. 20. Un ejemplo de batería se observa en la Fig. 21.



Fig. 21 Batería recargable. Fuente Amazon[21].

**Características:** 12 V, 150 A, dimensiones (19.06 x 6.69 x 9.45 pulgadas), gel ciclo profundo viento solar con batería de botón estilo también terminales Tornillos y Tuercas, presenta un sistema de iluminación de emergencia, lucha contra incendios, fuente de alimentación de reposo. El interior de gel es de gran calidad y de la funda está hecho de plástico ABS resistente a todo tipo de clima y a la corrosión también[21].

**Generador de hidrógeno H<sub>2</sub>:** El generador se ubicaría en el tubo superior con las mangueras de salida y entrada en dirección hacia el tubo del asiento, dejando el suficiente espacio para las rodillas y así al pedalear no sea un obstáculo, de igual manera en la Fig. 22 se muestra las principales características que tiene prototipo generador de hidrogeno.



Fig. 22 Prototipo generador de H<sub>2</sub>. Fuente: Elaboración propia

Características:

- 3 placas negativas
- 2 positivas
- 5 acrílicos circular diámetro 7mm.
- 8 tornillos de 3/16 pulgadas.
- 14 cauchos de 7 mm de diámetro.
- Bases acrílicas cuadrada de 14 x14 cm.

**Motor de 2 tiempos:** El motor se ubicaría en la parte trasera de la bicicleta sujetado de una parrilla que se ajuste al tubo del asiento dependiendo del tamaño de la bicicleta y a su vez la conexión al piñón trasero.



Fig. 23 Motor de combustión de dos tiempos[21].

**Características:**

- Peso: 8 kg
- Cilindraje: 44,3 CC
- Potencia: 2,9 HP
- Cap. tanque combustible: 0,671

**Burbujeador:** Humidificador de burbujas con válvula de seguridad, presenta un diseño de conector de torre, permite trabajar en atmósfera inerte y prevenir la entrada de aire atmosférico por retroceso.



Fig. 24 Burbujeador[23].

**Kit de ensamble para adaptación a la bicicleta.**

Permite realizar el ensamble del prototipo generador de hidrogeno y el motor a la bicicleta para un correcto funcionamiento.



Fig. 25 Kit de ensamble[24].

**VI. RECOMENDACIONES**

Utilizar herramientas y materiales resistentes e inoxidable, garantizando el correcto ensamble y durabilidad del generador de hidrógeno, así mismo intentar nuevas formas y diseños con el fin de buscar el mejor prototipo.

Emplear un motor de baja potencia inferior a 1 caballo de fuerza para poder realizar las pruebas experimentales, teniendo en cuenta las dimensiones del prototipo diseñado.

Mantener un correcto sello hermético entre las juntas prototipo para evitar pérdidas del gas. De igual manera un correcto sello en mangueras y acoples para evitar fugas de gas hidrógeno.

Respetar la polaridad de las láminas (positivas, neutras y negativas), debido a que con su adecuada configuración permiten generar una producción óptima de hidrógeno.

Aumentar las dimensiones del prototipo, para producir mayor cantidad de hidrógeno.

Para futuros trabajos contar con una fuente que permita variar la corriente, la cantidad de soluto y solvente suministrada al prototipo, realizando pruebas de funcionalidad y producción de hidrógeno con el fin de tabular la información y realizar comparaciones a través de gráficas.

Aumentar el número de placas al prototipo generador de hidrógeno, teniendo en cuenta su polaridad es decir incluir más placas negativas para aumentar la producción de hidrógeno.

**Recomendaciones de seguridad en el sistema**

Colocar el dispositivo en un lugar donde permita la circulación de aire para disipar el calor de forma óptima y hacer mantenimiento preventivo de los sellos herméticos para evitar derrames del fluido dañino.

Al momento de realizar el prototipo es importante tener los elementos de protección personal (EPP) para evitar lesiones debido al uso de herramientas manuales y eléctricas.

El tratarse de un proyecto que requiere de electricidad y con agua es importante aislar aquellas

áreas que están expuestas a contactos indeseados, es decir solo la terminal del polo negativo y positivo queden expuestas.

El prototipo debe de estar completamente sellado para evitar fugas del gas, evitando de esta manera perdida de presión.

Es importante tener un burbujeador, en donde el gas producido pase con el fin de evitar excedentes en el momento de realizar la prueba de flamabilidad, el burbujeador realiza la función de cortafuego si la llama se devolviera por la manguera, además permite identificar la velocidad de producción de gas.

En el marco de una bicicleta se recomienda buscar el óptimo teniendo en cuenta el tamaño de la batería, el motor y demás accesorios necesarios, evitando que estos incomoden al usuario en el recorrido que realiza.

Tener en cuenta que al implementar una batería de 12 voltios y 150 amperios puede alterar la temperatura del prototipo llevando a un recalentamiento, por tal motivo la batería que se utilice debe cumplir con los requisitos de seguridad antes de incorporarla al prototipo.

El prototipo debe tener un cambio contante de suministro de agua, ya sea a través de un tanque que le permita almacenar el agua y así mismo suministrársela de tal manera que la temperatura permanezca constante sin llegar a recalentarse el prototipo.

A la hora de realizar el ensamble del prototipo y el motor en la bicicleta tener las herramientas adecuadas y los EPP requeridos para evitar accidentes en la persona.

## VII. CONCLUSIONES

Se logró la identificación de los requerimientos técnicos de los materiales y económicos de la construcción de un prototipo denominado "generador de hidrógeno (H<sub>2</sub>)" a partir de fuentes secundarias, donde los principales materiales fueron el acero 316L, su mecanismo técnico por celda seca, y ajuste de láminas neutras, positivas y negativas para boceto del prototipo.

Se logró diseñar tres versiones del prototipo con sus correspondientes planos denominado generador de hidrógeno en donde se fue ajustando mediante prueba de ensayo y error en la generación de hidrógeno, hermeticidad y ensamble de todo el sistema embebido llegando a una versión de 3 placas negativas, 2 positivas y las neutras se reemplazaron por cilindros en acrílico y como electrólito el bicarbonato de sodio NaHCO<sub>3</sub>.

Se realizaron diferentes mediciones presión del gas generado, variación de la corriente, temperatura y concentración del electrólito en las celdas del prototipo denominado "generadores de hidrógeno (H<sub>2</sub>)" encontrando que con una corriente de alimentación de 5 amperios se logra producir 0,54 gramos de H<sub>2</sub> por cada hora, equivalente a 77,116 KJ de acuerdo con la entalpía de formación del hidrógeno en el proceso de electrólisis.

Se encontró que a partir de los datos de las presiones generadas en función de la concentración del electrólito en g/L; la temperatura y el tiempo, encontrándose que la variable que más afecta la presión es la concentración, siguiendo un comportamiento de tipo cuadrático de la forma  $Presión (g/L) = 0,0117 (g/L)^2 - 1,9695 (g/L) + 470,96$ . Siendo entonces 470,96 mmHg el punto de corte que refiere si se agregase solo agua sin electrólito, matemáticamente se podría decir que el prototipo es capaz de generar gas posiblemente hidrógeno.

Se logró establecer que frente al rendimiento de generación de hidrógeno en función de la corriente de alimentación del prototipo g H<sub>2</sub> (ΔI) la cantidad necesaria para que funcione el motor de dos tiempos que requiere una potencia eléctrica de 2,9 HP según el modelo de regresión lineal  $g H_2 (\Delta I) = 0,3761 (\text{amperios}) - 0,0016$  alrededor de 145 amperios para que el prototipo genera la cantidad suficiente de hidrógeno y pueda llegar a la potencia.

Según lo descrito en la hipótesis H<sub>1</sub> el prototipo desarrollado genera hidrogeno (H<sub>2</sub>), con una producción de 0,54 g y una intensidad de 5 amperios, se logra identificar a través de cálculos matemáticos que el motor necesita 54,3 g de hidrogeno (H<sub>2</sub>) para su funcionamiento, se adapta al motor de dos (2) tiempos identificando teóricamente que el prototipo generador de hidrogeno cumple esta condición con una intensidad de 150 amperios.

Se logró proponer la adaptación del prototipo “generador de hidrógeno (H<sub>2</sub>)” a una bicicleta que contiene un motor de dos tiempos como alternativa de movilidad en la ciudad de Bogotá basada en 3 puntos: batería recargable de 12V y 150 amperios, generador de hidrógeno H<sub>2</sub> y la ubicación del motor de 2 tiempos.

## REFERENCIAS

- [1] H. Peretti, M. Martins, Spinadel & C. Zinola. Energy conversion and storage based on hydrogen. State of art and strategized proposals in Mercosur. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. 2008.
- [2] R. Vásquez, F. Salinas. Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile, Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear. 2018.
- [3] Foro Nuclear. ¿Qué es el hidrogeno?. <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-energia-nuclear/que-es-el-hidrogeno/>
- [4] Fullquímica. Elemento químico Hidrógeno, Química Inorgánica. 2011.
- [5] A. Causape, Las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en vehículos y su proyección de futuro. 2006.
- [6] C. Fernández, B. Bolaños, Energética del hidrógeno. Contexto, Estado Actual y Perspectivas de Futuro. 2011.
- [7] F. Jiménez. Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil[Trabajo de Grado, Universidad de Chile]. p. 11. 2020.
- [8] E. Mahecha, Uso del hidrógeno como fuente alternativa para alimentar pilas de combustible[Trabajo de Grado, Fundación Universitaria de América]. p. 27. 2018.
- [9] D. Díaz, Hidrógeno: combustible al alcance de todos[Trabajo de Grado, Universidad de los Andes]. p. 7. 2009.
- [10] E. Rivera, Celda seca electrolítica para la obtención de hidrógeno con aguas residuales de la empresa muebles león[Trabajo de Grado, Universidad Técnica de Ambato]. p. 40. 2015.
- [11] A. Soto, Elementos de electroquímica. 2004.
- [12] F. Brito, Apuntes sobre el concepto de equivalente químico. 2006.
- [13] J. García, Diseño y construcción de electrolizador de agua para la obtención de oxihidrogeno como gas combustible[Trabajo de Grado, Instituto Politécnico Nacional]. p. 32. 2013.
- [14] M. Alberti, Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables. 2020.
- [15] NKS. National Kwikmetal Service. 2021.
- [16] E. Quezada, D. Torres, Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo[Trabajo de Grado, Universidad Politécnica Salesiana]. p. 79. 2014.
- [17] J. Chávez, Motor de combustión interna adaptado para funcionar con hidrógeno autogenerado mediante electrólisis[Trabajo de Grado, Universidad Técnica Federico Santa María]. p. 44. 2018.
- [18] L. Ramos, Dry Cell (Celda Seca) Generador de gas HHO, Colombia. Consultado el 22 de abril de 2021. 2011.
- [19] F. Veiga, D. Martínez y M. Sánchez, La sigilosa combustión del hidrógeno.
- [20] D. Schroeder, An Introduction to Thermal Physics, Addison Wesley. 2000.
- [21] Farmagro. Ficha Motoguardan?as Stihl FS450 (digital), Stihl. 2021.
- [22] Amazon. NPP 12V 150 Amp npg12 12 150Ah Batería de GEL ciclo profundo recargable con botón estilo terminales. Consultado el 05 de noviembre del 2021. 2016.
- [23] Mercado Libre. Burbujeador. Consultado el 05 de noviembre de 2021. 2021.
- [24] Mercado Libre. Kit de ensamble. Consultado el 05 de noviembre de 2021. 2021.