

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELECTROMECAÁNICA**



**MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTROMECAÁNICA**

TESIS DE MAESTRÍA

“Presentado para la obtención del Título de MAGISTER SCIENTIARUM”

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL USO DE UNA CELDA DE
GENERACIÓN DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE
COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILÍNDRICO.**

AUTOR: Ing. Bonifacio Gerardo Copa Quispe

TUTOR: M.Sc. Ing. Gustavo Barriga Delgadillo

LA PAZ - BOLIVIA

2024



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA.

A Dios,

A mis padres: Gerardo y Sofia

Por haberme formado e impulsado a lo largo de mi vida.

A mis hermanos: Rubén, Ruddy, Antonio, Rebeca y Jaden

Por ser una de las motivaciones para seguir creciendo como persona.

A mis docentes

Por haberme compartido cada una de sus experiencias, consejos y conocimientos

tanto a nivel profesional como de vida.

Y a mis amigos y conocidos

Por siempre brindarme toda su confianza y su grandiosa amistad.

“Cada persona es un universo amigable, porque con cada decisión determina el rumbo de su vida.”

Autor: Bonifacio Copa.

AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS.

Quedo rotundamente agradecido con la Universidad Mayor de Andrés (UMSA), con la Facultad de Ingeniería, con la Carrera de Ingeniería Mecánica y Electromecánica, con el Instituto de Investigaciones Mecánicas y Electromecánica (IIME), con cada uno de los docentes que impartieron las diferentes materias de la Maestría Terminal en Ciencias de Ingeniería Mecánica y Electromecánica.

Un agradecimiento especial a mi tribunal: **Ph.D. Ing. Marco Antonio Ruiz Gutiérrez, M.Sc. Ing. Edgar Tapia Terrazas, M.Sc. Ing. Ramiro Arce Salcedo**, a mi asesor **M.Sc. Ing. Gustavo Barriga Delgadillo**, a cada uno de ellos agradecerles por siempre alentar y confiar en mis talentos para hacer realidad la presente Tesis de Maestría.

Así también agradezco a mis queridos colegas: Vania, Roberto, Omar, Marcela, Doña Ruth y a todo el equipo por brindarme su enorme amistad y por mostrarme día tras día el profesionalismo que se debe tener para sacar adelante a la Carrera de Ingeniería Mecánica y Electromecánica.

y finalmente agradecer a todos mis amigos y compañeros de aula por compartir sus grandiosas experiencias de las diferentes áreas de la ingeniería que se desempeñan, sin más que agradecer desearles a cada uno los mejores éxitos y que papa DIOS siempre guie y llené sus caminos de mucha bendición.

RESUMEN.

El Proyecto tiene la finalidad de mostrar el diseño una celda de generación de gas hidrogeno de manera experimental utilizando la electrolisis del agua para disociar las moléculas de hidrogeno y oxígeno en su estado gaseoso también conocido como HHO (gas hidroxí), el mismo es inyectado a través del tubo de aspiración de aire de un motor de combustión interna monocilíndrico para finalmente evaluar los efectos que causa en el motor como una opción de combustible alternativo.

La metodología adoptada para el desarrollo del proyecto es el diseño matemático experimental en base a la norma Alemana VDI 2221, el cual recomienda tener en cuenta ecuaciones matemáticas y parámetros iniciales antes de dimensionar un equipo o pieza en este caso una celda de generación de hidrogeno, la diferencia de voltaje entre placas, la concentración de electrolito, la corriente requerida por el generador son parámetros primordiales que se considera al momento de realizar el diseño conceptual, para el desarrollo del diseño detallado se utilizó softwares de diseño como Autodesk Inventor 2024, HHO Calculator, y finalmente para contrastar los resultados se aplicaron equipos de medida digital con Multímetro, balanza, analizador de gases, sensor de hidrogeno y demás equipos y herramientas que se muestran en el acápite 2.4.

El diseño y los resultados alcanzados son acorde a las condiciones de la ciudad de La Paz a 3865 msnm, 62,732 KPa de presión atmosférica y 288,15 K de temperatura ambiente. Para las pruebas se utilizó un motor monocilíndrico alimentado primeramente con gasolina y luego ser alimentado con una mezcla de gas hidroxí con gasolina, haciendo una comparación de los datos se puede evidenciar que al alimentar con una mezcla de gas hidroxí con gasolina, mejora las condiciones de emisiones de gases que son favorables para el medio ambiente.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----------|
| DEDICATORIA..... | I |
| AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS..... | II |
| RESUMEN..... | III |
| ÍNDICE GENERAL..... | IV |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | VIII |
| CAPITULO I..... | 1 |
| I. GENERALIDADES..... | 1 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA..... | 1 |
| 1.3 OBJETIVOS..... | 2 |
| 1.3.1 OBJETIVO GENERAL..... | 2 |
| 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 2 |
| 1.4 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS..... | 2 |
| 1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... | 3 |
| 1.6 MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| 1.6.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN..... | 3 |
| 1.6.2 BASES TEÓRICAS..... | 5 |
| 1.6.2.1 EL HIDROGENO COMO ENERGÍA ALTERNATIVA..... | 5 |
| 1.6.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL HIDROGENO..... | 6 |
| 1.6.2.3 TIPOS DE CELDAS PARA GENERACIÓN DE HIDROGENO..... | 8 |
| 1.6.2.4 ELECTROLISIS DEL AGUA..... | 11 |
| 1.6.2.5 REACCIÓN QUÍMICA EN LA ELECTROLISIS DEL AGUA..... | 12 |
| 1.6.2.6 ELECTROLITO..... | 12 |
| 1.6.2.7 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA..... | 13 |
| 1.6.2.8 CICLO OTTO..... | 15 |
| 1.7 METODOLOGÍA DEL PROYECTO..... | 18 |
| 1.7.1 DISEÑO CONCEPTUAL..... | 18 |
| 1.7.2 MODELADO..... | 19 |
| 1.7.3 DISEÑO DETALLADO..... | 19 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 1.7.4 | CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO..... | 19 |
| 1.7.5 | IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN EN UN MCIM..... | 20 |
| 1.8 | LIMITES Y ALCANCES DEL PROYECTO..... | 22 |
| 1.8.1 | ALCANCE..... | 22 |
| 1.8.2 | LIMITE..... | 22 |
| CAPITULO II..... | | 23 |
| II. INGENIERÍA DE PROYECTO..... | | 23 |
| 2.1 | EVOLUCIÓN DEL PROYECTO..... | 23 |
| 2.2 | DISEÑO DE CELDA DE GAS HIDROGENO..... | 26 |
| 2.2.1 | VARIABLES GENERALES DE DISEÑO..... | 26 |
| 2.2.2 | DETERMINACIÓN DE FORMA DE CONEXIÓN DE PLACAS..... | 26 |
| 2.2.2.1 | CÁLCULO DE CONEXIÓN DE PLACAS EN PARALELO..... | 27 |
| 2.2.2.2 | CÁLCULO DE CONEXIÓN DE PLACAS EN SERIE..... | 31 |
| 2.2.3 | VOLTAJE MÍNIMO DE ELECTROLISIS..... | 34 |
| 2.2.4 | DIMENSIONAMIENTO DE PLACAS..... | 36 |
| 2.2.4.1 | CONDUCTIVIDAD DEL ELECTROLITO..... | 38 |
| 2.2.5 | CALCULO DE CAUDAL DE OXIGENO Y HIDROGENO DESPRENDIDO..... | 39 |
| 2.2.6 | CONSTRUCCIÓN DE CELDA DE HIDROGENO..... | 40 |
| 2.2.7 | ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN..... | 40 |
| 2.2.8 | IMPLEMENTACIÓN DE CELDA DE HIDROGENO EN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA..... | 41 |
| 2.3 | CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR MONOCILÍNDRICO..... | 42 |
| 2.4 | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS..... | 42 |
| 2.4.1 | ANÁLISIS DE DATOS CELDA DE GENERACIÓN DE HIDROGENO..... | 42 |
| 2.4.1.1 | PRODUCCIÓN DE HHO..... | 42 |
| 2.4.2 | IMPLEMENTACIÓN DEL GENERADOR DE HIDROGENO A MCI MONOCILÍNDRICO..... | 43 |
| 2.4.3 | ANÁLISIS DE EMISIÓN DE GASES..... | 44 |
| 2.4.4 | ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL MOTOR..... | 46 |
| 2.4.4.1 | RENDIMIENTO DEL MOTOR:..... | 46 |
| 2.4.4.2 | POTENCIA TEÓRICA:..... | 49 |
| 2.4.4.3 | CONSUMO ESPECIFICO:..... | 50 |
| CAPITULO III..... | | 52 |
| III. COSTOS..... | | 52 |

| | | |
|-------------------------|---|-----------|
| 3.1 | COSTOS DE MATERIALES. | 52 |
| 3.2 | COSTO DE ELEMENTOS Y EQUIPOS ESPECIFICADOS. | 52 |
| 3.3 | COSTO DE ALQUILER DE INSTRUMENTOS DE MEDIDA. | 53 |
| 3.4 | COSTO DE MANO DE OBRA..... | 53 |
| 3.5 | OTROS COSTOS. | 54 |
| 3.6 | RESUMEN DE COSTOS. | 54 |
| 3.7 | PRECIO..... | 55 |
| CAPITULO IV..... | | 58 |
| IV. | EVALUACIÓN..... | 58 |
| 4.1 | CONCLUSIONES..... | 58 |
| 4.2 | RECOMENDACIONES | 58 |
| V. | BIBLIOGRAFÍA..... | 59 |
| ANEXOS..... | | 60 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

| | |
|---|----|
| Ilustración I-1 Esquema de rutas de producción de hidrogeno renovable..... | 6 |
| Ilustración I-2 Generador de hidrogeno tipo celda húmeda. | 9 |
| Ilustración I-3 Generador de hidrogeno tipo celda seca. | 10 |
| Ilustración I-4 Generador de hidrogeno tipo Stanley Meyer..... | 11 |
| Ilustración I-5 Representación gráfica del efecto de la electrolisis del agua..... | 12 |
| Ilustración I-6 Representación gráfica de la sosa cáustica. | 13 |
| Ilustración I-7 Motor de dos tiempos y sus partes. | 14 |
| Ilustración I-8 Motor de cuatro tiempos y sus partes. | 15 |
| Ilustración I-9 Diagrama ciclo otto P-V..... | 16 |
| Ilustración I-10 Diagrama ciclo otto T-S..... | 16 |
| Ilustración I-11 Diagrama de metodología de proyecto..... | 21 |
| Ilustración II-1 Primer prototipo de Generación de hidrogeno..... | 23 |
| Ilustración II-2 Segundo Prototipo de generación de hidrogeno. | 24 |
| Ilustración II-3 Tercer prototipo de generación de hidrogeno..... | 24 |
| Ilustración II-4 Celda Seca diseñado..... | 25 |
| Ilustración II-5 Conexión en paralelo de placas..... | 27 |
| Ilustración II-6 Conexión de placas en serie. | 31 |
| Ilustración II-7 Electrolisis del agua. | 34 |
| Ilustración II-8 Celda de seca de hidrogeno. | 37 |
| Ilustración II-9 Software HHO Hydrogen Generator Cell Configurator..... | 39 |
| Ilustración II-10 Recalculo de 3 celdas con Software HHO Hydrogen Generator Cell Configurator..... | 40 |
| Ilustración II-11 Conexionado de celda de generación de hidrogeno. | 41 |
| Ilustración II-12 Datos experimentales de la producción de HHO..... | 43 |
| Ilustración II-13 Grafica comparativa de emisión de gases. | 45 |
| Ilustración II-14 Limites permisibles según la NB 62002-2020..... | 46 |

ÍNDICE DE TABLAS.

| | |
|---|----|
| Tabla I-1 Propiedades del hidrogeno..... | 7 |
| Tabla II-1 Variables generales de diseño. | 26 |
| Tabla II-2 Relación de tamaño de motor y flujo de HHO..... | 36 |
| Tabla II-3 Caudal mínimo de producción para 208 cc. | 36 |
| Tabla II-4 Dimensiones de las placas. | 37 |
| Tabla II-5 Especificaciones técnicas de los materiales para la celda. | 40 |
| Tabla II-6 Especificaciones técnicas de material para conexión a motor. | 41 |
| Tabla II-7 Características del motor de combustión interna monocilíndrico. | 42 |
| Tabla II-8 Datos motor funcionando con gasolina..... | 44 |
| Tabla II-9 Datos del motor funcionando con mezcla de gasolina e hidrogeno..... | 45 |
| Tabla II-10 Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos..... | 50 |
| Tabla II-11 Resultados en la mezcla gasolina+ aire y gasolina + hidrogeno..... | 51 |
| Tabla III-1 Resumen de costo de materiales..... | 52 |
| Tabla III-2 Resumen de costo de elementos y equipos especificados..... | 52 |
| Tabla III-3 Costo de alquiler de instrumentos de medida..... | 53 |
| Tabla III-4 Costo de mano de obra. | 54 |
| Tabla III-5 Otros costos..... | 54 |
| Tabla III-6 Resumen de costos..... | 54 |
| Tabla III-7 Costo total. | 55 |
| Tabla III-8 Costo total, utilidad y compras con factura..... | 55 |

CAPITULO I

GENERALIDADES.

1.1 INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, la humanidad se enfrenta a un agotamiento acelerado de las fuentes naturales no renovables de energía. Ante este escenario preocupante, resulta imperativo plantear soluciones basadas en el uso de energías alternativas. Una de las opciones más prometedoras es el hidrógeno, un recurso abundante que se encuentra como componente del agua y puede obtenerse de manera sostenible a través de diversos procesos adecuados.

El hidrógeno se posiciona como un elemento clave en la búsqueda de un combustible alternativo de bajo impacto ambiental. Al reducir de forma significativa las emisiones de CO, este combustible alternativo contribuye a mitigar la contaminación ambiental que afecta a nuestro planeta. Además, el hidrógeno se presenta como una fuente energética eficiente, capaz de potenciar el rendimiento y el funcionamiento óptimo de los Motores de Combustión Interna (MCI) según las bibliografías consultadas para el desarrollo del presente proyecto.

El valor del hidrógeno como energía limpia radica en la disponibilidad de reservas suficientes para asegurar una reducción considerable de los gases contaminantes generados por la combustión en los MCI. Por lo tanto, este recurso gaseoso adquiere una importancia crucial en la lucha contra el impacto ambiental que nos afecta hoy en día.

La adopción efectiva del hidrógeno como fuente de energía supone un paso hacia un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Su implementación exitosa representa una oportunidad para impulsar una transición energética hacia un modelo de vida más limpio y responsable.

1.2 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.

¿Cómo y cuáles son las variables que intervienen al diseñar una celda de generación de hidrogeno y los efectos que causa la implementación en un motor de combustión interna monocilíndrico?

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

Diseñar y evaluar una celda de generación de hidrogeno para ser implementado en un motor de combustión interna monocilíndrico.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Dimensionar una celda de generación de hidrogeno teniendo en cuenta las características del MCI.
- Calcular y seleccionar los componentes para la celda de generación de hidrogeno.
- Construir e implementar la celda de generación de hidrogeno en un MCI monocilíndrico.
- Obtener resultados de la implementación de la celda en un MCI y sus efectos.

1.4 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

“Una celda de generación de hidrogeno implementado a un MCI, logra una reducción en las emisiones de gases contaminantes.”

Explicación: La adición de una celda de generación basada en una celda de hidrógeno por electrólisis en un motor de combustión interna tiene como objetivo utilizar la electricidad generada mediante la electrólisis del agua para producir hidrógeno. Este hidrógeno puede ser utilizado como un combustible limpio y eficiente en el motor de combustión interna.

La hipótesis plantea que esta implementación resultará en un aumento de la eficiencia energética del motor. Al utilizar la electricidad generada por la electrólisis para producir hidrógeno, se evita la necesidad de utilizar combustibles fósiles convencionales en el motor. El hidrógeno puede ser utilizado como un combustible de alta densidad energética, lo que permite una mayor eficiencia en la generación de potencia y, en consecuencia, una mayor economía de combustible.

Además, se espera que la celda de generación basada en la electrólisis del agua y el uso de hidrógeno como combustible contribuyan a la reducción de las emisiones contaminantes.

1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

Una celda de generación de hidrógeno en un motor de combustión interna radica en la necesidad de buscar alternativas más sostenibles y limpias para la producción de energía y el transporte. El uso de combustibles fósiles en los motores de combustión interna es una de las principales causas de la contaminación del aire y el cambio climático, lo que ha llevado a la necesidad de buscar soluciones más sostenibles y amigables con el medio ambiente.

La utilización de hidrógeno como combustible para los motores de combustión interna es una alternativa prometedora debido a su alta eficiencia energética y su producción de emisiones cero de dióxido de carbono y otros contaminantes. Además, el hidrógeno se puede producir a partir de fuentes renovables como la energía solar, eólica o hidroeléctrica.

La presente investigación es una contribución a la transición hacia una economía más sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Además, puede tener un impacto positivo en la calidad del aire y la salud pública, al reducir las emisiones contaminantes y mejorar la calidad del aire en las áreas urbanas.

Además, es una oportunidad para investigar y desarrollar nuevas tecnologías y técnicas para la producción y utilización del hidrógeno como combustible, lo que puede tener implicaciones más amplias para la transición a una economía más sostenible.

1.6 MARCO TEÓRICO.

1.6.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

Existen algunos proyectos y estudios de similitud que se han llevado a cabo para evaluar la implementación de una celda de generación de hidrógeno en un motor de combustión interna. A continuación, se muestran un resumen de algunos proyectos de investigación resaltantes de la bibliografía web existen en la red del mundo:

Investigación del motor de hidrógeno de combustión interna: Este proyecto, llevado a cabo por la Universidad de Hong Kong en 2019, se centró en la conversión de un motor de combustión

interna existente para funcionar con hidrógeno. El motor fue modificado para permitir la inyección de hidrógeno y la regulación de la mezcla de combustible y aire. Los resultados indicaron una reducción significativa en las emisiones de gases de escape y un aumento en la eficiencia del combustible.¹

Evaluación de la combustión del hidrógeno en un motor de combustión interna: Un estudio realizado por la Universidad de Minnesota en 2015 evaluó la combustión del hidrógeno en un motor de combustión interna de cuatro tiempos. Los resultados mostraron que la combustión del hidrógeno produjo una mayor eficiencia térmica y una reducción significativa en las emisiones de NOx y partículas de hollín.²

Desarrollo de un motor de combustión interna de hidrógeno: Este proyecto, llevado a cabo por la Universidad de California, Riverside en 2013, se centró en el desarrollo de un motor de combustión interna de hidrógeno de alta eficiencia. El motor fue diseñado para funcionar con hidrógeno y produjo una eficiencia térmica del 45%, lo que lo hace más eficiente que los motores de combustión interna convencionales.³

En general, los estudios y proyectos han demostrado que la generación de hidrógeno en un motor de combustión interna puede mejorar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones de gases de escape. Sin embargo, también se han identificado algunos desafíos, como la necesidad de mejorar la estabilidad de la combustión del hidrógeno y garantizar la seguridad en el almacenamiento y manejo del hidrógeno.

¹ Zhou, W., Huang, R., & Cheung, C. (2019). Investigation of a hydrogen internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(2), 1031-1041. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.157

² Li, J., Liu, H., Hu, Z., & Cheng, A. (2015). Combustion of hydrogen in a spark-ignition engine: Efficiency and emissions. *Applied Energy*, 154, 580-588. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.070

³ Sobhani, R., Chuang, J. C., & Jafari, M. (2013). Development of high efficiency hydrogen internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(27), 12031-12038. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.06.087

Según los proyectos citados anteriormente se han realizado experimentos con la electricidad y el agua, en los cuales se muestra que cuando se hace pasar una corriente eléctrica por el agua, se puede romper el enlace que existe entre los átomos que la componen liberando de este modo gas de hidrogeno y gas de oxígeno.

1.6.2 BASES TEÓRICAS.

1.6.2.1 EL HIDROGENO COMO ENERGÍA ALTERNATIVA.

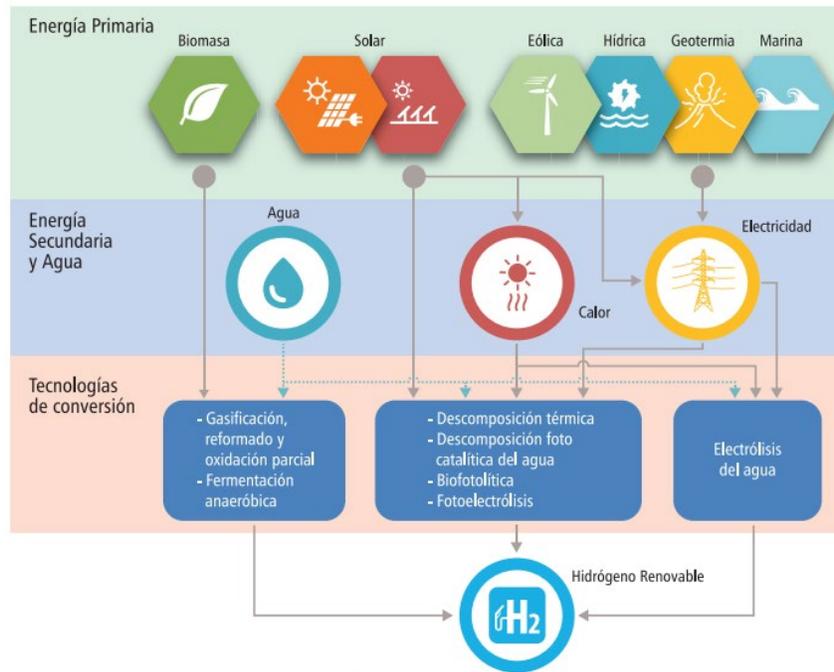
El hidrogeno es elemento más abundante en el universo, pero no se encuentra en su estado puro en nuestro planeta. Por lo tanto, este debe ser producido a través de variados procesos, los cuales se pueden clasificar en:

- Termoquímicos: usan calor y reacciones químicas para obtener el hidrógeno de combustibles convencionales o biomasa.
- Electrolíticos: el agua (H₂O) se disocia en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂) usando electricidad.
- Biológicos: microorganismos, tales como bacterias y algas pueden generar hidrógeno por medio de procesos biológicos propios.
- Otros procesos: como la descomposición foto catalítica y biológica del agua.

Actualmente, un 96% del hidrogeno en el mundo se extrae a partir de combustibles fósiles y solo un 4% a través del agua. La producción mundial de hidrogeno se estima en 65 Mt/año y emite alrededor de 500 Mt CO₂/año, se proyecta que esta demanda se incrementara hasta alcanzar las 200 mil toneladas al año, debido a su uso en el transporte pronosticado para el 2030 y que los principales consumidores serán Japón, China, Corea del sur. Se prevé que si se reemplazaran los combustibles fósiles con hidrogeno, su producción debería ser a partir de ERNC, en caso contrario, las emisiones de CO₂ por producción de H₂ se incrementarían significativamente.⁴

⁴ <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/07/LIBRO-TECNOLOGIAS-H2-Y-PERSPECTIVAS-CHILE.pdf>

Ilustración I-1 Esquema de rutas de producción de hidrogeno renovable.



Fuente: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/07/LIBRO-TECNOLOGIAS-H2-Y-PERSPECTIVAS-CHILE.pdf>

1.6.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL HIDROGENO.

El hidrógeno es un elemento químico no aislado que se ubica como el primer elemento en la tabla periódica. Es un elemento del agua (H_2O), también se encuentra combinado con otros elementos como los hidrocarburos, específicamente no es un combustible, tiene propiedades físicas y químicas que lo diferencian de los demás combustibles. La forma mas sencilla de obtener es por el proceso electrolisis.

El aire es 14,4 veces más pesado que el hidrógeno siendo este muy ligero, su condensación se la realiza a $-252,77\text{ }^{\circ}C$. Este gas al quemarse brinda una energía más alta que otros tipos de combustibles, pero su efecto no es dañino contra el medio ambiente ya que solo genera agua cuando el carburante es el oxígeno puro⁵.

⁵ M. Aguer y A. L. Miranda. El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado. 2da Edición. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A., 2012.

El hidrógeno está presente en todo el planeta, pero no se encuentra de forma natural, siempre está enlazado con otros elementos, siendo así el H₂ está presente en diferentes compuestos como el agua (H₂O), incluso en los compuestos que provienen del petróleo como el benceno (C₆H₆), poli-cloruro de vinilo (C₂H₃Cl), entre otros. También está unido a varios compuestos orgánicos como el amoníaco (NH₃), el bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y muchos más⁶.

En la tabla se presenta las propiedades del hidrogeno físicamente:

Tabla I-1 Propiedades del hidrogeno.

| Parámetros | Valor | Unidades |
|---|------------------------|-------------------|
| Peso molecular | 2,016x10 ⁻³ | kg/mol |
| Punto de fusión | 13,96 | k |
| Punto de ebullición | 14,00 | k |
| Densidad a 4,2 K (solido) | 89,00 | kg/m ³ |
| Densidad a 20,4 K (liquido) | 71,00 | kg/m ³ |
| Densidad a 0 °C y 101,3 kPa (gaseoso) | 8,99x10 ⁻² | kg/m ³ |
| Conductividad térmica a 25 °C | 1,842x10 ⁻¹ | W/k*m |
| Calor bruto de combustión a 25 °C y 101,3 kPa | 2,6504x10 ⁵ | kJ/kg*mol |
| Calor neto de combustión a 25 °C y 101,3 kPa | 2,4192x10 ⁵ | kJ/kg*mol |
| Temperatura de auto ignición | 858,00 | k |
| Límite de inflamabilidad en oxígeno | 4 a 94 | % |
| Límite de inflamabilidad en aire | 4 a 74 | % |

Fuente: [Hidrógeno - Propiedades del Hidrógeno \(elementos.org.es\)](https://www.elementos.org.es/).

Una de las ventajas que ofrece el hidrogeno es que uno de los elementos más abundantes en la naturaleza alrededor de 75 % de nuestro universo está compuesto por este elemento, su alta disponibilidad lo convierte en una de las opciones más viables para el reemplazo de la tecnología que opera con el uso de combustibles fósiles, el principal inconveniente es que este elemento no se encuentra libre en la naturaleza sino que por lo general existe mezclado con otros elementos como en el agua (hidrogeno y oxígeno) o en el metano (hidrogeno y carbono). La

⁶ J. I. Vermeersch, "Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua", (Tesis de pregrado), Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, 2018.

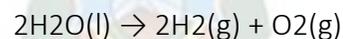
manera de obtener este elemento es mediante el proceso de electrolisis, es decir separando los elementos que constituyen el agua mediante la aplicación de una corriente eléctrica existen otras formas de obtener hidrogeno a partir del gas natural y otros compuestos, pero estos procesos son más contaminantes.

1.6.2.3 TIPOS DE CELDAS PARA GENERACIÓN DE HIDROGENO.

Las celdas de generación de hidrógeno por electrolisis son dispositivos electroquímicos que utilizan una corriente eléctrica para separar el hidrógeno y el oxígeno en una solución de agua con electrolitos. El hidrógeno generado puede ser utilizado como combustible limpio y eficiente en una variedad de aplicaciones, incluyendo vehículos de combustible de hidrógeno y sistemas de energía estacionarios.

En una celda de electrolisis de agua, se aplica una corriente eléctrica a través de una solución de agua con electrolitos utilizando dos electrodos: un ánodo y un cátodo. El ánodo está conectado al polo positivo de una fuente de corriente eléctrica y el cátodo al polo negativo. Cuando se aplica la corriente eléctrica, los iones en la solución de agua se mueven hacia los electrodos y se produce la separación del hidrógeno y el oxígeno.

En el ánodo, los iones hidroxilo (OH⁻) pierden electrones y se oxidan para formar oxígeno y agua. En el cátodo, los iones hidrógeno (H⁺) ganan electrones y se reducen para formar hidrógeno. La reacción general que tiene lugar en una celda de electrolisis de agua es:



La eficiencia de la generación de hidrógeno en las celdas de electrolisis de agua depende de varios factores, incluyendo la composición de los electrodos, la temperatura y la presión de la celda, así como la calidad del electrolito utilizado. Los materiales comúnmente utilizados en los electrodos incluyen metales como el platino y el paladio, así como compuestos de óxido de metales de transición como el óxido de iridio y el óxido de rutenio.

Las celdas de generación de hidrógeno por electrolisis tienen el potencial de convertirse en una fuente importante de energía limpia y renovable, pero todavía enfrentan desafíos significativos en términos de costo y eficiencia. A medida que la tecnología continúa avanzando y se desarrollan nuevos materiales y métodos de fabricación, se espera que la eficiencia y la viabilidad económica de las celdas de generación de hidrógeno por electrolisis mejoren en el futuro.

a. **GENERADOR DE HIDROGENO DE CELDA HÚMEDA.**

Este tipo de celdas están sumergidas completamente en el electrolito, y su desenvolvimiento es sencillo, ya que permite que la electricidad se disperse completamente dentro del electrolito, provocando que la separación de las partículas de hidrógeno ocurra en el cátodo cargado negativamente y oxígeno sucediendo en el ánodo cargado positivamente, los gases que son separados alrededor de los electrodos son expulsados hacia el exterior, su construcción es sencilla por lo que es muy utilizada.⁷

Ilustración I-2 Generador de hidrogeno tipo celda húmeda.



Fuente: <https://hydroenergy.mx/blog/2019/10/30/celdas-secas-vs-celdas-humedas/>

b. **GENERADOR DE HIDROGENO DE CELDA SECA.**

⁷<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21256/1/UPS-CT009350.pdf#page=66&zoom=100,109,437>

Esta celda tiene una eficiencia mayor a la celda húmeda, pero su construcción es más complicada ya que el electrolito se encuentra dentro de la celda, siendo el contenedor donde el electrolito circula dentro de las celdas y también los gases producidos cuando está en funcionamiento.

Ilustración I-3 Generador de hidrogeno tipo celda seca.



Fuente: <https://hydroenergy.mx/blog/2019/10/30/celdas-secas-vs-celdas-humedas/>

c. GENERADOR DE HIDROGENO TIPO STANLEY MEYER.

Este generador funciona de forma contraria a los descritos anteriormente pues en ellos se usan corrientes altas (más de 10 A) y voltajes bajos (12 VDC), este generador funciona con corrientes en el rango de miliamperios y corrientes por encima de los 50 A.

Ilustración I-4 Generador de hidrogeno tipo Stanley Meyer.



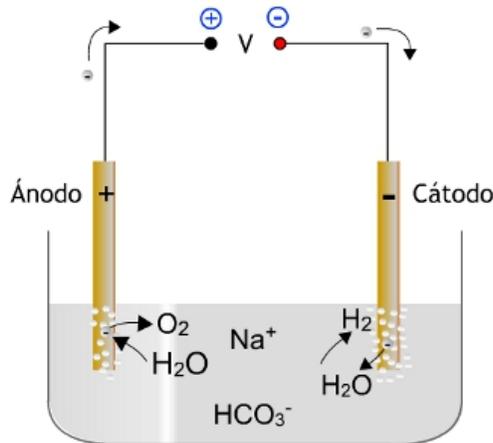
Fuente: <https://www.pinterest.com/denledesma/stan-meyer-hho/>

Las celdas descritas con anterioridad generan un gas de oxihidrogeno (HHO) que es una mezcla de hidrogeno diatómico y oxígeno en una proporción de 2:1, el oxihidrogeno se produce habitualmente a partir de la electrolisis del agua. El cual fue descubierto por el búlgaro Yull Brown.

1.6.2.4 ELECTROLISIS DEL AGUA.

La electrolisis del agua no es nada más que la descomposición del agua (H_2O) en oxígeno (O_2) y en hidrogeno (H_2), debido a una corriente eléctrica que pasa a través del agua por medio de un ánodo y un cátodo. La electrolisis del agua pura requiere el exceso de energía en forma de sobretensión para superar la activación de diversas barreras. Sin el exceso de energía de la electrolisis del agua pura se produce muy lentamente o nada. Esto se debe en parte a la limitada auto ionización del agua. La eficiencia de la electrolisis se incrementa a través de la adición de un electrolito (tales como sal, acido o una base).

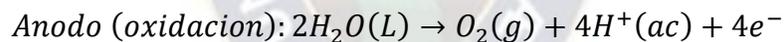
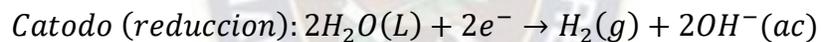
Ilustración I-5 Representación gráfica del efecto de la electrolisis del agua.



Fuente: <https://fisquiweb.es/Laboratorio/Electrolisis/ElectrolisisAqua.htm>

1.6.2.5 REACCIÓN QUÍMICA EN LA ELECTROLISIS DEL AGUA.

Las reacciones que se producen tanto en el cátodo como en el ánodo, las cuales deben ser equilibradas por oxidación o reducción del agua.



1.6.2.6 ELECTROLITO.

El electrolito puede ser cualquier sustancia que contiene iones libres, con la capacidad de incrementar la conductividad del agua, estas sustancias comúnmente son disoluciones ácidas, bases o sales, las soluciones de electrolitos se forman normalmente cuando una sal se coloca en un solvente tal como el agua, y los componentes individuales se disocian debido a las interacciones entre las moléculas del solvente y el soluto, en un proceso denominado solvatación.

Ilustración I-6 Representación gráfica de la sosa cáustica.



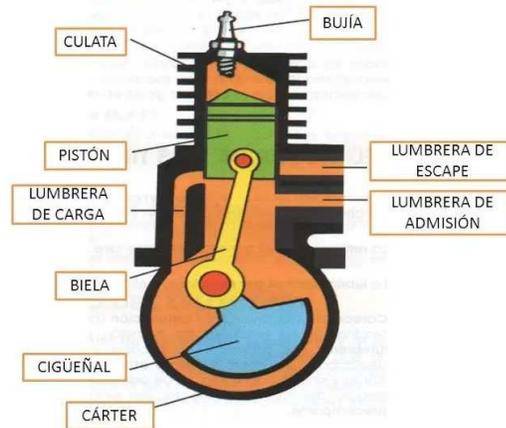
Fuente: <https://elixirsameq.com/desarrollo-tecnologia/ingredientes-y-materias-primas/soda-caustica-y-su-realidad-en-la-industria>

1.6.2.7 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA.

Los motores de combustión interna son dispositivos que convierten la energía química almacenada en los combustibles en energía mecánica para generar movimiento. Existen dos tipos principales de motores de combustión interna: motores de dos tiempos y motores de cuatro tiempos.

- a. **Motores de dos tiempos:** Los motores de dos tiempos son motores de combustión interna que completan un ciclo completo de combustión y escape en solo dos movimientos del pistón. En un motor de dos tiempos, la mezcla de combustible y aire se introduce en el cilindro a través de una lumbrera en el cilindro y se comprime a medida que el pistón se mueve hacia arriba. En el siguiente movimiento hacia abajo, se produce la combustión de la mezcla y el pistón expulsa los gases de escape. Simultáneamente, se introduce una nueva mezcla fresca en el cilindro a través de la lumbrera. El ciclo se repite con cada movimiento del pistón. Los motores de dos tiempos son comúnmente utilizados en motocicletas, motos acuáticas y algunos equipos de jardinería debido a su diseño simple y compacto.

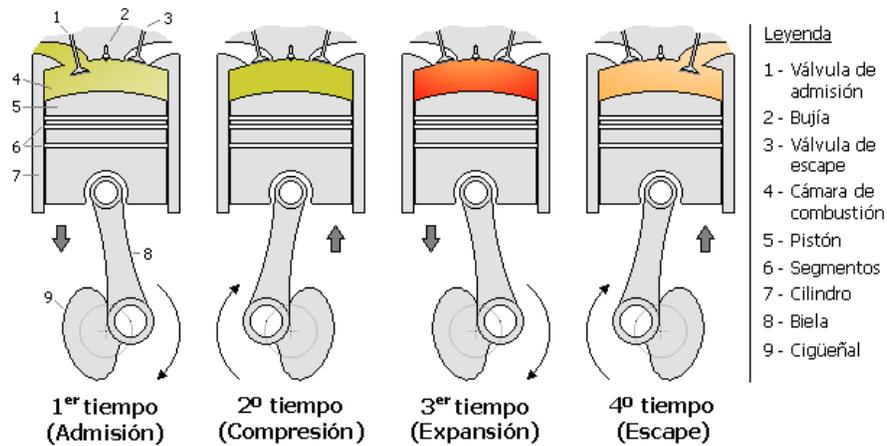
Ilustración I-7 Motor de dos tiempos y sus partes.



Fuente: <https://como-funciona.co/un-motor-de-2-tiempos/>

- b. **Motores de cuatro tiempos:** Los motores de cuatro tiempos son motores de combustión interna que completan un ciclo completo de combustión y escape en cuatro movimientos del pistón. En un motor de cuatro tiempos, el primer movimiento hacia abajo del pistón aspira la mezcla de combustible y aire en el cilindro a través de una válvula de admisión abierta. En el segundo movimiento hacia arriba, la mezcla se comprime. En el tercer movimiento hacia abajo, se produce la combustión de la mezcla y se libera la energía. En el cuarto movimiento hacia arriba, los gases de escape son expulsados del cilindro a través de una válvula de escape abierta. El ciclo se repite con cada movimiento del pistón. Los motores de cuatro tiempos son comúnmente utilizados en automóviles, camiones, aviones y otros vehículos debido a su mayor eficiencia y menor emisión de contaminantes en comparación con los motores de dos tiempos.

Ilustración I-8 Motor de cuatro tiempos y sus partes.



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_cuatro_tiempos

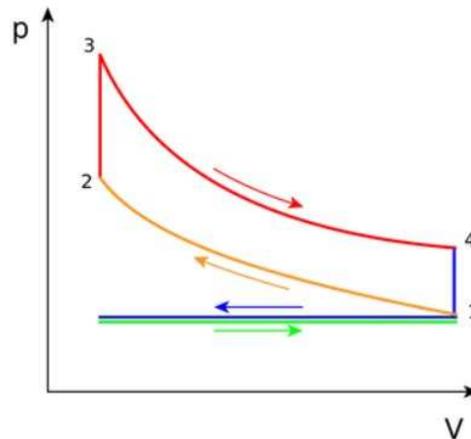
En general, los motores de combustión interna de cuatro tiempos son más eficientes y producen menos emisiones que los motores de dos tiempos, pero son más complejos y más pesados. Los motores de dos tiempos son más simples y livianos, pero son menos eficientes y emiten más contaminantes.

1.6.2.8 CICLO OTTO.

El ciclo otto teórico es el ciclo ideal del motor de combustión interna, también se conoce como motor de encendido por chispa debido a que la ignición del combustible se realiza a través de una chispa provocada por una bujía.

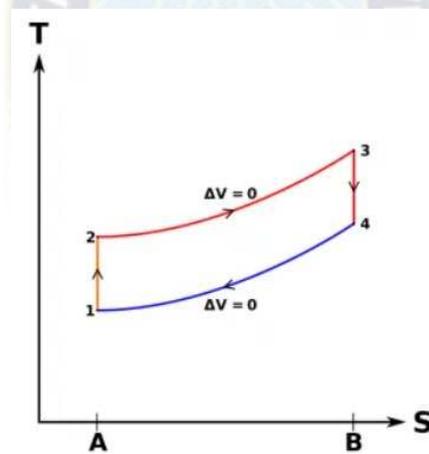
Los siguientes diagramas representan el ciclo Otto en un motor de 4 tiempos tanto en coordenadas P-V como en coordenadas T-S.

Ilustración I-9 Diagrama ciclo otto P-V.



Fuente: <https://demotor.net/motores-termicos/motor-otto/ciclo-otto>

Ilustración I-10 Diagrama ciclo otto T-S.



Fuente: <https://demotor.net/motores-termicos/motor-otto/ciclo-otto>

- 1-2. Transformación adiabática isentrópica (sin intercambio de calor con el exterior). Compresión del fluido activo y correspondiente al trabajo L_1 realizado por el pistón.
- 2-3. Transformación a volumen constante. Introducción instantánea del calor suministrado Q_1 .
- 3-4. Transformación adiabática. Expansión a presión constante y correspondiente trabajo L_2 producido por el fluido activo.
- 4-1. Transformación a volumen constante. Sustracción instantánea del calor Q_2 .

En realidad, en el motor de 4 tiempos, la sustracción del calor se verifica durante la carrera de escape 1-0, y el fluido se introduce en el motor en la carrera de aspiración 0-1, lo cual se representa gráficamente en el diagrama P-V mediante una línea horizontal, mientras que en el diagrama T-S no es posible representarlo. Los efectos de ambos procesos se anulan mutuamente, sin ganancia ni pérdida de trabajo, razón por la cual no suelen considerarse en los diagramas ideales en coordenadas P-V las carreras de aspiración y escape, y el ciclo Otto está representado como un ciclo cerrado, en el cual el fluido activo vuelve a su estado inicial cuando llega a su término la fase de expulsión del calor 4-1.⁸

El ciclo Otto cambia ligeramente en un motor de 2 tiempos respecto al motor de 4 tiempos.

✓ **Primer tiempo - Admisión compresión**

Cuando el pistón del motor alternativo alcanza el PMI (Punto Muerto Inferior) empieza a desplazarse hasta el PMS (Punto Muerto Superior). Durante el recorrido el pistón crea una diferencia de presión que aspira la mezcla de aire y gasolina por la lumbrera de admisión hacia el cárter de precompresión. El combustible entra en forma gaseosa.

Cuando el pistón tapa la lumbrera, deja de entrar mezcla. Durante el resto del recorrido descendente, el pistón la comprime la mezcla en el cárter inferior, hasta que se descubre la lumbrera de transferencia que lo comunica con la cámara de compresión. Al comunicarse con la cámara de compresión la mezcla fresca precomprimida ayuda a expulsar los gases quemados del escape.

Cuando el pistón empieza a subir la lumbrera de transferencia permanece abierta una parte de la carrera y el cárter no coge aire fresco, sino que retornan parte de los gases, perdiendo eficiencia de bombeo. A altas revoluciones se utiliza la inercia de la masa de los gases para minimizar este efecto. Es lo que se le llama renovación de la carga.

⁸ <https://demotor.net/motores-termicos/motor-otto/ciclo-otto>

✓ Segundo tiempo. Expansión y escape de gases

Una vez que el pistón del motor térmico ha alcanzado el PMS y la mezcla de aire y gasolina está comprimida, se la enciende por una chispa entre los dos electrodos de la bujía. Con el encendido el combustible libera energía y alcanza altas presiones y temperaturas en el cilindro. El pistón se desplaza hacia abajo, realizando trabajo hasta que se descubre la lumbrera de escape. Al estar a altas presiones, los gases quemados salen por ese orificio.

✓ Características del ciclo Otto de 2 tiempos

El rendimiento de este motor es inferior respecto al motor de 4 tiempos, ya que tiene un rendimiento volumétrico menor y el escape de gases es menos eficaz. Los ciclos de 2 tiempos son más contaminantes. A nivel de potencia, el ciclo Otto de 2 tiempos ofrece un par motor en la unidad de tiempo más elevado para la misma cilindrada. Esta diferencia en el par motor se debe a que el motor de 2 tiempos hace una explosión en cada revolución, mientras el motor de 4 tiempos hace una explosión por cada 2 revoluciones, y cuenta con más partes móviles.

Este tipo de motores se utilizan mayoritariamente en motores de poca cilindrada (ciclomotores, desbrozadoras, cortasetos motosierras, etc), ya que es más barato y sencillo de construir, y su emisión de contaminantes elevada es muy baja en valor absoluto.⁹

1.7 METODOLOGÍA DEL PROYECTO.

Como el objetivo general de la presente tesis es diseñar una celda de generación de hidrogeno para luego implementar y evaluar los efectos que causa en el motor de combustión interna monocilíndrico para tal propósito se plantea como estructura metodológica un diseño matemático experimental el cual se describe a continuación:

1.7.1 DISEÑO CONCEPTUAL.

Se basa en una investigación de la literatura científica y técnica sobre celdas de hidrogeno por electrolisis, con lo cual se diseña una celda generación de hidrogeno que realiza la separación

⁹ <https://demotor.net/motores-termicos/motor-otto/ciclo-otto>

del gas por medio de la electrolisis del agua, para la electrolisis se aplica un voltaje de alimentación de 12 VDC en corriente continua, que va conectado a sus bornes de cátodo (-) y ánodo (+) de la celda, dicho voltaje esta suministrado por una fuente alimentación que cuenta con un sistema de encendido manual y un fusible de protección, la celda contiene como electrolito agua con sosa caustica con una proporción de 20 gramos de sosa caustica por cada 1 litro de agua. La celda está construida con electrodos de placa de acero inoxidable AISI 304L con membranas elásticas de separación de 2mm entre electrodos, incluye dos orificios una de entrada de agua y otra de salida de gas, además contiene un depósito de doble propósito que funciona como depósito de electrolito y filtro de antirretorno.

La tecnología de la celda seleccionada, desarrolla un diseño conceptual que incluye la geometría de los electrodos, la configuración de los materiales y la disposición de los componentes. En la cual se considera aspectos como la optimización del área superficial de los electrodos, la distribución del flujo de los reactantes y productos y la minimización de pérdidas de voltaje.

1.7.2 MODELADO.

Se utiliza herramientas modelado para evaluar el desempeño del diseño conceptual. Para lo cual se realiza en modelado 3D Y 2D con el software Autodesk Inventor para con los resultados realizar los ajustes en el diseño según sea necesario.

1.7.3 DISEÑO DETALLADO.

Con base en el diseño conceptual y los resultados del modelado, se realiza un diseño detallado de la celda de hidrogeno, en la cual se define las dimensiones exactas de los componentes, los materiales específicos a utilizar, los sistemas de sellado y conexión.

1.7.4 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

Utilizando los datos del diseño detallado, se construye un prototipo de la celda, siguiendo las buenas prácticas de fabricación con los materiales especificados.

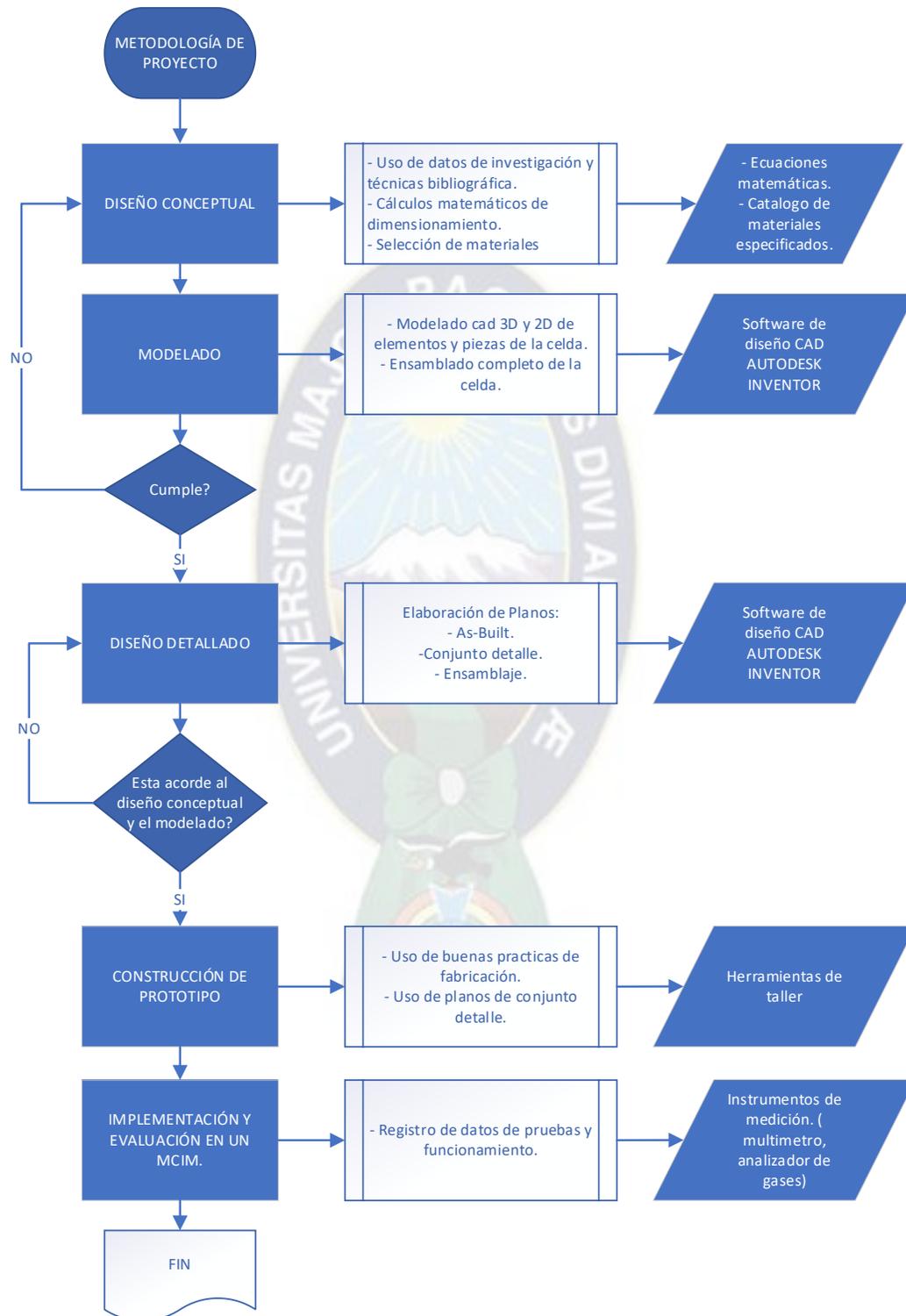
1.7.5 IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN EN UN MCIM.

Se instala la celda de hidrogeno en un motor de combustión interna monocilíndrico, para lo cual se instala una válvula de retención (flashback) desde el sistema de alimentación de hidrogeno al motor, con el fin de evitar una posible explosión del gas almacenado al momento de retornar la chispa de la bujía. El hidrogeno se inyecta por el múltiple de admisión por la cual se suministra a la cámara de combustión y desarrolla la transformación y generación de energía durante el proceso de combustión. Para finalmente registrar y evaluar los efectos que causa al implementar una celda de hidrogeno en un motor de combustión interna monocilíndrico.

Acorde a lo mencionado se muestra a continuación el diagrama resumen de la metodología del proyecto en la ilustración I-11.



Ilustración I-11 Diagrama de metodología de proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

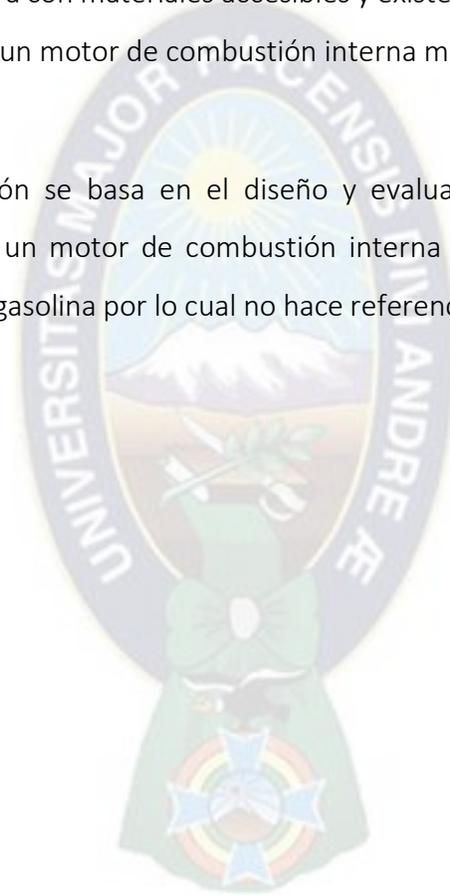
1.8 LIMITES Y ALCANCES DEL PROYECTO.

1.8.1 ALCANCE.

El Proyecto pretende mostrar los efectos que causa al usar como combustible alternativo gasolina mezclado con gas oxihidrógeno y los parámetros para diseñar una celda de generación de hidrogeno de manera casera con materiales accesibles y existen en el mercado comercial, para finalmente implementarlo en un motor de combustión interna monocilíndrico.

1.8.2 LIMITE.

La presente investigación se basa en el diseño y evaluación del uso de una celda de generación de hidrogeno en un motor de combustión interna monocilíndrico de 4 tiempos a carburador que funciona con gasolina por lo cual no hace referencia a motores Diesel o a motores con conversión GNV o GLP.



CAPITULO II

INGENIERÍA DE PROYECTO

En el siguiente capitulo se desarrolla los cálculos para el diseño del generador de hidrogeno, además se muestra los resultados al momento de implementar en un motor de combustión interna monocilíndrico.

2.1 EVOLUCIÓN DEL PROYECTO.

Para el diseño se desarrolló varios prototipos a prueba y error los cuales se presentan a continuación como evolución del proyecto:

A. PRIMER PROTOTIPO.

Ilustración II-1 Primer prototipo de Generación de hidrogeno.



Fuente: Elaboración Propia.

Fue construida en tubería PVC E40 de 6 pulgadas, con cátodo y ánodo de conexión de tornillo inoxidable de 10 mm de diámetro, exige un alto amperaje para realizar la electrolisis, por lo que presenta sobrecalentamiento en el ánodo, lo cual reduce la generación de gas HHO. Contiene placas de material inoxidable AISI304L de 100x40 mm conectadas en paralelo de manera vertical, separadas de una placa a otra con cinta elástica.

B. SEGUNDO PROTOTIPO.

Ilustración II-2 Segundo Prototipo de generación de hidrogeno.



Fuente: Elaboración propia.

Construida en bandeja de plástico transparente, con cátodo y ánodo de conexión de tornillo inoxidable de 12,5 mm de diámetro, exige un alto amperaje para realizar la electrolisis, por lo que presenta sobrecalentamiento en el ánodo, lo cual reduce la generación de gas HHO. Pero consigue mayor caudal de gas HHO en comparación al primer prototipo. Contiene placas de material inoxidable AISI304L paralelas conectadas en paralelo, separadas de una placa a otra con cinta elástica.

C. TERCER PROTOTIPO.

Ilustración II-3 Tercer prototipo de generación de hidrogeno.



Fuente: Elaboración Propia.

Está construida con placas de acero inoxidable de 45x45x1 mm conectadas en serie y acomodadas de manera horizontal, con cátodo y ánodo de conexión por varilla roscada M6, instaladas en un recipiente cilíndrico translucido, además cuenta con sistema burbujeador, el cual se alimenta con un voltaje de 12 Vdc y consume una corriente de 10 A, se pudo observar que dependiendo de su tiempo de funcionamiento el polo negativo comienza a calentar levemente.

D. CUARTO PROTOTIPO.

Ilustración II-4 Celda Seca diseñado.



Fuente: Elaboración propia.

La presente ilustración mostrada es la celda de generación de hidrogeno se diseñó y muestra los calculo en el presente documento.

2.2 DISEÑO DE CELDA DE GAS HIDROGENO.

2.2.1 VARIABLES GENERALES DE DISEÑO.

Según los datos recopilados de la bibliografía consultada y las pruebas desarrolladas por los diferentes prototipos mostrados en la sección 3.1, las variables de diseño que afectan de manera directa a una celda de generación de hidrogeno son:

Tabla II-1 Variables generales de diseño.

| Variable | Descripción |
|--------------------------|--|
| Tipo de celda | Indica el diseño y la configuración específica de la celda de hidrógeno. |
| Material del electrodo | Materiales utilizados como electrodos, como platino, titanio o acero inoxidable recubierto con óxido de iridio. |
| Electrólito | Solución conductora que permite la transferencia de iones, como agua pura o una solución electrolítica. |
| Temperatura de operación | La temperatura a la que se espera que funcione la celda de hidrógeno. |
| Tamaño y forma | El tamaño y la forma física de la celda de hidrógeno, lo cual es importante para su integración en aplicaciones específicas. |
| Voltaje de operación | Voltaje aplicado a la celda para iniciar la electrólisis y descomponer las moléculas de agua. |
| Seguridad | Medidas de seguridad implementadas para prevenir fugas, sobrecalentamiento y protección contra cortocircuitos. |
| Eficiencia | Relación entre la cantidad de electricidad consumida y la cantidad de hidrógeno generado. |

Fuente: Elaboración propia.

Estas variables de diseño son algunos de los aspectos a considerar al diseñar una celda de generación de hidrogeno por electrolisis. La optimización de estos parámetros dependerá de los requisitos específicos de la aplicación y las condiciones de operación deseadas.

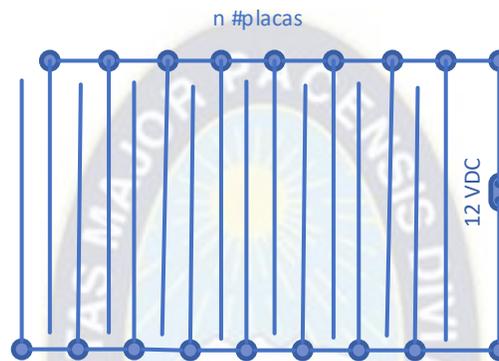
2.2.2 DETERMINACIÓN DE FORMA DE CONEXIÓN DE PLACAS.

Una celda de generación de hidrogeno está constituida de placas, estas pueden estar conectadas en paralelo o en serie, para lo cual se realiza a continuación el cálculo pertinente para cada tipo de conexión, para luego seleccionar el tipo de conexión adecuado que se aplica en el diseño.

2.2.2.1 CÁLCULO DE CONEXIÓN DE PLACAS EN PARALELO.

La conexión en paralelo se realiza conectando intercaladamente una placa positiva y una negativa, según la ley de Ohm y Kirchhoff se dice que los circuitos conectados en paralelo, su voltaje se conserva, pero su intensidad de corriente se divide como se muestra en la ilustración.

Ilustración II-5 Conexión en paralelo de placas.



Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el generador está construido por 25 placas y se suministra energía a través de una fuente de 12 VDC.

Como el circuito está conectado en paralelo, se aplica la ley de ohm para realizar el cálculo de la intensidad real (I).

$$I = \frac{I_n}{N} \quad (1)$$

Donde:

I = Es la intensidad en amperios [A].

I_n = Es la intensidad que ingresa al circuito en amperios [A].

N = Numero de placas.

Reemplazando en la ecuación se obtiene:

$$I = \frac{12 [A]}{25}$$

$$I = 0,48 [A]$$

Por tanto, por cada placa pasara 0.48 [A], además, calculamos el número de Faraday que corresponde a la cantidad de electricidad por mol de electrones de un elemento aplicando la siguiente ecuación:

$$\# \text{ de faraday} = \frac{I [A] * t [s]}{96500 [\text{coulomb}/\text{mol}]} \quad (2)$$

Donde:

I = Es la intensidad en amperios [A].

t = Es el tiempo en segundos [s].

constante de Faraday = 96500 [coulomb/mol]

Reemplazando datos en la ecuación de # de Faraday se obtiene:

$$\# \text{ de faraday} = \frac{0,48 [A] * 60 [s]}{96500 [\text{coulomb}/\text{mol}]}$$

$$\# \text{ de faraday} = 0,000298 [\text{mol}]$$

Por lo cual el equivalente químico del oxígeno tiene como masa atómica 16 g/mol y la valencia de la misma es 2.

$$\text{Equivalente quimico} = \frac{\text{masa atómica}}{\text{valencia del elemento}} \quad (3)$$

Donde:

Masa atómica: está en gramos [g].

Valencia del elemento: es adimensional.

Reemplazando datos se obtiene:

$$\text{Equivalente químico} = \frac{16 \left[\frac{g}{mol} \right]}{2}$$

$$\text{Equivalente químico} = 8 \left[\frac{g}{mol} \right]$$

Por tanto, el peso de los productos del elemento es:

Peso de productos (4)

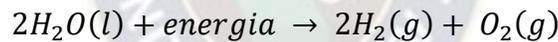
$$= \# \text{ de faraday} * \text{equivalente químico}$$

$$\text{Peso de productos} = 0,000298 \left[mol \right] * 8 \left[\frac{g}{mol} \right]$$

$$\text{Peso de productos} = 0,0024 \left[g (O_2) \right]$$

Por definición un mol de gas es equivalente a 22,4 [lt].

Además, por medio del balance estequiométrico se cumple:



$$\text{gas producido } O_2 = \frac{X * \text{Peso de productos}}{2} \quad (5)$$

Donde:

X = Es una constante que se toma para el oxígeno, sabiendo que un mol de oxígeno equivale a 22,4 litros de gas de oxígeno por definición.

$$X = \frac{0,5 \left[mol \text{ de } O_2 \right]}{\text{Equivalente químico}} \quad (6)$$

$$X = \frac{0,5 \left[mol \text{ de } O_2 \right] * \frac{22,4 \left[lt \right]}{1 \left[mol \text{ de } O_2 \right]}}{8 \left[g \right]}$$

$$X = 1,4 \left[\frac{lt}{g} \text{ de } O_2 \right]$$

Por tanto:

$$\text{gas producido } O_2 = \frac{1,4 \left[\frac{lt}{\cancel{g}} (O_2) \right] * 0,0024 [\cancel{g} (O_2)]}{2}$$

$$\text{gas producido } O_2 = 0,0017 [lt / \text{min}(O_2)]$$

Por tanto, se produce gas de hidrogeno a través de la relación 2 a 1 obtenida anteriormente en la ecuación estequiométrica.

$$\text{gas producido } H_2 = \text{gas producido } O_2 * 2$$

$$\text{gas producido } H_2 = 0,0017 \left[\frac{lt}{\text{min}(O_2)} \right] * 2$$

$$\text{gas producido } H_2 = 0,0034 \left[\frac{lt}{\text{min}} (H_2) \right]$$

$$\text{gas producido } H_2 = 3,343 \left[\frac{cm^3}{\text{min}} (H_2) \right]$$

Finalmente, el gas producido por la celda se determina sumando el hidrogeno producido más el oxígeno producido y multiplicarlo por el número de placas.

$$\text{gas producido } HHO = 0,0034 \left[\frac{lt}{\text{min}} (H_2) \right] + 0,0017 \left[\frac{lt}{\text{min}} (O_2) \right]$$

$$\text{gas producido } HHO = 0,0051 \left[\frac{lt}{\text{min}} (HHO) \right]$$

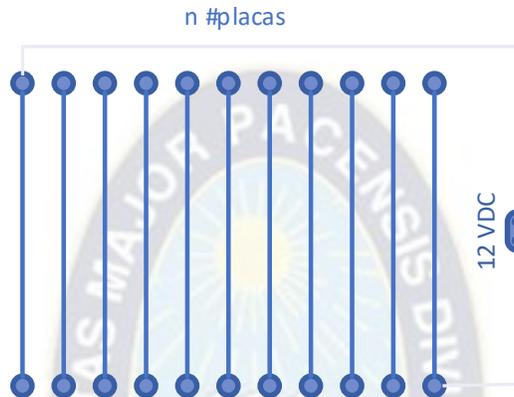
$$\text{gas producido total } HHO = 0,0051 \left[\frac{lt}{\text{min}} (HHO) \right] * 25$$

$$\text{gas producido total } HHO = 0,1275 \left[\frac{lt}{\text{min}} (HHO) \right]$$

2.2.2.2 CÁLCULO DE CONEXIÓN DE PLACAS EN SERIE.

Para la conexión en serie va conectado a un extremo el polo positivo y al otro el negativo como se muestra en la ilustración.

Ilustración II-6 Conexión de placas en serie.



Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, por cada placa pasara 12 [A], además, calculamos el número de Faraday que corresponde a la cantidad de electricidad por mol de electrones de un elemento aplicando la siguiente ecuación:

$$\# \text{ de faraday} = \frac{I [A] * t [s]}{96500 [\text{coulomb}/\text{mol}]} \quad (7)$$

Donde:

I = Es la intensidad en amperios [A].

t = Es el tiempo en segundos [s].

constante de Faraday = 96500 [coulomb/mol]

Reemplazando datos en la ecuación de # de Faraday se obtiene:

$$\# \text{ de faraday} = \frac{12 [A] * 60 [s]}{96500 [\text{coulomb}/\text{mol}]}$$

$$\# \text{ de faraday} = 0,007461 \text{ [mol]}$$

Por lo cual el equivalente químico del oxígeno tiene como masa atómica 16 g/mol y la valencia de la misma es 2.

$$\text{Equivalente químico} = \frac{\text{masa atómica}}{\text{valencia del elemento}} \quad (8)$$

Donde:

Masa atómica: está en gramos [g].

Valencia del elemento: es adimensional.

Reemplazando datos se obtiene:

$$\text{Equivalente químico} = \frac{16 \left[\frac{g}{\text{mol}} \right]}{2}$$

$$\text{Equivalente químico} = 8 \left[\frac{g}{\text{mol}} \right]$$

Por tanto, el peso de los productos del elemento es:

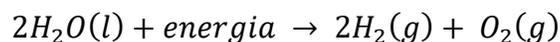
$$\text{Peso de productos} = \# \text{ de faraday} * \text{equivalente químico} \quad (9)$$

$$\text{Peso de productos} = 0,007461 \text{ [mol]} * 8 \left[\frac{g}{\text{mol}} \right]$$

$$\text{Peso de productos} = 0,05969 \text{ [g (O}_2\text{)]}$$

Por definición un mol de gas es equivalente a 22,4 [lt].

Además, por medio del balance estequiométrico se cumple:



$$\text{gas producido O}_2 = \frac{X * \text{Peso de productos}}{2} \quad (10)$$

Donde:

X = Es una constante que se toma para el oxígeno, sabiendo que un mol de oxígeno equivale a 22,4 litros de gas de oxígeno por definición.

$$X = \frac{0,5 [\text{mol de } O_2]}{\text{Equivalente químico}} \quad (11)$$

$$X = \frac{0,5 [\text{mol de } O_2] * \frac{22,4 [\text{lt}]}{1 [\text{mol de } O_2]}}{8 [\text{g}]}$$

$$X = 1,4 \left[\frac{\text{lt}}{\text{g}} \text{ de } O_2 \right]$$

Por tanto:

$$\text{gas producido } O_2 = \frac{1,4 \left[\frac{\text{lt}}{\text{g}} (O_2) \right] * 0,05969 [\text{g} (O_2)]}{2}$$

$$\text{gas producido } O_2 = 0,04178 [\text{lt}/\text{min}(O_2)]$$

Por tanto, se produce gas de hidrogeno a través de la relación 2 a 1 obtenida anteriormente en la ecuación estequiométrica.

$$\text{gas producido } H_2 = \text{gas producido } O_2 * 2$$

$$\text{gas producido } H_2 = 0,04178 \left[\frac{\text{lt}}{\text{min}(O_2)} \right] * 2$$

$$\text{gas producido } H_2 = 0,08356 \left[\frac{\text{lt}}{\text{min}} (H) \right]$$

$$\text{gas producido } H_2 = 83,56 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} (H) \right]$$

Finalmente, el gas producido por la celda se determina sumando el hidrogeno producido más el oxígeno producido y multiplicarlo por el número de placas.

$$\text{gas producido } HHO = 0,08356 \left[\frac{\text{lt}}{\text{min}} (H) \right] + 0,04178 \left[\frac{\text{lt}}{\text{min}} (O_2) \right]$$

$$\text{gas producido HHO} = 0,1253 \left[\frac{\text{lt}}{\text{min}} (\text{HHO}) \right]$$

$$\text{gas producido total HHO} = 0,1253 \left[\frac{\text{lt}}{\text{min}} (\text{HHO}) \right] * 25$$

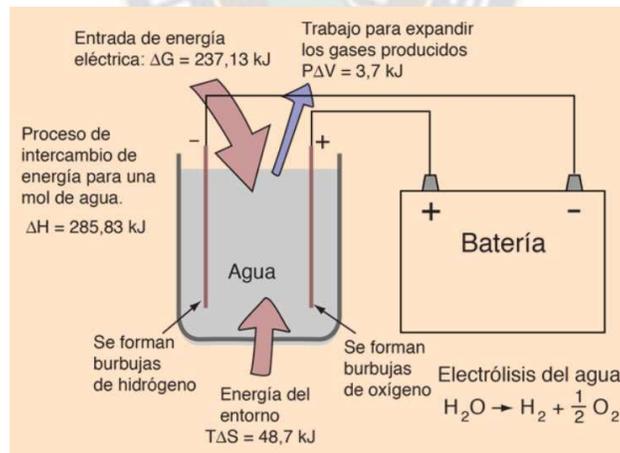
$$\text{gas producido total HHO} = 3,13 \left[\frac{\text{lt}}{\text{min}} (\text{HHO}) \right]$$

Realizando una comparación de los resultados teóricos obtenidos de una celda con placas en conexión en serie y otra en paralelo, se obtiene que una celda con placas conectados en serie produce mayor gas HHO. Por tanto, la celda de generación de hidrogeno o gas oxihidrogeno tendrá una conexión de placas en serie.

2.2.3 VOLTAJE MÍNIMO DE ELECTROLISIS.

El agua, por medio de la energía suministrada por una batería o fuente externa, se puede disociar en moléculas diatómicas de hidrogeno y oxígeno.

Ilustración II-7 Electrolisis del agua.



Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/electrol.html#c2>

En la electrolisis de manera teórica un mol de agua, produce un mol de hidrogeno y medio mol de oxigeno en sus formas normales diatómicas, para lograr dicho propósito se debe tener en cuenta la energía potencial eléctrica de la reacción entre el cátodo y el ánodo.

Según la fórmula de la energía libre de Gibbs está dada:

$$\Delta G = -n * \# \text{ de faraday} * \epsilon \quad (12)$$

Donde:

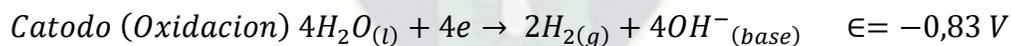
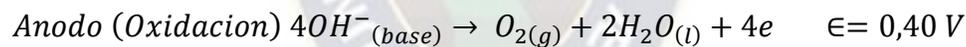
ΔG = Energía libre de Gibbs.

n = número de electrones que se intercambian en el proceso.

ϵ = Energía potencial eléctrica de la reacción (cátodo – ánodo).

En la reacción química del agua por medio de la electrolisis, para obtener oxígeno e hidrógeno gaseoso, no se da en forma natural o espontánea, sino que es necesario aplicar cierto voltaje al cambio de energía libre de Gibbs, para lograr esta separación se debe aplicar un voltaje mínimo en medio de una solución alcalina.

Los potenciales estándar de reducción se toman los valores para calcular el mínimo voltaje para la obtención de hidrógeno y oxígeno.



$$\text{Por tanto: } \Delta\epsilon = \epsilon_{catodo} - \epsilon_{anodo} = -0,83 \text{ V} - 0,40 \text{ V} = -1,23 \text{ V}$$

Hallando la energía libre de Gibbs.

$$\Delta G = -n * \# \text{ de Faraday} * \Delta\epsilon$$

$$\Delta G = -n * \# \text{ de Faraday} * (-1,23) \text{ V}$$

$$\Delta V = 1,23 \text{ V}$$

Estos valores obtenidos indican que esta reacción no es espontánea y para lograr la separación será necesario aplicar un mínimo de voltaje de 1,23 V para obtener oxígeno e hidrógeno en sus estados gaseosos.

2.2.4 DIMENSIONAMIENTO DE PLACAS.

Para dimensionar las placas se determina el caudal mínimo que se necesita para un motor de 208 cc, para lo cual se acude a la siguiente tabla mostrada que es una relación entre la cilindrada del motor y el flujo necesario de gas HHO.

Tabla II-2 Relación de tamaño de motor y flujo de HHO.

| Cilindrada del motor (L) | HHO L/min |
|--------------------------|-----------|
| 1 | 0,16 |
| 1,3 | 0,21 |
| 1,6 | 0,26 |
| 1,8 | 0,29 |
| 2 | 0,32 |
| 2,3 | 0,37 |
| 2,5 | 0,4 |
| 2,8 | 0,45 |
| 3 | 0,48 |
| 3,3 | 0,53 |
| 3,5 | 0,56 |
| 4 | 0,65 |
| 4,5 | 0,73 |
| 5 | 0,81 |
| 5,5 | 0,89 |
| 6 | 0,97 |

Fuente: <https://www.hho-1.com/datos-hidrogeno-hho/?lang=es>

Según la tabla anterior, se realiza una interpolación para determinar la cantidad mínima de gas oxihidrógeno a producir por la celda para alimentar a un motor de 208 cc de cilindrada.

Tabla II-3 Caudal mínimo de producción para 208 cc.

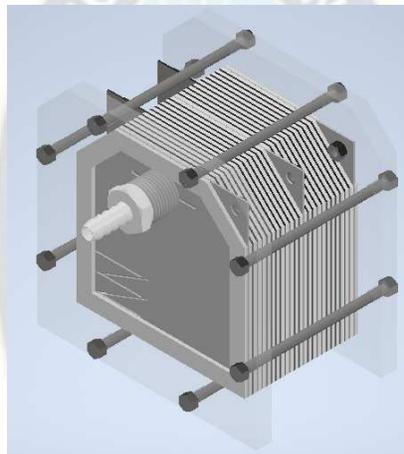
| | |
|-------------------------|--------------|
| Cilindrada de motor (L) | 0,208 |
| HHO L/min | 0,028 |

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, se puede concluir que la celda de generación de gas oxihidrogeno o hidrogeno es capaz de producir un volumen de 28 cm³/minuto.

Según las investigaciones de Michael Faraday sobre la electrolisis se afirma que las celdas resisten hasta 0.084 $\left[\frac{A}{cm^2} \right]$ sin sobrecalentarse para 7 placas en serie como muestra en la ilustración.

Ilustración II-8 Celda de seca de hidrogeno.



Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, las dimensiones de las placas serán:

Tabla II-4 Dimensiones de las placas.

| Parámetros | Variable | Valor | Unidad |
|----------------------------|----------|-------|--------|
| Ancho | x | 11 | cm |
| altura | h | 9 | cm |
| espesor | e | 0,10 | cm |
| numero de placas positivas | P(+) | 2,00 | unid. |
| numero de placas negativas | P(-) | 3,00 | unid. |
| numero de placas neutras | P(n) | 20,00 | unid. |
| Separacion entre placas | s | 0,20 | cm |
| numero de celdas | #a | 24,00 | unid. |

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de área de placas positivas y negativas:

$$A_t(\pm) = 11 * 9 * 5 = 495 \text{ cm}^2$$

Cálculo de área de placas neutras:

$$A_{tn} = 11 * 9 * 20 = 1980 \text{ cm}^2$$

Cálculo del área total de las placas:

$$AT = 495 + 1980 = 2475 \text{ cm}^2$$

Cálculo del área total del aislante:

$$A_a = (11 * 9 - 9 * 7) * 24 = 864 \text{ cm}^2$$

Cálculo del área en contacto con la solución.

$$A_s = 2475 - 864 = 1611 \text{ cm}^2$$

Por tanto, el volumen total de ocupado de la celda será:

$$V_t = 9 * 7 * 0.2 * 24 = 302,4 \text{ cm}^3$$

2.2.4.1 CONDUCTIVIDAD DEL ELECTROLITO.

Para determinar la conductividad del electrolito se aplica la siguiente ecuación:

$$C = \frac{I * e}{V * A_t} \quad (13)$$

Donde:

C = conductividad del electrolito, [siemens/cm].

I = Corriente suministrada, [A].

e = es el espesor del aislante, [cm].

V = Voltaje de alimentación, [V].

A_t = Es el área de contacto con el electrolito, [cm^2].

Reemplazando datos:

$$C = \frac{5,27 [A] * 0,2[cm]}{12 [V] * 63[cm^2]} = 0,001394[\text{siemens/cm}]$$

2.2.5 CALCULO DE CAUDAL DE OXIGENO Y HIDROGENO DESPRENDIDO.

Se realiza el cálculo del caudal de gas HHO desprendido por la celda con el programa HHOcalculator, el cual se muestra en la ilustración III-9.

Ilustración II-9 Software HHO Hydrogen Generator Cell Configurator.

Fuente: http://www.hho4free.com/configurator/cell_configurator.html (Elaboración propia).

Tomando en cuenta la cantidad de celdas 4 entonces el generador completo tiene la capacidad de generar un caudal de 1,100 [l/min] de gas HHO, tal cual se muestra en la ilustración III-10.

Ilustración II-10 Recalculo de 3 celdas con Software HHO Hydrogen Generator Cell Configurator.

Fuente: http://www.hho4free.com/configurator/cell_configurator.html (Elaboración propia).

2.2.6 CONSTRUCCIÓN DE CELDA DE HIDROGENO.

La construcción de la celda de hidrogeno se basó de acuerdo a los planos desarrollados por el software Autodesk Inventor 2023, y los planos de conjunto detalle del equipo se presentan en el anexo A (Planos de construcción).

2.2.7 ESPECIFICACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Para la construcción de la celda de generación de hidrogeno se utilizó los siguientes materiales que se especifican en la tabla:

Tabla II-5 Especificaciones técnicas de los materiales para la celda.

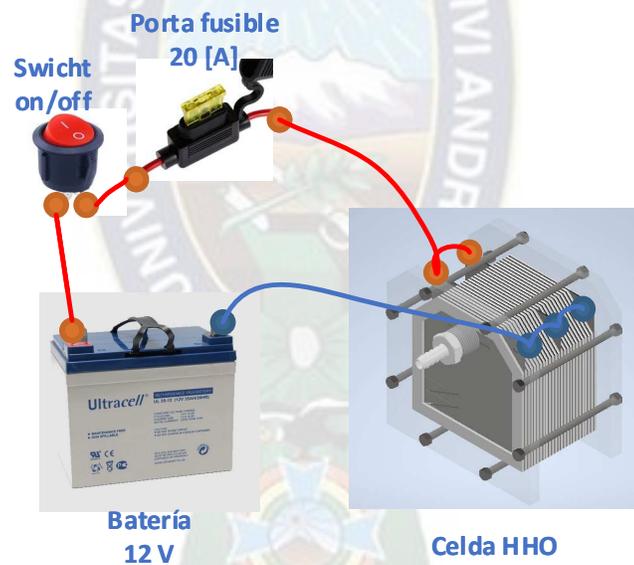
| No | Descripción | Características | Cantidad | Unidad |
|----|---------------------------|-------------------------------------|----------|--------|
| 1 | Placa de acero Inoxidable | AISI 304L 110x110x1 mm | 25 | Pza. |
| 2 | Barrilla roscada | AISI 304L M6 | 1 | m |
| 3 | Porta filtro | 10X2.5 TRANSLUCIDO 1/2" G 1012-T TW | 1 | Pza. |
| 4 | Arandela inoxidable | AISI 304L M6 | 24 | Pza. |
| 5 | Arandela de goma | Goma elástica M10 | 200 | Pza. |
| 6 | Perno inoxidable | AISI 304L M6 | 12 | Pza. |
| 7 | Cable de conexión | AWG 10 | 4 | m |
| 8 | Terminales tipo ojal | AWG 10 x M6 | 2 | Pza. |
| 9 | Porta fusible | 20 - 30 [A] | 1 | Pza. |
| 10 | Fusible | 20 [A] | 1 | Pza. |

| | | | | |
|----|-----------------------------|--|---|-------|
| 11 | Swicht on/off con indicador | INTERRUPTOR EMPOT.1PX16A 125VAC PULS-OFF RJ REDONDO 20MM | 1 | Pza. |
| 12 | Electrolito | Sosa caustica concentrada 98% | 1 | bolsa |
| 13 | Agua purificada | Agua embotellada | 2 | lt. |
| 14 | Tapón | NPT 1/2" AISI 304L | 1 | Pza. |
| 15 | Reductor | NPT 1/2-1/4" AISI 304L | 1 | Pza. |
| 16 | Conector para manguera | #8 AISI 304L | 1 | Pza. |
| 17 | Burbujeador | Botella burbujeador de alto flujo | 1 | Pza. |
| 18 | Manguera flexible | PUN-H-6X0,75-BL | 4 | m |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el conexionado del generador de hidrogeno:

Ilustración II-11 Conexionado de celda de generación de hidrogeno.



Fuente: Elaboración Propia.

2.2.8 IMPLEMENTACIÓN DE CELDA DE HIDROGENO EN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Para implementar la celda de generador de hidrogeno en el motor de combustión interna, se utilizaron los siguientes elementos descritos en la tabla:

Tabla II-6 Especificaciones técnicas de material para conexión a motor.

| No | Descripción | Características | Cantidad | Unidad |
|----|-------------------|-----------------|----------|--------|
| 1 | Manguera flexible | PUN-H-6X0,75-BL | 4 | m |

| | | | | |
|---|-------------|--|---|------|
| 2 | Resta fuego | válvula check integrada y mecanismo ahoga flamas | 1 | Pza. |
|---|-------------|--|---|------|

Fuente: Elaboración propia.

2.3 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR MONOCILÍNDRICO.

Las características del motor que se utilizó para implementar la celda de generación de hidrogeno se muestran en la tabla III-7.

Tabla II-7 Características del motor de combustión interna monocilíndrico.

| | | |
|-----------------------------|--|---------------------------|
| Motor monocilíndrico | Modelo | TP3202 |
| | Tipo | Cilindro simple 4 tiempos |
| | Cilindraje | 208 cc |
| | Relación de compresión | 8,5:1 |
| | Frecuencia de giro (RPM) | 3600 |
| | Torque máximo | 7,0 hp |
| | Consumo de combustible (g/Kw*h) | 395 |
| | Capacidad de aceite (lt.) | 0,6 |
| | Capacidad de gasolina (lt.) | 3,6 |

Fuente: Elaboración propia.

2.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS.

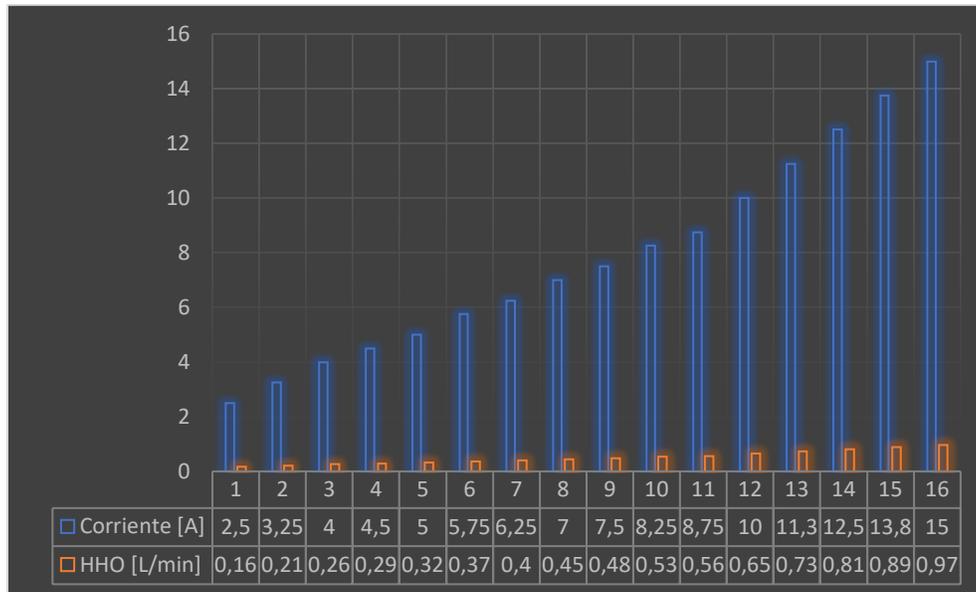
En esta sección se realizaron pruebas y mediciones para determinar los efectos que implica el adaptar una celda de generación de hidrogeno en un motor de combustión interna tipo monocilíndrico, cuyas características se describen en el acápite 3.3

2.4.1 ANÁLISIS DE DATOS CELDA DE GENERACIÓN DE HIDROGENO.

2.4.1.1 PRODUCCIÓN DE HHO.

Se realizo la prueba de producción de hidrogeno aplicando diferentes corrientes y así determinar de manera experimental el caudal de producción de gas HHO, La celda diseñada. Los resultados de la prueba se presentan en ilustración III-12.

Ilustración II-12 Datos experimentales de la producción de HHO.

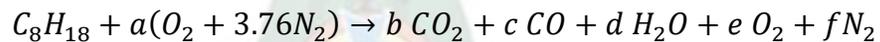


Fuente: Elaboración Propia.

Según los resultados obtenidos podemos concluir que la corriente es directamente proporcional al caudal de producción de gas HHO, que esta formado de 2:1 de hidrogeno y oxigeno es estado gaseoso.

2.4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL GENERADOR DE HIDROGENO A MCI MONOCILÍNDRICO.

- Combustión con gasolina.



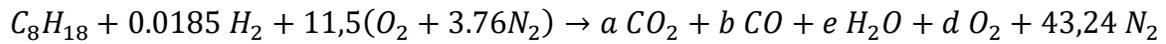
Por igualación estequiométrica se tiene la siguiente ecuación balanceada:



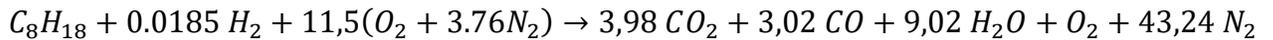
En una reacción de combustión con gasolina, se produce:

- 4 mol de CO₂
- 4 mol de CO
- 1 mol de O₂
- 43,24 moles de N₂
- 9 mol de H₂O

- Combustión con mezcla de gasolina e hidrogeno.



Por igualación estequiométrica se tiene la siguiente ecuación balanceada:



En una reacción de combustión con gasolina, se produce:

- 3.98 mol de CO₂
- 3.02 mol de CO
- 1 mol de O₂
- 43,24 moles de N₂
- 9,02 mol de H₂O

En el análisis estequiométrico se puede verificar que existe una disminución en el gas de CO, el cual se verifica en el apéndice 3.4.2 “Análisis de emisión de gases”.

2.4.3 ANÁLISIS DE EMISIÓN DE GASES.

Para obtener las diferentes muestras de los distintos gases liberados por el motor tales como: CO (Monóxido de carbono), CO₂ (Dióxido de carbono), HC (Hidrocarburos), O₂ (Oxígeno). Las muestras de emisiones de gases se realizaron gracias al analizador de gases automotriz, la información recopilada se muestra en la Tabla III-8 cuando el motor funciona con 100% gasolina.

Tabla II-8 Datos motor funcionando con gasolina.

| GASOLINA | | | | | |
|----------|------|------|--------|------|--------|
| No | CO | CO2 | HC | O2 | Lambda |
| 1 | 5,56 | 9,30 | 165,00 | 3,07 | 0,963 |
| 2 | 5,58 | 9,30 | 164,00 | 3,02 | 0,960 |
| 3 | 5,75 | 9,30 | 164,00 | 2,99 | 0,950 |
| 4 | 6,00 | 9,10 | 166,00 | 2,98 | 0,450 |
| 5 | 6,15 | 9,00 | 174,00 | 2,96 | 0,939 |
| 6 | 6,22 | 9,00 | 176,00 | 2,94 | 0,936 |
| 7 | 6,24 | 9,00 | 176,00 | 2,90 | 0,933 |
| 8 | 6,33 | 9,00 | 179,00 | 2,89 | 0,930 |
| 9 | 6,41 | 9,00 | 180,00 | 2,87 | 0,927 |

Fuente: Elaboración Propia.

Luego en la tabla III- 9 los datos cuando el motor funciona con mezcla de gasolina e hidrogeno.

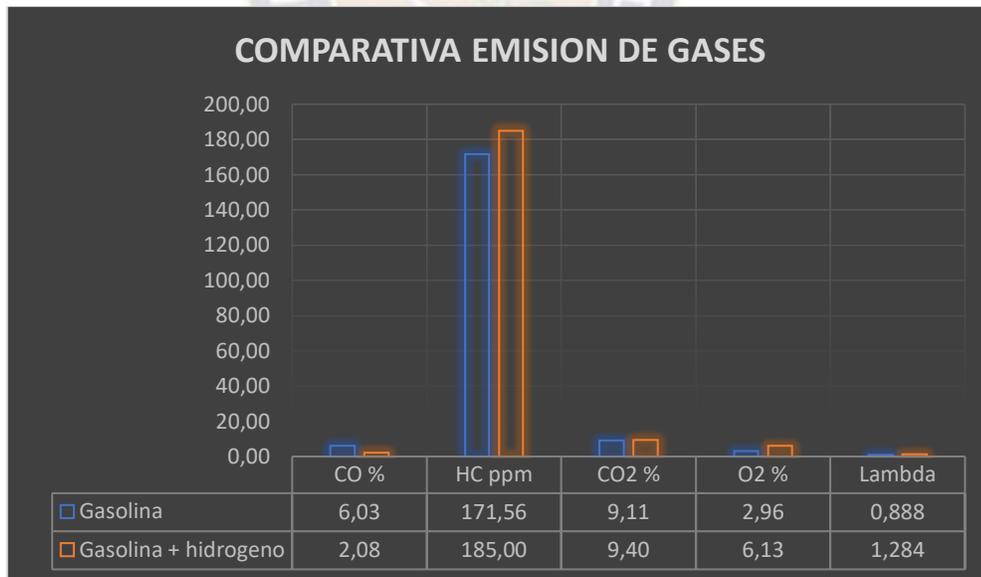
Tabla II-9 Datos del motor funcionando con mezcla de gasolina e hidrogeno.

| GASOLINA + HIDROGENO | | | | | |
|----------------------|------|------|--------|------|--------|
| No | CO | CO2 | HC | O2 | Lambda |
| 1 | 2,00 | 9,00 | 225,00 | 6,82 | 1,337 |
| 2 | 1,96 | 9,00 | 236,00 | 6,87 | 1,343 |
| 3 | 1,93 | 9,00 | 209,00 | 6,68 | 1,335 |
| 4 | 2,14 | 9,80 | 148,00 | 5,51 | 1,234 |
| 5 | 2,18 | 9,80 | 146,00 | 5,46 | 1,229 |
| 6 | 2,24 | 9,80 | 146,00 | 5,42 | 1,224 |

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, realizando un análisis comparativo entre los resultados se tiene:

Ilustración II-13 Grafica comparativa de emisión de gases.



Fuente: Elaboración Propia.

Los limites admisibles según la norma NB 62002 “Calidad del aire: emisiones de fuentes móviles, generalidades clasificación y limites permisibles”, establece los valores límite de

emisiones permisibles en motores de combustión interna, en porcentajes de contaminación tomando en cuenta solo los valores de CO y HC.

Ilustración II-14 Limites permisibles según la NB 62002-2020

| Vehículos automóbiles a gasolina | | | |
|---|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Años de fabricación | CO% de Volumen | HC (ppm) | |
| | | Altura sobre el nivel del mar | |
| | | Hasta 1 800 msnm | Mayor a 1 800 msnm |
| hasta 1996 | 4 | 500 | 550 |
| 1997 a 2009 | 2,5 | 400 | 450 |
| 2010 a 2015 | 1,5 | 200 | 250 |
| 2016 en adelante | 0,5 | 100 | 125 |

NOTA
Las clasificaciones están ligadas de acuerdo al tipo de tecnología de fabricación.

Fuente: Extraído de la Normativa Boliviana NB 62002.

Analizando los resultados promedio obtenido en la ilustración III-12, se puede observar que los valores de %CO y ppm de HC están dentro de los valores limites permisibles que indica la norma NB 62002, además se puede observar que al añadir hidrogeno + gasolina como combustible el porcentaje de monóxido de carbono reduce aproximadamente 3 veces en comparación con el resultado cuando el motor solo funciona con gasolina.

2.4.4 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL MOTOR.

De manera teórica se deben calcular los siguientes valores, para determinar el desempeño del motor.

2.4.4.1 RENDIMIENTO DEL MOTOR:

El cálculo del rendimiento del motor se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$n_v = \left(\frac{r}{r-1} \right) * \left(\frac{P_1}{P_a} \right) * \left[\frac{T_1}{T_a * (1 + \gamma_r)} \right] \quad (14)$$

Donde:

n_v : Rendimiento volumétrico

r: Es la relación de compresión

P_a : Es la presión atmosférica

P_1 : Es la presión de admisión

T_a : Es la temperatura ambiente

T_1 : Es la temperatura de admisión

γ_r : Es el coeficiente de gases residuales

El llenado del cilindro por la carga fresca de aire depende de ciertos factores como la resistencia hidráulica en el sistema de admisión, la existencia de ciertas cantidades de productos quemados, de la temperatura de las paredes del motor por acción del mismo funcionamiento, estos fenómenos mencionados en la recarga y barrido del pistón hacen posible hallar aproximadamente la presión dentro del cilindro durante el tiempo de admisión. La ecuación que la describe es la siguiente:

$$P_a = P_o - (\beta^2 + \xi) * \frac{w_{ad}^2}{2} * \rho_o * 10^{-6} \quad (15)$$

Donde:

P_a = Presión de admisión (Mpa), está entre los valores de (0.8 – 0.9).

P_o = Presión inicial (Pa).

$(\beta^2 + \xi)$ = coeficiente de amortiguación y resistencia (Adimensional), se encuentra entre los valores (2.5 – 4).

w_{ad} = Velocidad de aire en la entrada de admisión, se encuentra entre los valores de (50 – 130) (m/s).

ρ_o = Densidad de la carga de admisión (kg/cm³).

$$\rho_o = \frac{P_o}{R * T_o} \quad (16)$$

Donde:

P_0 = Presión equivalente a 1 atm (0.1013 Mpa).

T_0 = Temperatura inicial (288.15 K).

R = Constante de los gases 286,9 (J/kg*K)

Por tanto, la ecuación que define al coeficiente residual de los gases es:

$$\gamma_r = \frac{P_r}{P_1 * r - P_r} * \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \quad (17)$$

Donde:

P_1 = Presión de admisión (Mpa), está entre los valores de (0.08 – 0.09).

P_r = Presión de los gases residuales = 0.12 Mpa.

ΔT = Variación de temperatura ambiente = 15 K.

T_r = Temperatura de los gases residuales = 1050 K

r = Relación de compresión aire/combustible = 8,5:1

Entonces reemplazando datos se tiene:

$$\gamma_r = \frac{0.12}{0,085 * 8,5 - 0.12} * \frac{288,15 + 15}{1050}$$

$$\gamma_r = 0,0575$$

La temperatura de admisión final será:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r * T_r}{1 + \gamma_r} \quad (18)$$

Reemplazando datos se tiene:

$$T_a = \frac{288,15 + 15 + 0,0575 * 1050}{1 + 0,0575}$$

$$T_a = 343,76 \text{ K}$$

Finalmente, el rendimiento volumétrico del motor será:

$$n_v = \left(\frac{8,5}{8,5 - 1} \right) * \left(\frac{0,085}{0,102} \right) * \left[\frac{288,15}{343,76 * (1 + 0,0575)} \right]$$
$$n_v = 0,749$$

2.4.4.2 POTENCIA TEÓRICA:

El cálculo de la potencia teórica del motor se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$N_t = z \left(PCI \left[\frac{kJ}{kg} \right] * m_f [kg] \right) * A_{tm} \left[\frac{kPa}{kJ} \right] * \left[\frac{1,36 CV}{1 kPa} \right] * \left[\frac{0,735 kW}{1 CV} \right] * n_t \left(\frac{n}{2 * 60} \right) \quad (19)$$

Donde:

N_t : Es la potencia teórica

z : Es el número de cilindros

PCI : Poder calorífico inferior (Ver Tabla III-10)

m_f : Flujo másico del combustible

A_{tm} : Constante de transformación de calor en trabajo mecánico 1.000152754

n_t : Rendimiento térmico

n : Frecuencia

Por tanto:

Tabla II-10 Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos.

Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos comunes

| Combustible (fase) | Fórmula | Masa molar, kg/kmol | Densidad, ¹ kg/L | Entalpia de vaporización, ² kJ/kg | Calor específico, ¹ c_p kJ/kg · K | Poder calorífico superior, ³ kJ/kg | Poder calorífico inferior, ³ kJ/kg |
|-----------------------|--|---------------------|-----------------------------|--|--|---|---|
| Acetileno (g) | C ₂ H ₂ | 26.038 | — | — | 1.69 | 49,970 | 48,280 |
| Benceno (ℓ) | C ₆ H ₆ | 78.114 | 0.877 | 433 | 1.72 | 41,800 | 40,100 |
| Butano (ℓ) | C ₄ H ₁₀ | 58.123 | 0.579 | 362 | 2.42 | 49,150 | 45,370 |
| Carbono (s) | C | 12.011 | 2 | — | 0.708 | 32,800 | 32,800 |
| Decano (ℓ) | C ₁₀ H ₂₂ | 142.285 | 0.730 | 361 | 2.21 | 47,640 | 44,240 |
| Diesel ligero (ℓ) | C _n H _{1.8n} | 170 | 0.78–0.84 | 270 | 2.2 | 46,100 | 43,200 |
| Diesel pesado (ℓ) | C _n H _{1.7n} | 200 | 0.82–0.88 | 230 | 1.9 | 45,500 | 42,800 |
| Etano (g) | C ₂ H ₆ | 30.070 | — | 172 | 1.75 | 51,900 | 47,520 |
| Etanol (ℓ) | C ₂ H ₆ O | 46.069 | 0.790 | 919 | 2.44 | 29,670 | 26,810 |
| Gas natural (g) | C _n H _{3.8n} N _{0.1n} | 18 | — | — | 2 | 50,000 | 45,000 |
| Gasolina (ℓ) | C _n H _{1.87n} | 100–110 | 0.72–0.78 | 350 | 2.4 | 47,300 | 44,000 |
| Heptano (ℓ) | C ₇ H ₁₆ | 100.204 | 0.684 | 365 | 2.24 | 48,100 | 44,600 |
| Hexano (ℓ) | C ₆ H ₁₂ | 84.161 | 0.673 | 392 | 1.84 | 47,500 | 44,400 |
| Hexeno (ℓ) | C ₆ H ₁₄ | 86.177 | 0.660 | 366 | 2.27 | 48,310 | 44,740 |
| Hidrógeno (g) | H ₂ | 2.016 | — | — | 14.4 | 141,800 | 120,000 |
| Isopentano (ℓ) | C ₅ H ₁₂ | 72.150 | 0.626 | — | 2.32 | 48,570 | 44,910 |
| Metano (g) | CH ₄ | 16.043 | — | 509 | 2.20 | 55,530 | 50,050 |
| Metanol (ℓ) | CH ₄ O | 32.042 | 0.790 | 1168 | 2.53 | 22,660 | 19,920 |
| Monóx. de carbono (g) | CO | 28.013 | — | — | 1.05 | 10,100 | 10,100 |
| Octano (ℓ) | C ₈ H ₁₈ | 114.231 | 0.703 | 363 | 2.23 | 47,890 | 44,430 |
| 1-Penteno (ℓ) | C ₅ H ₁₀ | 70.134 | 0.641 | 363 | 2.20 | 47,760 | 44,630 |
| Propano (ℓ) | C ₃ H ₈ | 44.097 | 0.500 | 335 | 2.77 | 50,330 | 46,340 |
| Tolueno (ℓ) | C ₇ H ₈ | 92.141 | 0.867 | 412 | 1.71 | 42,400 | 40,500 |

¹A 1 atm y 20°C.

²A 25°C para combustibles líquidos, y 1 atm y temperatura normal de ebullición para combustibles gaseosos.

³A 25°C. Multiplique por la masa molar para obtener los valores caloríficos en kJ/kmol.

Fuente: Termodinámica Cengel 7th (Pag. 949)

2.4.4.3 CONSUMO ESPECIFICO:

El consumo específico de combustible se determinó con la relación:

$$C_e = \frac{m_f \left[\frac{g}{s} \right] * 3600 [s] * V_T [m^3] * n_i * n_m}{N_t [kW] * n_v} \quad (20)$$

Donde:

Ce: Consumo específico

mf: Flujo másico de combustible

VT: Volumen total motor

ni: Rendimiento Interno

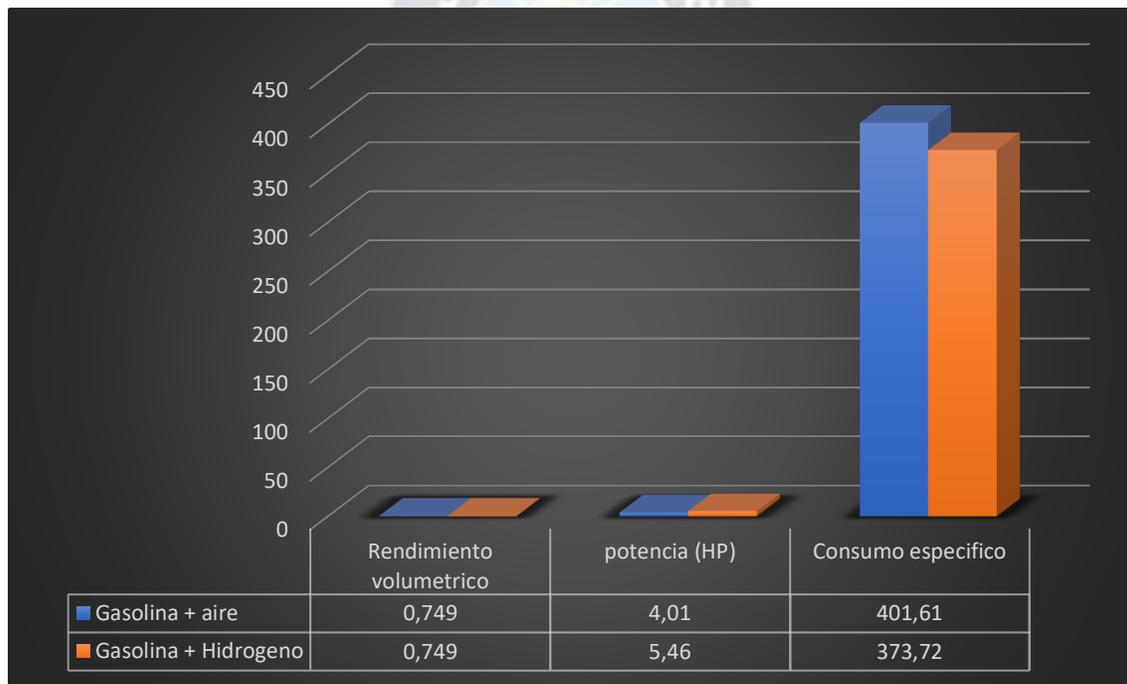
nm: Rendimiento mecánico

Nt: Potencia teórica

nv: Rendimiento Volumétrico

Se calculó de manera teórica el rendimiento volumétrico, la potencia y el consumo de combustible, y se obtuvieron los resultados teóricos para la mezcla gasolina más aire y gasolina más hidrógeno, los cuales se indican en la Tabla III-11.

Tabla II-11 Resultados en la mezcla gasolina+ aire y gasolina + hidrogeno.



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO III

COSTOS.

Considerando que el costo en sí, es la suma total de gastos y recursos que intervienen para producir un determinado elemento o producto terminado, esto a partir de la materia prima. Estos gastos comprenden desde la mano de obra directa, elementos adquiridos a través de una compra, hasta aquellos elementos que se los fabrican.

En términos generales para determinar el costo total del proyecto, se considera los costos de materiales, costo de elementos especificados, costo de mano de obra, costo de insumos y demás, las cuales se desarrollan a continuación:

3.1 COSTOS DE MATERIALES.

En el presente acápite se detallan los costos de la materia prima que se emplearon para la fabricación de los elementos que forman parte del proyecto.

Es importante destacar que el costo de estos materiales en bruto, obtuvieron del mercado local, los cuales se muestran en la tabla IV-1:

Tabla III-1 Resumen de costo de materiales.

| No | Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unit. (Bs) | Costo total (Bs) |
|--------------|--|----------|--------|------------------|------------------|
| 1 | Lamina de acero inoxidable AISI 304L e=1mm | 1 | m2 | 431,76 | 431,76 |
| TOTAL | | | | 431,76 | 431,76 |

Fuente: Elaboración propia.

3.2 COSTO DE ELEMENTOS Y EQUIPOS ESPECIFICADOS.

En la tabla se resume los costos de los elementos y componentes especificados. (Ver tabla IV-2).

Tabla III-2 Resumen de costo de elementos y equipos especificados.

| No | Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unit. (Bs) | Costo total (Bs) |
|----|--------------------------------|----------|--------|------------------|------------------|
| 1 | Acrílico traslucido 14x14x1 cm | 2 | Pza. | 240,00 | 480,00 |
| 2 | Barrilla roscada inoxidable M6 | 1 | m | 20,95 | 20,95 |

| | | | | | |
|----|---|-----|-------|--------------|---------------|
| 3 | Arandela M6 acero inoxidable AISI 304 L | 24 | Pza. | 1,50 | 36,00 |
| 4 | Arandela M10 goma elástica | 200 | Pza. | 0,50 | 100,00 |
| 5 | Perno M6 acero inoxidable AISI 304L | 24 | Pza. | 1,50 | 36,00 |
| 6 | Terminal tipo ojal AWG 10 x M6 | 4 | Pza. | 2,00 | 8,00 |
| 7 | Portafusible de línea + fusible 20 A | 1 | Pza. | 15,00 | 15,00 |
| 8 | Swicht On/off | 1 | Pza. | 5,00 | 5,00 |
| 9 | Tapón 1/2" NPT acero inoxidable AISI 304L | 1 | Pza. | 25,00 | 25,00 |
| 10 | Reductor niple 1/2 - 1/4" MM acero inoxidable AISI 304L | 1 | Pza. | 25,00 | 25,00 |
| 11 | Conector para manguera 1/4"-#8 | 1 | Pza. | 25,00 | 25,00 |
| 12 | Botellón burbujeador | 1 | Pza. | 40,00 | 40,00 |
| 13 | Válvula antifiama 1/8" | 1 | Pza. | 40,00 | 40,00 |
| 14 | Tubo flexible PUN #6 | 4 m | | 12,00 | 48,00 |
| 15 | Sosa caustica | 1 | Bolsa | 20,00 | 20,00 |
| 16 | Agua embotella de 3 lt | 1 | Pza. | 7,00 | 7,00 |
| | | | | TOTAL | 930,95 |

Fuente: Elaboración propia.

3.3 COSTO DE ALQUILER DE INSTRUMENTOS DE MEDIDA.

Para determinar las diferentes variables se necesita tener instrumentos de medidas para lo cual se alquiló los instrumentos que se muestran en la tabla. (ver tabla IV-3).

Tabla III-3 Costo de alquiler de instrumentos de medida.

| No | Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unit. (Bs/día) | Costo total (Bs) |
|----|-------------------------|----------|--------|----------------------|------------------|
| 1 | Analizador de gases | 1 | Eq. | 300,00 | 300,00 |
| 2 | motor de combustión | 1 | Eq. | 40,00 | 40,00 |
| 3 | Multímetro tipo pinza | 1 | Eq. | 40,00 | 40,00 |
| 4 | Balanza | 1 | Eq. | 10,00 | 10,00 |
| 5 | Batería 12 V + Cargador | 1 | Eq. | 40,00 | 40,00 |
| | | | | TOTAL | 430,00 |

Fuente: Elaboración propia.

3.4 COSTO DE MANO DE OBRA.

Para determinar costo de montaje y puesta en marcha del equipo se toma en cuenta el costo de mano de obra calificada de un técnico electromecánico y su ayudante. (ver tabla IV-4).

Tabla III-4 Costo de mano de obra.

| No | Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unit. (Bs) | Costo total (Bs) |
|--------------|-------------------------|----------|--------|------------------|------------------|
| 1 | Técnico electromecánico | 2 | día | 350,00 | 700,00 |
| 2 | Ayudante | 2 | día | 100,00 | 200,00 |
| TOTAL | | | | | 900,00 |

Fuente: Elaboración propia.

3.5 OTROS COSTOS.

Además, se debe tener en cuenta el costo de los insumos y el costo de herramientas y equipos que se usaron al momento de la fabricación de las piezas y al momento de realizar las diferentes pruebas. (ver tabla IV-5).

Tabla III-5 Otros costos.

| No | Descripción | Cantidad | Unidad | Costo Unit. (Bs) | Costo total (Bs) |
|--------------|--------------|----------|--------|------------------|------------------|
| 1 | Insumos | 1 | Gbl. | 200,00 | 200,00 |
| 2 | Herramientas | 1 | Gbl. | 300,00 | 300,00 |
| TOTAL | | | | | 500,00 |

Fuente: Elaboración propia.

3.6 RESUMEN DE COSTOS.

A continuación, se realiza un resumen de los costos de materiales, elementos especificados, mano de obra, insumos y máquinas y herramientas, con lo que finalmente se determina el costo neto. El cual se muestra a detalle en la siguiente tabla:

Tabla III-6 Resumen de costos.

| No | Descripción | Costo total (Bs) |
|--------------|---|------------------|
| 1 | Costo de materiales | 431,76 |
| 2 | Costo de elementos y equipos | 930,95 |
| 3 | Costo de alquiler de instrumentos de medición | 430,00 |
| 4 | Costo de mano de obra | 900,00 |
| 5 | Otros costos | 500,00 |
| TOTAL | | 3192,71 |

Fuente: Elaboración propia.

3.7 PRECIO.

A continuación, se determina el costo total, considerando imprevistos de 10 %.

Tabla III-7 Costo total.

| No | Detalle | Costo (Bs) |
|--------------------|---|----------------|
| 1 | Costo Neto | 3192,71 |
| 2 | Costo por imprevistos (10% sobre el costo neto) | 319,271 |
| Costo total | | 3511,98 |

Fuente: Elaboración propia.

La utilidad y las compras con factura se detallan a continuación:

Tabla III-8 Costo total, utilidad y compras con factura.

| No | Detalle | Costo (Bs) |
|----|-------------------------------------|------------|
| 1 | Costo total | 3.511,98 |
| 2 | utilidad (25% sobre el costo total) | 878,00 |
| 3 | Compras con factura | 930,95 |

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener un precio final con factura se procede da la siguiente manera:

$$P_f = C_{total} + U + I \quad (21)$$

Donde:

P_f = Precio con factura.

C_{total} = Costo Total

U = Utilidad

I = Impuestos

Con respecto a los impuestos se sabe que:

$$IVA = 13\% * (P_f - C_f) \quad (22)$$

$$IT = 3\% * P_f \quad (23)$$

Donde:

P_f = Precio con factura.

C_f = Costo por compras con factura = costo de elementos especificados + insumos + materiales.

IVA = Impuesto al valor agregado.

IT = Impuesto a las transacciones.

$$I = 0.13 * (P_f - C_f) + 0.03 * P_f \quad (24)$$

Se reemplaza estos valores en la ecuación y despejamos " P_f ", se tiene que:

$$P_f = \frac{C_{total} + U - 0.13 * C_f}{0.84} \quad (25)$$

Se sabe que:

$$C_f = 930,95 \text{ Bs}$$

$$C_{total} = 3.511,98 \text{ Bs}$$

$$U = 878.00 \text{ Bs}$$

Reemplazando todos los valores en la ecuación se tiene:

$$P_f = 5082.09 \text{ [Bs]}$$

Finalmente, el precio final de venta con factura del equipo se estableció considerando los impuestos de ley (13% I.V.A. y 3% I.T.) con una utilidad del 25% y unos imprevistos del 10%.

Son:

5082 Bs: Cinco mil ochenta y dos 00/100 bolivianos



CAPITULO IV

EVALUACIÓN

4.1 CONCLUSIONES

Se logro diseñar y construir una celda de generador de hidrogeno con los productos comerciales que existen en el mercado actual para luego implementarlo en un motor de combustión interna monocilíndrico con la finalidad de evaluar los efectos que tiene sobre la misma a condiciones de la Ciudad de La Paz, así también se dimensiono la celda aplicando bibliografía consultada sobre la electrolisis del agua y para el diseño detallado acudir a softwares de diseño CAD y facilitar su posterior construcción.

Así también se afirma la hipótesis planteada de manera experimental que con la adición de gas hidroxí (HHO) producida por una celda, en un motor de combustión interna mejora y minimiza las emisiones de gases contaminantes.

4.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio de uso de hidrógeno en motores diésel con variaciones en el ingreso del volumen de hidrógeno y su comportamiento a diferente altitud y régimen de giro. Además, es necesario un estudio de optimización de la producción de hidrógeno controlado de manera electrónica con el uso de caudalímetros de alta precisión que estén en función al tipo de motor y sus condiciones de funcionamiento.

La temperatura de explosión dentro del cilindro es difícil de obtener, por lo cual debe realizar un estudio para el diseño de un termómetro resistente a altas presiones, temperaturas y con buena tolerancia para obtener valores experimentales reales.

Bibliografía

Barriga, G. (2020). *Apuntes de diseño de proyectos de tesis y grado*. La Paz: UMSA.

Cengel, Y. (2012). *Transferencia de calor y masa*. Mexico: McGrawHill.

Fabrega Ramos, M. (2009). *Hidrógeno: Aplicación en motores de combustión interna*. Cataluña, España.

Familiar Xaudaró, C. (2011). *Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores*. Cataluña, España.: Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Ciència i Enginyeria Nàutiques.

IBNORCA. (2020). *NB 62002 Calidad del aire - Emisiones de fuentes móviles - Generalidades, clasificación y límites máximos permisibles*. Bolivia: IBNORCA.

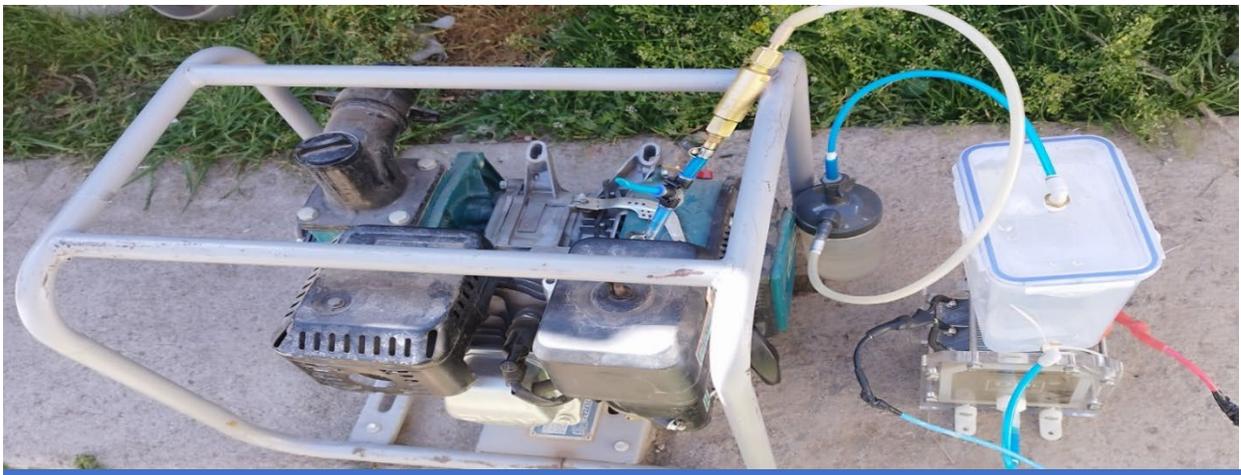
Payri, F. (2011). *Motores de combustion interna alternativos*. Barcelona: Reverte.

Velástegui, S. J. (s.f.). Obtención de los parámetros característicos del motor Daewoo 1800cc a gasolina con inyección directa de hidrógeno. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. *Tesis de grado*. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.

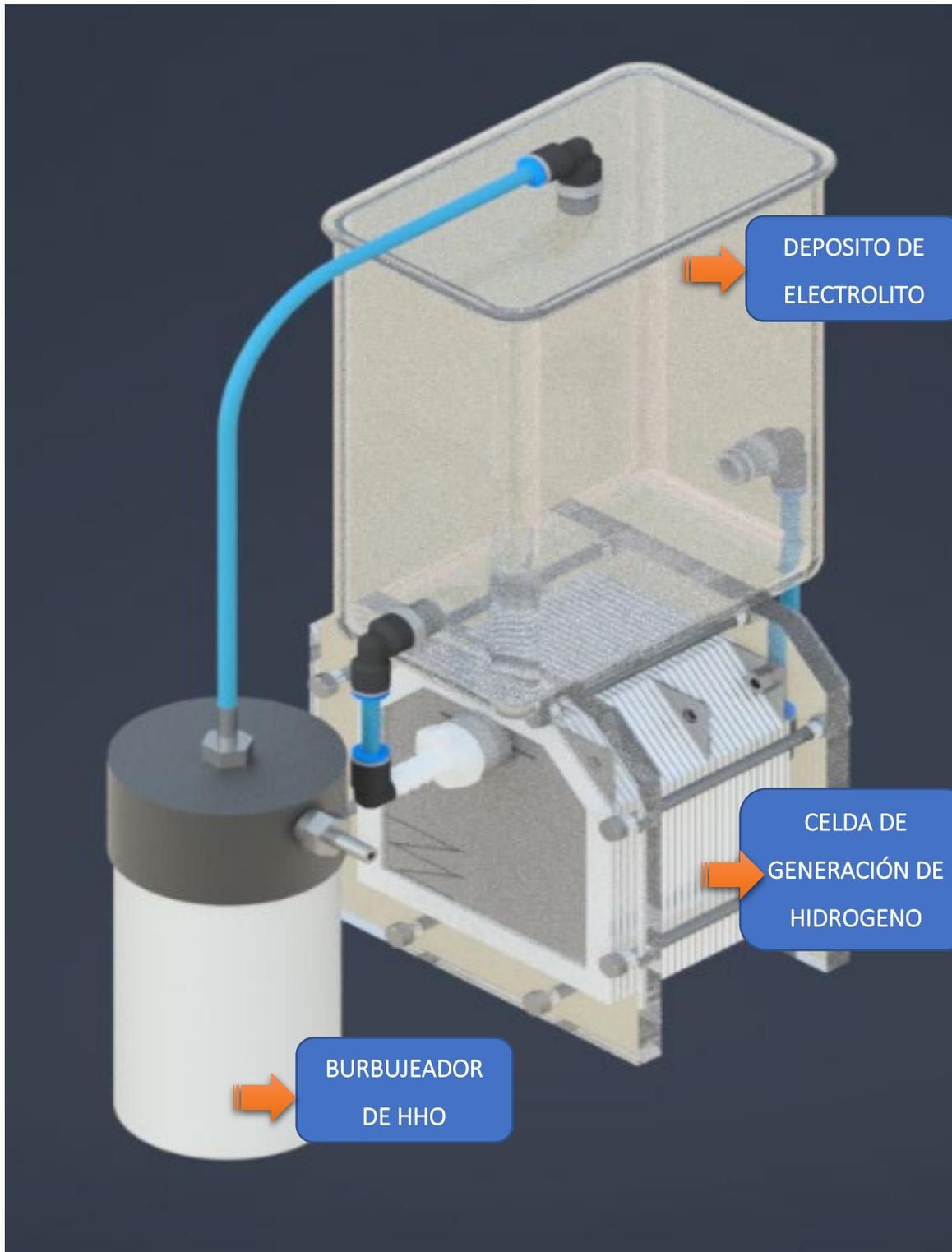
Yunes A Cengel, M. A. (2011). *Termodinamica*. mexico: McGRAM HILL /INTERAMERICANA EDITORES S.A.

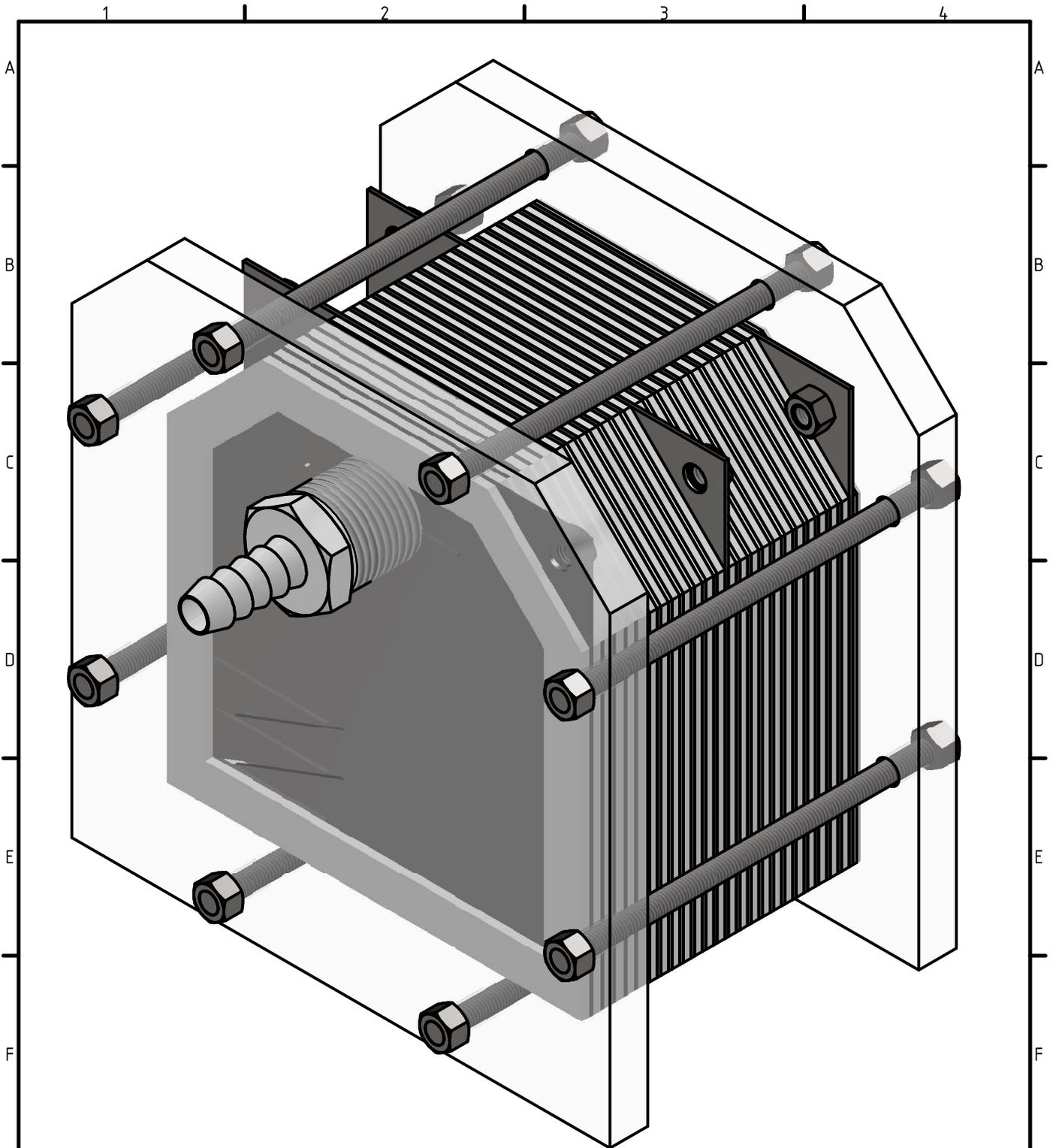
ANEXOS

- ANEXO A (IMÁGENES EXPERIMENTALES).



- ANEXO B (PLANOS DE CONSTRUCCIÓN).





Todas las acotaciones están según la norma establecida en mm.



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELECTROMECÁNICA
2023**

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILINDRICO.

Ensamble de celda de hidrogeno

1

A4

Escala: 1 : 1

| Estado | Cambios | Fecha | Nombre | Fecha | Nombre | |
|--------|------------------|-------|--------|----------|----------|-----------------|
| TTG | Ing. Edgar Tapia | | | Creado | 1/3/2023 | Ing. B. Copa |
| TTG | Ing. Ramiro Arce | | | Revisado | 1/3/2023 | Ing. G. Barriga |
| TTG | Ing. Marco Ruiz | | | Norma | 1/3/2023 | DIN |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

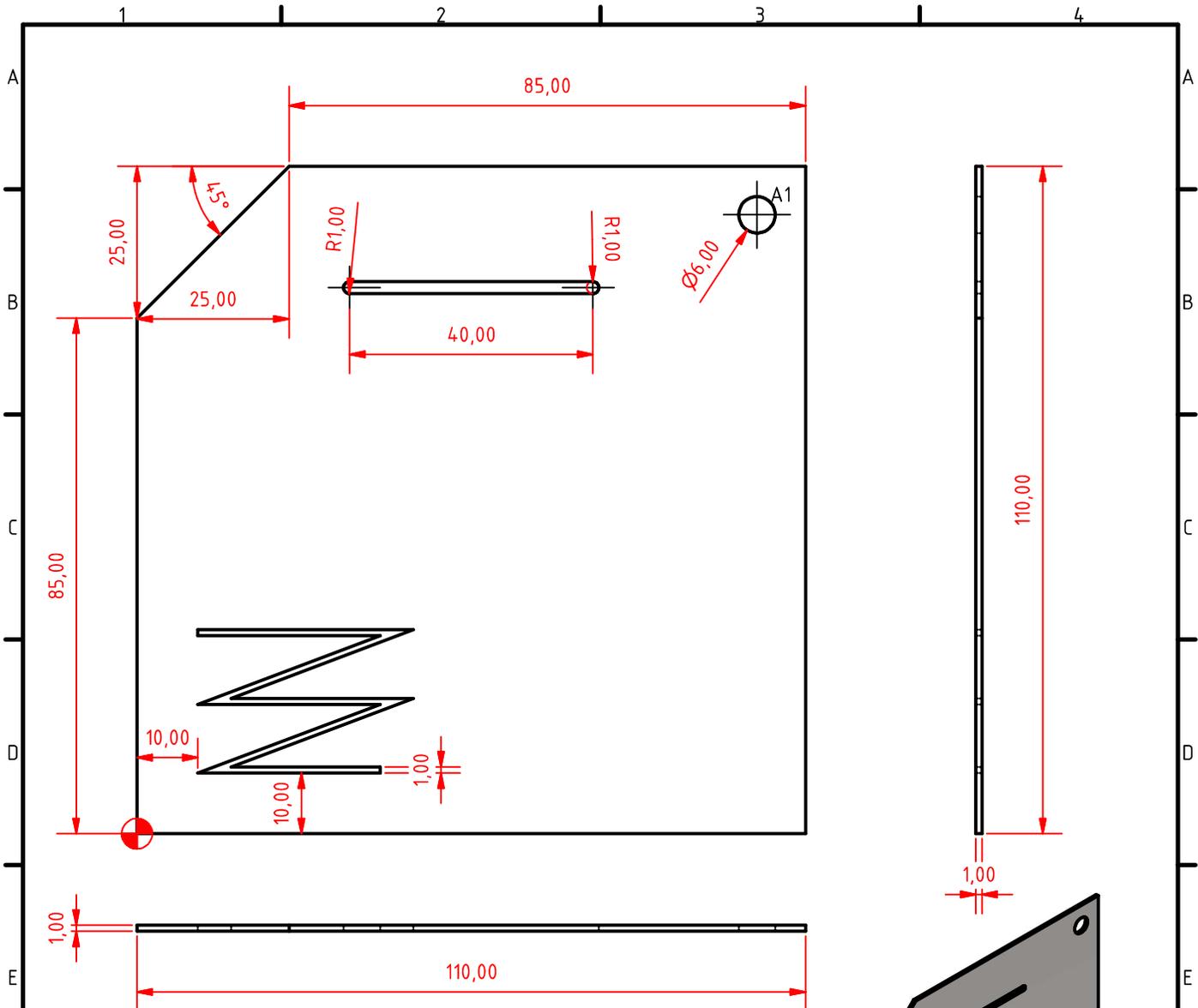
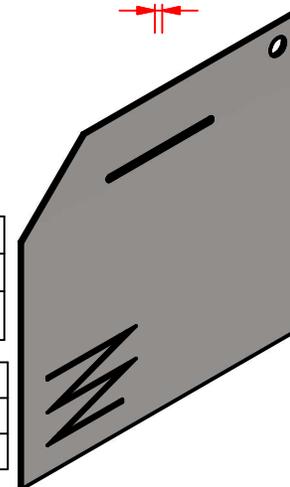


TABLA DE AGUJEROS

| AGUJERO | COTA EN X | COTA EN Y | DESCRIPCIÓN |
|---------|-----------|-----------|-------------------------|
| A1 | 102,00 | 102,00 | Ø6,00 -1,00 Profundidad |

LISTA DE PIEZAS

| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA | MATERIAL |
|----------|-------|----------------|------------------|
| 1 | 3 | Placa negativa | Acero inoxidable |



Vista Isometrica (1 : 2)

Todas las acotaciones están según la norma establecida en mm.



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELECTROMECÁNICA
2023

| | | Fecha | Nombre |
|--------|------------------|-------------------|-----------------|
| TTG | Ing. Edgar Tapia | Creado 1/3/2023 | Ing. B. Copa |
| TTG | Ing. Ramiro Arce | Revisado 1/3/2023 | Ing. G. Barriga |
| TTG | Ing. Marco Ruiz | Norma 1/3/2023 | DIN |
| Estado | | Cambios | Fecha |
| | | | |

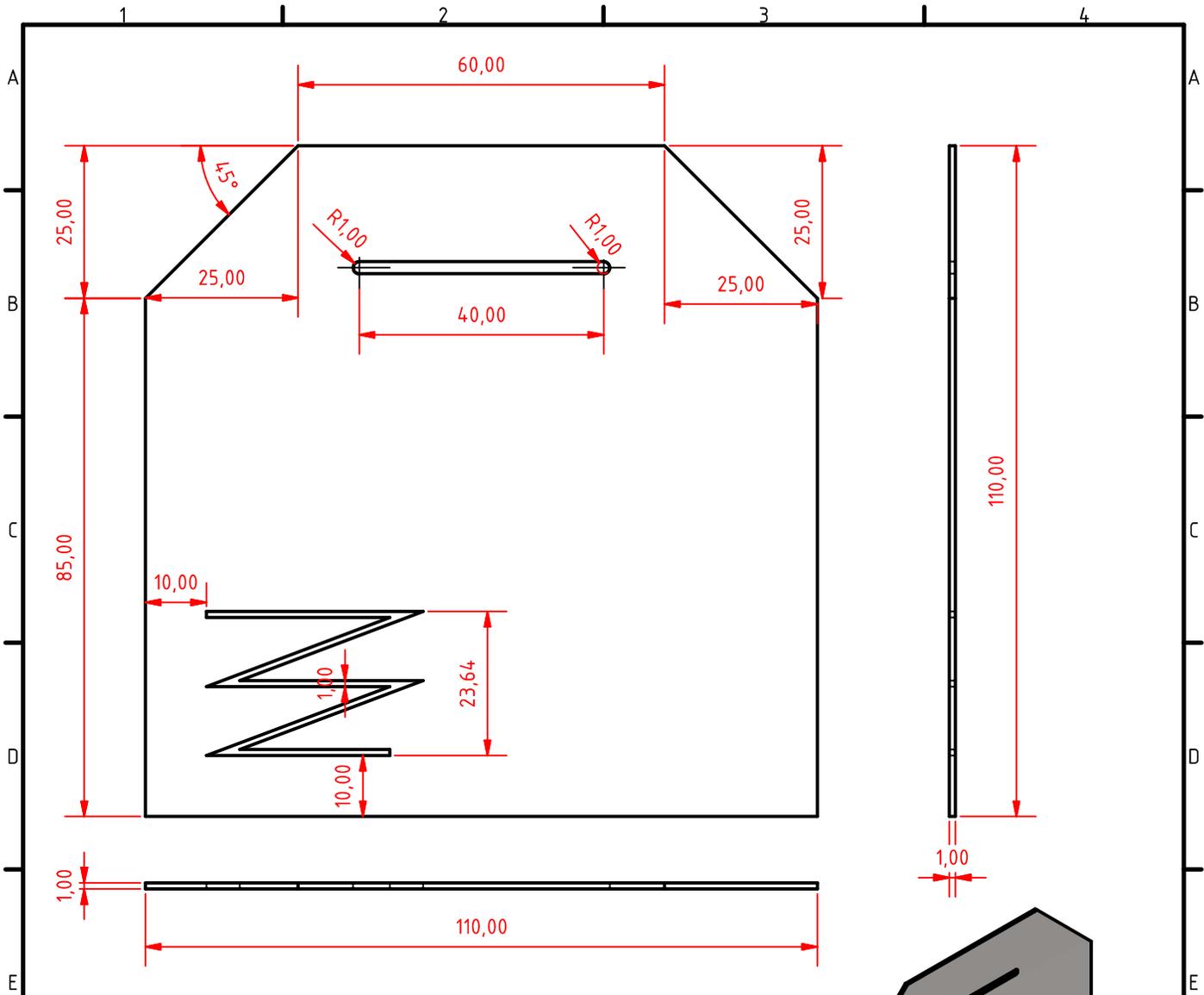
DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILINDRICO.

Placa de conexion negativa

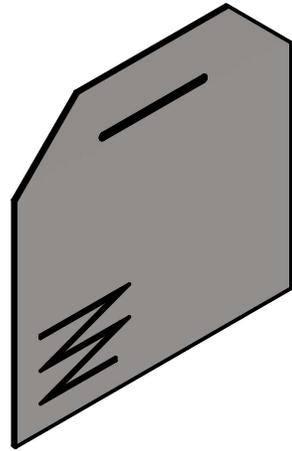
2

A4

Escala: 1 : 1



| LISTA DE PIEZAS | | | |
|-----------------|-------|--------------|------------------|
| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA | MATERIAL |
| 1 | 20 | Placa neutra | Acero inoxidable |



Vista Isometrica (1 : 2)

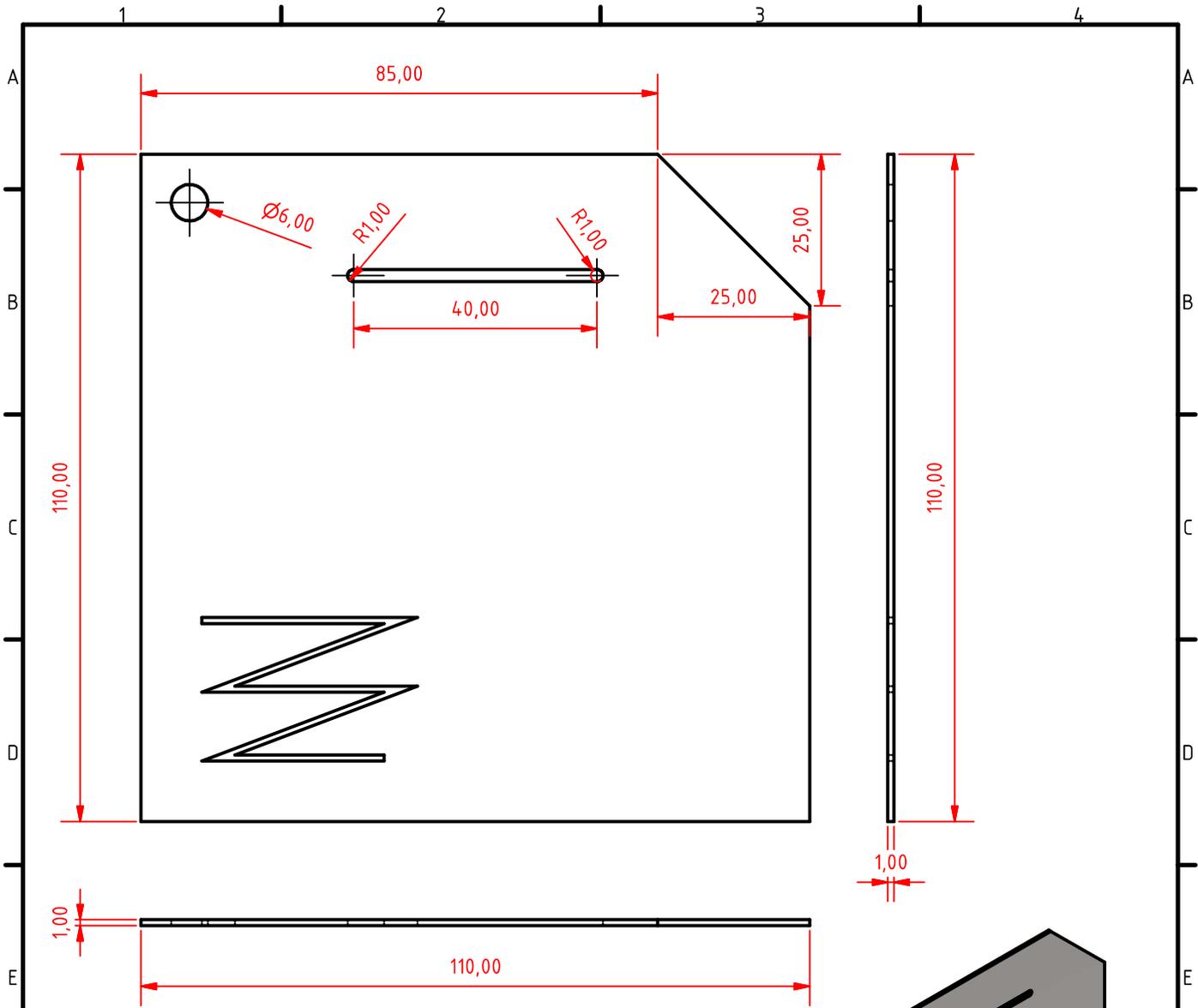
| | | | | | |
|---|------------------|-------|--------|---|-----------------|
| Todas las acotaciones están según la norma establecida en mm. | | | |    | |
| | | | | Fecha | Nombre |
| TTG | Ing. Edgar Tapia | | | Creado 1/3/2023 | Ing. B. Copa |
| TTG | Ing. Ramiro Arce | | | Revisado 1/3/2023 | Ing. G. Barriga |
| TTG | Ing. Marco Ruiz | | | Norma 1/3/2023 | DIN |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Estado | Cambios | Fecha | Nombre | | |

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELECTROMECÁNICA
2023

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILINDRICO.

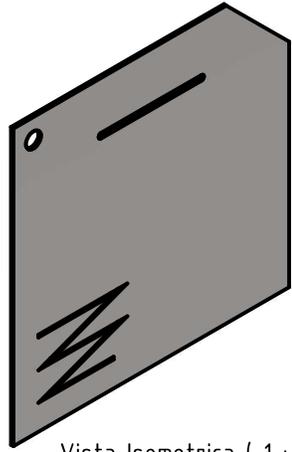
| | |
|---------------------------------|----|
| Placa de conexion Neutra | 3 |
| | A4 |

Escala: 1 : 1



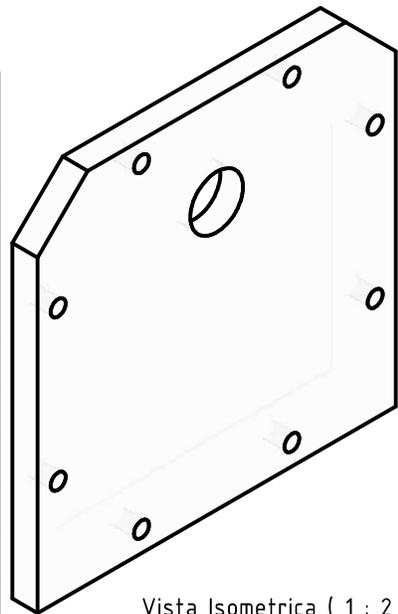
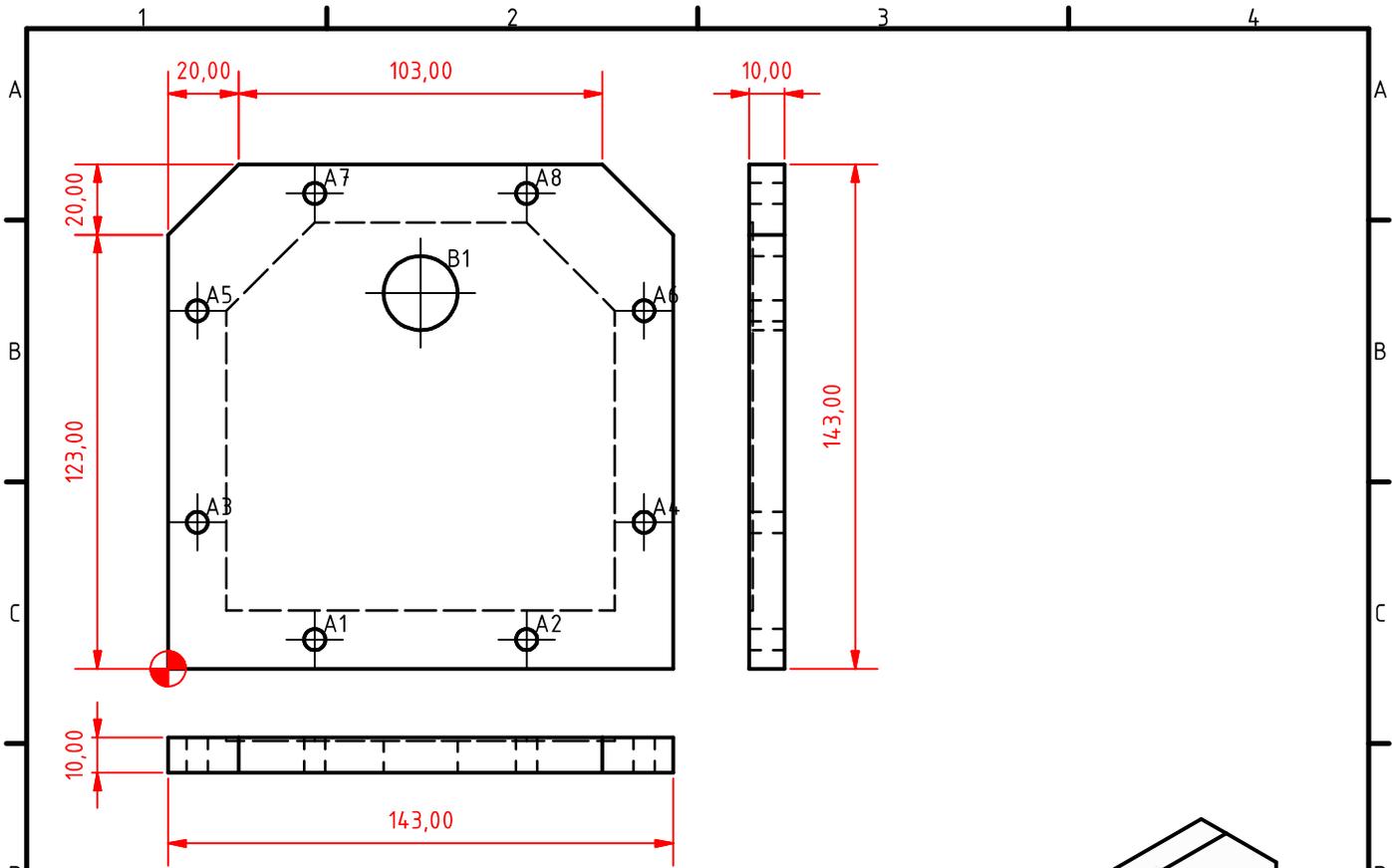
LISTA DE PIEZAS

| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA | MATERIAL |
|----------|-------|----------------|------------------|
| 1 | 2 | Placa positiva | Acero inoxidable |



Vista Isometrica (1 : 2)

| | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|-------|--------|---|----------|---|---|---|--|---|--|----------|--|
| <p>Todas las acotaciones están según la norma establecida en mm.</p> | | | |  | |  | |  | | <p>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTROMECÁNICA 2023</p> | | | |
| | | | | <p>Fecha</p> | | <p>Nombre</p> | | | | | | | |
| TTG | Ing. Edgar Tapia | | | Creado | 1/3/2023 | Ing. B. Copa | <p>DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILINDRICO.</p> | | | | | | |
| TTG | Ing. Ramiro Arce | | | Revisado | 1/3/2023 | Ing. G. Barriga | | | | | | | |
| TTG | Ing. Marco Ruiz | | | Norma | 1/3/2023 | DIN | | | | | | | |
| | | | | | | | | <p>Placa de conexion positiva</p> | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | <p>4</p> | |
| | | | | | | | | <p>A4</p> | | | | | |
| Estado | Cambios | Fecha | Nombre | | | | | <p>Escala: 1 : 1</p> | | | | | |



Vista Isometrica (1 : 2)

TABLA DE AGUJEROS

| AGUJERO | COTA EN X | COTA EN Y | DESCRIPCIÓN |
|---------|-----------|-----------|---------------------------|
| A1 | 41,50 | 8,25 | Ø6,00 -10,00 Profundidad |
| A2 | 101,50 | 8,25 | Ø6,00 -10,00 Profundidad |
| A3 | 8,25 | 41,50 | Ø6,00 -10,00 Profundidad |
| A4 | 134,75 | 41,50 | Ø6,00 -10,00 Profundidad |
| A5 | 8,25 | 101,50 | Ø6,00 -10,00 Profundidad |
| A6 | 134,75 | 101,50 | Ø6,00 -10,00 Profundidad |
| A7 | 41,50 | 134,75 | Ø6,00 -10,00 Profundidad |
| A8 | 101,50 | 134,75 | Ø6,00 -10,00 Profundidad |
| B1 | 71,50 | 106,50 | Ø20,95 -10,00 Profundidad |

LISTA DE PIEZAS

| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA | MATERIAL |
|----------|-------|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | 1 | Placa de conexión de salida | ACRILICO TRANSPARENTE |

Todas las acotaciones están según la norma establecida en mm.



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELECTROMECÁNICA
2023

| Estado | Cambios | Fecha | Nombre |
|--------|------------------|----------|----------|
| TTG | Ing. Edgar Tapia | Creado | 1/3/2023 |
| TTG | Ing. Ramiro Arce | Revisado | 1/3/2023 |
| TTG | Ing. Marco Ruiz | Norma | 1/3/2023 |

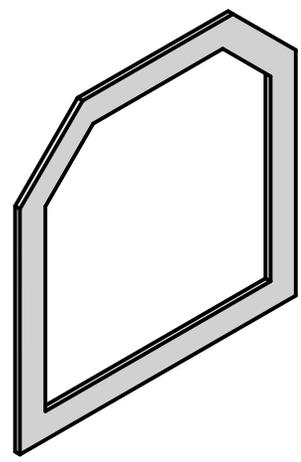
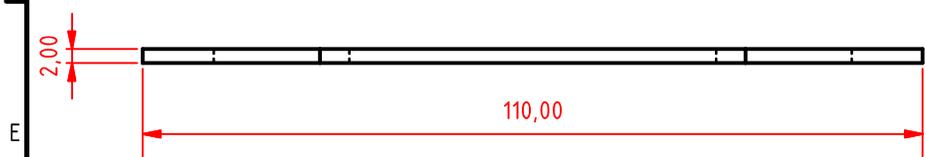
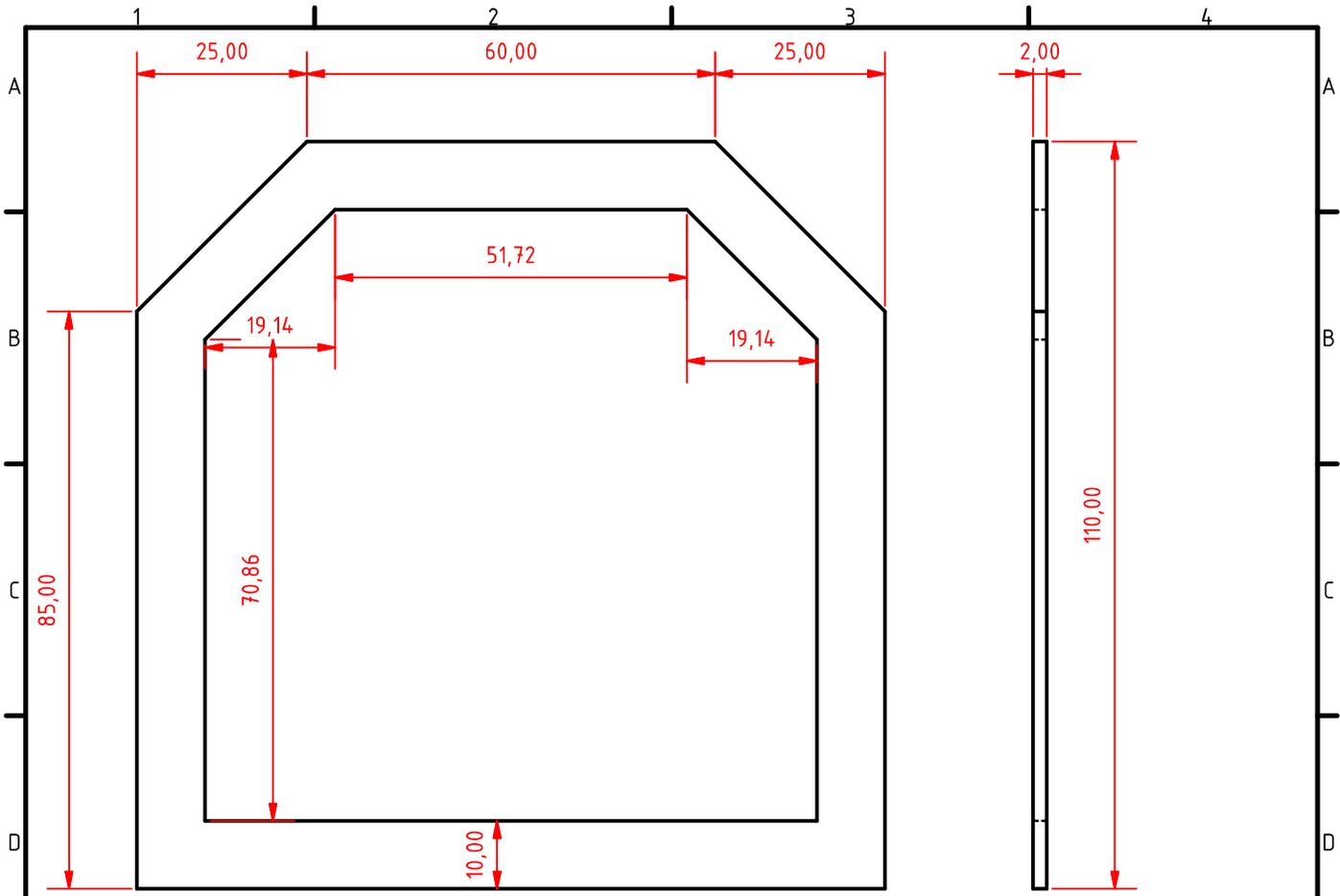
| Fecha | Nombre |
|----------|-----------------|
| 1/3/2023 | Ing. B. Copa |
| 1/3/2023 | Ing. G. Barriga |
| 1/3/2023 | DIN |

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILINDRICO.

Placa delantera

5
A4

Escala: 1 : 2



Vista Isometrica (1 : 2)

LISTA DE PIEZAS

| ELEMENTO | CTDAD | Nº DE PIEZA | MATERIAL |
|----------|-------|------------------------------|------------------|
| 1 | 26 | Placa Aislante de separacion | Caucho, Silicona |

| | | | | | | | |
|--|------------------|-------|--------|---|---|---|-----------------|
| <p>Todas las acotaciones están según la norma establecida en mm.</p> | | | |  |  |  | |
| | | | | Fecha | Nombre | <p>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTROMECÁNICA 2023</p> <p>DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILINDRICO.</p> | |
| TTG | Ing. Edgar Tapia | | | Creado | 1/3/2023 | | Ing. B. Copa |
| TTG | Ing. Ramiro Arce | | | Revisado | 1/3/2023 | | Ing. G. Barriga |
| TTG | Ing. Marco Ruiz | | | Norma | 1/3/2023 | | DIN |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Estado | Cambios | Fecha | Nombre | | | | |

| | | |
|------------------------------|--|----|
| <p>Placa de aislamiento.</p> | | 7 |
| | | A4 |
| <p>Escala: 1 : 1</p> | | |



**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-2409/2024
La Paz, 01 de agosto de 2024**

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **25 de julio de 2024**, por **BONIFACIO GERARDO COPA QUISPE** con **C.I. N° 8334570 LP**, con número de trámite **DA 1380/2024**, señala la pretensión de inscripción de la Tesis de Post-grado titulada: **"DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL USO DE UNA CELDA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILÍNDRICO"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO:

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los"*



ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO:

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, la Tesis de Post-grado titulada: "**DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL USO DE UNA CELDA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILÍNDRICO**" a favor del autor y titular: **BONIFACIO GERARDO COPA QUISPE** con **C.I. N° 8334570 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/Im

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI
CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO
DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS
LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



Ubcqn8Lu6Ln85I

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB www.senapi.gob.bo/verificacion Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Telfs.: 2115700
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 5B,
Zona 16 de Julio.
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
casi esq. Urriagoitia,
Zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calles Ciro Trigo y Avaroa
Edif. Santa Clara, N° 243.
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre, N° 5837,
entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 14.
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 17.
Telf.: 72018160



AUTOR

Ing. Bonifacio Gerardo Copa Quispe

Correo Electrónico:

Ing.bonifaciocopa@gmail.com

Celular:

68027046