

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

**“Implementación de un sistema de generación de hidrógeno por
electrólisis para evaluar el desempeño de un motor de
combustión interna de ciclo Otto”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN ENERGÍA**

AUTORES:

Bach. Casio Herrera, Dheryum Hebeir
Bach. Huayna Huaman, Jonathan Gilmer

ASESOR:

Mg. Guevara Chinchayán, Robert Fabián
DNI. N° 32788460
Código ORCID: 0000 – 0002 – 3579 - 3771

NUEVO CHIMBOTE - PERÚ

Abril 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando en cuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa de acuerdo a la denominación siguiente (Resolución N°337-2024-CU-R-UNS); titulado:

“Implementación de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis para evaluar el desempeño de un motor de combustión interna de ciclo Otto”

AUTORES : Bach. Casio Herrera Dheryum Hebeir.
Bach. Huayna Huaman Jonathan Gilmer.

Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán

ASESOR

DNI: 32788460

CÓD. ORCID: 0000-0002-3579-3771.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



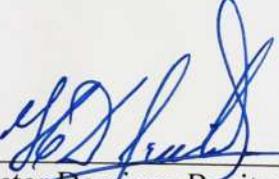
CARTA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

El presente jurado evaluador da la conformidad del presente informe, desarrollado en el cumplimiento del objetivo propuesto y presentado conforme al reglamento general para obtener el grado académico de Bachiller y Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (Resolución N° 337-2024-CU-R-UNS); titulado:

“Implementación de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis para evaluar el desempeño de un motor de combustión interna de ciclo Otto”

AUTORES : Bach. Casio Herrera Dheryum Hebeir.
Bach. Huayna Huaman Jonathan Gilmer.

Revisado y evaluado por el siguiente Jurado Evaluador:


Ms. Héctor Domingo Benites Villegas
PRESIDENTE
DNI: 17821639
CÓD. ORCID: 0000-0002-8809-6371


M Sc. Roberto Carlos Chucunya Huallpachoque
SECRETARIO
DNI: 40149444
CÓD. ORCID: 0000-0001-9175-5545


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayan
INTEGRANTE
DNI: 32788460
CÓD. ORCID: 0000-0002-3579-3771.



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

El día jueves 25 del mes de abril del año dos mil veinticuatro, siendo las 12:00 m. en el Aula E-3 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, en cumplimiento al Art. 68 del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado con Resolución N°337-2024-CU-R-UNS de fecha 12.04.24, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 039-2024-UNS-CFI** de fecha 10.01.24, integrado por los siguientes docentes:

- Ms. Héctor Domingo Benites Villegas : Presidente
- M.Sc. Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque : Secretario
- Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán : Integrante

Y según la **Resolución Decanal N°185-2024-UNS-FI** de fecha 17.04.24 se **DECLARA EXPEDITO** al bachiller para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis, titulada: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CICLO OTTO"**, perteneciente a los bachilleres: **CASIO HERRERA DHERYUM HEBEIR** con código de matrícula N°0201711050 y **HUAYNA HUAMÁN JHONATAN GILMER** con código de matrícula N°0201311022, teniendo como asesor al docente **Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán**, según Resolución Decanal N° 371-2023-UNS-FI de fecha 13.06.23.

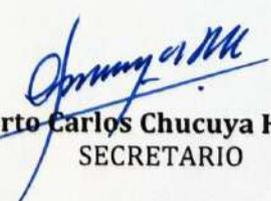
Terminada la sustentación de los bachilleres, respondieron las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
CASIO HERRERA DHERYUM HEBEIR	17	BUENO

Siendo las 12:40 p.m. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Ms. Héctor Domingo Benites Villegas
PRESIDENTE


M.Sc. Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque
SECRETARIO


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán
INTEGRANTE



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

El día jueves 25 del mes de abril del año dos mil veinticuatro, siendo las 12:00 m. en el Aula E-3 de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, en cumplimiento al Art. 68 del Reglamento General de Grados y Títulos, aprobado con Resolución N°337-2024-CU-R-UNS de fecha 12.04.24, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 039-2024-UNS-CFI** de fecha 10.01.24, integrado por los siguientes docentes:

- Ms. Héctor Domingo Benites Villegas : Presidente
- M.Sc. Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque : Secretario
- Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán : Integrante

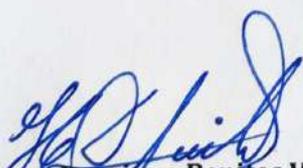
Y según la **Resolución Decanal N°185-2024-UNS-FI** de fecha 17.04.24 se **DECLARA EXPEDITO** al bachiller para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis, titulada: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CICLO OTTO"**, perteneciente a los bachilleres: **CASIO HERRERA DHERYUM HEBEIR** con código de matrícula N°0201711050 y **HUAYNA HUAMAN JONATHAN GILMER** con código de matrícula N°0201311022, teniendo como asesor al docente **Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán**, según Resolución Decanal N° 371-2023-UNS-FI de fecha 13.06.23.

Terminada la sustentación de los bachilleres, respondieron las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

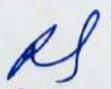
El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 73° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

BACHILLER	PROMEDIO	PONDERACIÓN
HUAYNA HUAMAN JONATHAN GILMER	17	BUENO

Siendo las 12:40 p.m. del mismo día, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.


Ms. Héctor Domingo Benites Villegas
PRESIDENTE


M.Sc. Roberto Carlos Chucuya Huallpachoque
SECRETARIO


Mg. Robert Fabián Guevara Chinchayán
INTEGRANTE



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: DHERYUM CASIO
Título del ejercicio: TESIS
Título de la entrega: TESIS CASIO-HUAYNA
Nombre del archivo: Casio_,_Huayna_-_Tesis_pasar_TURNITIN.pdf
Tamaño del archivo: 3.61M
Total páginas: 69
Total de palabras: 17,071
Total de caracteres: 87,049
Fecha de entrega: 11-jun.-2024 05:25a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega... 2397131360

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



"Implementación de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis para evaluar el desempeño de un motor de combustión interna de ciclo Otto"

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN ENERGÍA

AUTORES:

Bach. Casio Herrera Dheryum Hebeir
Bach. Huayna Huamán Jonathan Gilmer

ASESOR:

Mg. Guevara Chinchayán Robert Fabián
DNI. N° 32788460
Código ORCID: 0000 - 0002 - 3579 - 3771

NUEVO CHIMBOTE - PERÚ

2024

TESIS CASIO-HUAYNA

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%	23%	3%	%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	6%
2	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	4%
3	1library.co Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	repositorio.uan.edu.co Fuente de Internet	1%
6	repositorio.untels.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	1%
9	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia. Principalmente, a mi madre la Sra. Carmen Rosa Herrera Mata, que me proporcionó su apoyo incondicional para poder afrontar los retos y adversidades para lograr mis objetivos, por estar conmigo en los momentos buenos y malos y sus sabios consejos que hicieron de mí el profesional que soy ahora.

D.H.C.H.

Le dedico este trabajo a mis padres, al sr. Vladimir huayna Pantoja y a mi Sra. Madre Maritza Huaman Sánchez, que me proporcionaron su apoyo incondicional y siempre confiaron en para superar los retos y adversidades que atravesé en mi etapa de estudiante y hacerme el profesional que soy ahora, dedico también este trabajo a mi novia a la Srta. Daniela Mendieta Guevara que siempre estuvo conmigo y mostro su apoyo incondicional y nunca dejo que me rindiera.

J.G.H.H

RECONOCIMIENTO

A dios por brindarnos la vida y la oportunidad de cumplir nuestros objetivos profesionales
Agradecer a mi asesor Mg. Robert Guevara Chinchayán por su apoyo y asesoría en la culminación del presente trabajo de investigación – Tesis

Hacia mis docentes de la Universidad Nacional del Santa y de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, que gracias a sus valiosas enseñanzas permitieron darnos una formación profesional de calidad.

Para mis estimados compañeros de la promoción 2017 con los cuales experimentamos muchas experiencias en los 5 años de estudios,

Atentamente,

D.H.C.H ; J.G.H.H

INDICE GENERAL

INDICE
RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Realidad problemática	10
1.2 Antecedentes	11
1.3 Justificación	16
1.4 Hipótesis	16
1.5 Objetivos.....	16
II. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 El Hidrógeno.....	17
2.2 El hidrógeno como combustible	17
2.3 El hidrogeno como combustible del futuro	18
2.5 Propiedades del Hidrógeno	20
2.6 Obtención de Hidrógeno.....	21
2.7 Métodos de obtención de hidrogeno.....	22
2.8 Almacenamiento de Hidrógeno	27
2.9 Hidrógeno en motores de combustión	29
2.10 Motores de combustión interna alternativo	30
2.11 Criterios de clasificación de los motores alternativos	32
2.12 Motor de combustión interna de ciclo Otto.....	34
2.13 Etapas de combustión del ciclo Otto.....	35
2.14 Emisiones contaminantes de un motor Otto	37
2.15 Generador eléctrico trifásico	38
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
3.1 Materiales y servicios	40
3.2 Método.....	43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1 Diseño y construcción del generador de hidrógeno	49
4.2 Evaluación del motor de combustión interna.	52
4.3 Evaluación del motor de combustión interna con consumo parcial de hidrogeno.	56
4.2 Indicadores de generación y emisiones de CO2	59
4.4 Discusión de resultados.....	60
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
5.1 Conclusiones.	62
5.2 Recomendaciones.....	63
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
VII. ANEXOS	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Propiedades termodinámicas del hidrógeno vs metano	18
Tabla 2	Propiedades del hidrógeno	20
Tabla 3	Principales tecnologías de producción de hidrógeno	23
Tabla 4	Comparación de dos cilindros que almacenan hidrógeno a alta presión.....	29
Tabla 5	Cuadro comparativo para los procesos de los ciclos Otto y Diesel	37
Tabla 6	Materiales para la construcción del generador de hidrógeno	40
Tabla 7	Equipos para la construcción.....	41
Tabla 8	Reactivos para la hidrólisis	42
Tabla 9	Ensayos del generador de hidrógeno	50
Tabla 10	Volumen de hidrógeno, oxígeno y volumen total de producción de hidrógeno	51
Tabla 11	Desempeño eléctrico del Grupo Electrónico Power Force de 7.5 kW	53
Tabla 12	Desempeño del Grupo electrónico Power Force de 7.5 kW operando con Gasohol 90 octanos	54
Tabla 13	Indicadores de desempeño de generación del Grupo electrónico Power Force de 6 kW operando con Gasohol 90 octanos	55
Tabla 14	Valores de medición de flujo de hidrógeno	57
Tabla 15	Desempeño del grupo electrónico con suministro parcial de hidrógeno.....	58
Tabla 16	Indicadores de desempeño del grupo electrónico con suministro parcial de hidrógeno	59
Tabla 17	Benchmarking de indicadores de desempeño del grupo electrónico con suministro parcial de hidrógeno.....	60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Metodologías de producción de hidrógeno en el mundo.....	19
Figura 2 Clasificación de tecnologías de producción a partir de fuentes renovables.....	21
Figura 3. Partes de la electrólisis del agua.....	24
Figura 4 Célula semiconductora fotoeléctrica	25
Figura 5 Representación esquemática de un vaso criogénico, diseño y componentes.....	27
Figura 6 Tanques de hidrógeno a presión.....	28
Figura 7 Esquema de un motor de combustión interna alternativo.....	31
Figura 8 Componentes principales de un generador eléctrico	32
Figura 9 Esquema de combustión en los MEP	34
Figura 10 Etapa de admisión del ciclo Otto	35
Figura 11 Etapa de compresión del ciclo Otto.....	35
Figura 12 Etapa de combustión del ciclo Otto.....	36
Figura 13 Etapa de escape del ciclo Otto	36
Figura 14 Prototipo de generación de hidrógeno de celda seca.....	49
Figura 15 Producción de hidrógeno	50
Figura 16 Proceso de producción de hidrógeno.....	51
Figura 17 Desempeño del grupo electrógeno operando con gasohol de 90 octanos.....	55
Figura 18 Heat Rate del grupo electrógeno operando con gasohol de 90 octanos.....	56
Figura 19 Proporción porcentual de potencia suministrada	58

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación consiste en la implementación de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis para evaluar el desempeño de un motor de combustión interna de ciclo Otto, para el desarrollo del prototipo de generación de hidrógeno, se realizarán cálculos para estimar la cantidad de producción de hidrógeno que será inyectado al motor de combustión interna de ciclo Otto, el motor será un generador eléctrico de 7.5 kW. Finalmente se realizará la evaluación del desempeño del motor teniendo en cuenta los indicadores de funcionamiento: Potencia, eficiencia y factor de emisiones contaminantes.

El trabajo de investigación es del tipo experimental, de naturaleza cuantitativa.

En los resultados se obtiene, la correcta construcción y funcionamiento del generador de hidrógeno. El grupo electrógeno inicialmente tiene un consumo de 0.902 galones/h suministrando 30,66 kW, representando una eficiencia de 19,8 %. El desempeño del grupo electrógeno operando con carga parcial de hidrógeno para una admisión solo de 0,000089 kg/s de hidrógeno a una carga de 30,66 kW, representa el 38,7 % de la potencia térmica suministrada en el motor de combustión interna lo cual solo requiere 0.446 galones de gasohol para su funcionamiento. Además, los indicadores de reducción de dióxido de carbono se reducen desde 3,826 hasta 2,115 kg de CO₂ para 500 horas de operación. Estos resultados nos indican que el suministro de gas de hidrógeno para su funcionamiento con Gasohol de 90 Octanos, proporciona una mejora en el rendimiento del motor y reduce las emisiones de CO₂ al medio ambiente.

Palabras Clave: Hidrogeno, Gasohol, Combustion

ABSTRACT

The following research work consists of the implementation of a hydrogen generation system by electrolysis to evaluate the performance of an Otto cycle internal combustion engine, for the development of the hydrogen generation prototype, calculations will be made to estimate the amount of production of hydrogen that will be injected into the Otto cycle internal combustion engine, the engine will be a 7.5 kW electric generator. Finally, the evaluation of the engine performance will be carried out taking into account the operating indicators: Power, efficiency and polluting emissions factor.

The research work is experimental, quantitative in nature.

The results show the correct construction and operation of the hydrogen generator. The generating set initially has a consumption of 0.902 gallons/h, supplying 30.66 kW, representing an efficiency of 19.8%. The performance of the generator set operating with partial hydrogen load for an admission of only 0.000089 kg/s of hydrogen at a load of 30.66 kW, represents 38.7% of the thermal power supplied in the internal combustion engine which only requires 0.446 gallons of gasohol for its operation. In addition, the carbon dioxide reduction indicators are reduced from 3,826 to 2,115 kg of CO₂ for 500 hours of operation. These results indicate that the supply of hydrogen gas for operation with 90 Octane Gasohol provides an improvement in engine performance and reduces CO₂ emissions to the environment.

Keywords: Hydrogen, Gasohol, Combustión

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad problemática

En el transcurso de los años se a descubierto distintas formas de producción de energía que provienen de variadas fuentes, con el objetivo de satisfacer las necesidades que implican su uso para realizar distintas actividades en el ámbito doméstico e industrial. Una de las principales fuentes de abastecimiento energético actual viene a ser el petróleo y sus derivados, sin embargo, este recurso tiende a agotarse. Los hidrocarburos con el pasar del tiempo se agotarán, para ello tendríamos que estar completamente preparados e inmersos en fuentes de energías renovables. Asimismo, una de las mayores preocupaciones a nivel mundial viene a ser el calentamiento global, creándose políticas y medidas destinadas a mitigar las emisiones de gases contaminantes. Para el 2030, Perú se propone reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40% (MINAM, 2016). Además, el precio de los hidrocarburos se ha disparado significativamente y actualmente es inestable. Con una flota de vehículos muy grande, que incluye, motos, coches, furgonetas, camiones, etc. La industria del transporte de Perú es una de las mayores consumidoras de combustibles fósiles del país, en su mayoría estos vehículos utilizan motores de ignición y autoignición los cuáles son los principales responsables de expulsar CO₂ y CO a la atmósfera, actualmente el 58% de los vehículos utiliza Diésel, 33% GLP, 5% GNV y 4% Gasolina, por lo tanto, la reducción de estos combustibles contribuiría al cuidado del medio ambiente (PROSEMER, 2016). Las emisiones de estos compuestos se pueden reducir utilizando biocombustibles que dan lugar a emisiones netas más bajas, hibridando con motores eléctricos, utilizando vehículos eléctricos o de hidrógeno, que cuentan con la capacidad para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar el abastecimiento energético propio y reducir la contaminación atmosférica cuando se utiliza como combustible. El hidrógeno tiene potencial para convertirse en uno de los pilares fundamentales del futuro modelo energético, se llega a usar implementando un sistema electrolítico de generación de hidrógeno, debido a que no se encuentra de forma natural en el planeta, para implementar como aditivo en cualquier motor. El principio de funcionamiento consiste en inyectar el hidrógeno producido hacia el sistema de alimentación del motor de ignición mejorando el torque y potencia y a la vez mejorar la eficiencia de los motores.

De acuerdo a lo detallado en la realidad problemática presente en la investigación se formula el siguiente problema:

¿Cuáles son los efectos de la implementación de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis en el desempeño de un motor de combustión interna de ciclo Otto?

1.2 Antecedentes

Moreno, A. & Vera, D. (2023) en su tesis *Implementación de una celda electrolítica de agua para un prototipo de motor ciclo otto, a fin de disminuir las emisiones de monóxido de carbono (CO)*, tiene como objetivo la implementación de una celda electrolítica seca en un motor a gasolina de 163cc para reflejar la reducción del monóxido de carbono que se produce en la combustión de un motor encendido por ignición de 4 tiempos, se recogieron las magnitudes de temperatura, dióxido de carbono, monóxido de carbono y revoluciones del motor (rpm) para evaluar la eficacia de la pila de hidrógeno gracias a los sensores instalados. Tras crearse mediante un software especializado, el estudio se envió a una pantalla LCD (pantalla de cristal líquido). En última instancia, es factible confirmar que el monóxido de carbono disminuye en 1,6 y 0,67 ppm, respectivamente, en el rango de 1200 y 2000 rpm, basándose en las lecturas de los sensores digitales implementados, lo que demuestra la reducción de gases contaminantes para el medio ambiente.

Traducción realizada con la versión gratuita del traductor DeepL.com Díaz, A. Gonzáles, J. & Gonzáles, O. (2018), en el artículo titulado, *Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna*, Este estudio pretende investigar los efectos de la adición de gas HHO a la mezcla de combustión de un motor Honda 110 cc de 4 tiempos de combustión interna. Para ello, se instala una célula seca de HHO y se conecta a una batería de 12 V, lo que permite llevar a cabo el proceso de electrólisis y obtener el gas. A continuación, el gas se conduce mediante otra manguera hasta el filtro de aire de la motocicleta, que se alimenta en la cámara de combustión, entrando con el aire necesario para el proceso. Los resultados indican que la adición del gas HHO redujo ligeramente el consumo de combustible en varias pruebas realizadas a 5000, 6000 y 7000 RPM, en cuanto a la eficiencia del motor, se observaron valores de 0,87 y 0,88 con y sin la adición de gas HHO. Tras observarse mejoras significativas en la prueba de gases -una reducción del monóxido de carbono (CO) del 13% al 18%, un aumento del dióxido de carbono (CO₂) del 5% al 9% y una disminución del 20% de las emisiones de oxígeno (O₂), se determina finalmente que la inyección de este gas en los

motores de combustión interna tiene un impacto positivo tanto para el medio ambiente como para el sistema.

Tito, J. (2022) en su tesis *Implementación de un generador de Hidrógeno de un sistema Dual Fuel Hidrógeno / Gasolina de un vehículo Corsa Wind*, tiene como objetivo principal demostrar el consumo de combustible, la singularidad de la combustión y disminución de los gases contaminantes que se producen en el vehículo de prueba tomando en cuenta al hidrógeno y la gasolina en conjunto para ser adicionados al motor . Utilizando celdas generadoras para dividir el agua en sus átomos constituyentes, se produce hidrógeno mediante electrólisis. Los datos se obtuvieron mediante pruebas de consumo de combustible y análisis de gases mecánicos. Tras estas pruebas, se observó una reducción del 23,5% del consumo de combustible, una disminución del 51% de los hidrocarburos no procedentes de la combustión, una reducción de los óxidos de nitrógeno del 46%, una reducción del monóxido de carbono del 2%, un aumento de la potencia de 0,8 CV y un par motor de 3,04 Nm. La aplicación de esta nueva tecnología mejoró el comportamiento del motor al tiempo que aumentó su eficiencia y disminuyó notablemente el consumo específico del vehículo, lo que reduce las emisiones de gases peligrosos a la atmósfera.

Tamayo, E. Rosales, C. Guzmán, A. & Pazmiño, P. (2016), en el artículo de investigación titulado, *Efecto del uso de hidrógeno en la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna*, esta investigación se ha desarrollado utilizando un motor de combustión interna monocilíndrico accionado por generador y banco dinamométrico. El objetivo del estudio es analizar los parámetros de funcionamiento de un motor de combustión interna de ciclo Otto con una combinación de gasolina e hidrógeno como combustible. Además, para el cálculo utilizando mezclas de gasolina-aire y gasolina-hidrógeno, se propusieron dos ecuaciones estequiométricas. En el proceso de generación de hidrógeno se utilizaron 12 V y un volumen constante. Por lo tanto, la potencia real sin hidrógeno es de 3,78 CV y con hidrógeno de 4,66 CV, lo que supone un aumento del 16,7%. Además, el consumo teórico de combustible es de 401,61 g/kWh y con la adición de hidrógeno es inferior a 373,52 g/kWh. La potencia teórica sin hidrógeno fue de 3,91 CV y con hidrógeno de 5,41 CV, con un aumento del 27,1%.

Diéguez, P. & Gandía, L. (2014) en su tesis titulada *Adaptación de un motor de combustión interna alternativo de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno como combustible. Aplicaciones energética y de automoción*, se lleva a cabo la transformación de motores a gasolina para su operación, utilizando el hidrógeno como combustible, Su objetivo es demostrar en la práctica si es factible convertir los motores de gasolina para que funcionen con hidrógeno. Para realizar las pruebas de seguridad, hubo que montar celdas de ensayo con instalaciones de suministro de gas y sensores para la detección de hidrógeno en el aire del interior de la celda. La rampa de inyección de gasolina del colector de admisión se cambió por una rampa de inyección de hidrógeno, y se instaló un intercambiador de aceite-agua junto al filtro de aceite para reducir el sobrecalentamiento. A la inversa, el potencial de funcionamiento dual gasolina/hidrógeno presenta un sustituto intrigante, permitiendo el uso de gasolina en rutas interurbanas para acomodar la autonomía reducida con hidrógeno y de hidrógeno en rutas urbanas para minimizar las emisiones contaminantes. En última instancia, puede demostrarse que es práctico, asequible y fácil convertir los motores que funcionan con gasolina para que funcionen con hidrógeno.

López, J. (2018) en su tesis *Alimentación de un motor monocilíndrico con hidrógeno obtenido a través de la electrólisis del agua* tiene como objetivo principal diseñar y construir una celda electrolítica seca capaz de producir gas de hidrógeno que será suministrado a un motor de ciclo Otto como combustible, el prototipo está hecho de acero inoxidable, un material que resiste bien la corrosión. Funciona con 12 V, que proporciona una batería de automóvil. Hace circular un electrolito y utiliza una solución de hidróxido de sodio para aumentar la corriente que pasa por el agua, lo que provoca la electrólisis. Consecuentemente, se almacenó gas hidrógeno para introducirlo en el sistema de alimentación de un motor Honda monocilíndrico de cuatro tiempos.. Ya instalado el sistema se realizaron dos pruebas de análisis de gases de escape, el primero con el motor trabajando con gasolina, y la siguiente prueba empleando el hidrógeno como combustible con la intención de evidenciar el comportamiento de los gases de escape, a fin de evaluar las incidencias producidas por el uso del hidrógeno. Finalmente en base a la revisión de los resultados del trabajo se determinó que el hidrógeno como combustible en el motor ocasiona una contundente reducción de emisiones de gases contaminantes a la vez puede mencionarse que es un motor con emisiones cero emisiones contaminantes.

Paredes, D. (2016) en su tesis titulada *Diseño, construcción y pruebas de una celda de hidrógeno para el vehículo Honda Civic 1977, como alternativa de energía renovable* tiene como objetivo principal diseñar y fabricar una pila de hidrógeno para un motor con el fin de maximizar la combustión. Las piezas y técnicas electrolíticas disponibles en el vehículo de pruebas y en el mercado local para reducir las emisiones de gases contaminantes y aumentar el rendimiento del motor sirvieron de base para el desarrollo del sistema de generación de hidrógeno. El electrolito utilizado es hidróxido de potasio en solución acuosa. Para construir el sistema se utilizaron materiales como placas acrílicas y electrolíticas, que se taladraron y cortaron para facilitar el montaje. Los resultados obtenidos a través de los ensayos evidenciaron medidas de torque y potencia, 11.4 kgm y 96.8 CV sin las celdas de hidrógeno y 12 kgm y 101.4 CV con las celdas de hidrógeno a 6100 RPM, reflejando un aumento de potencia de 4.6 CV y de torque en 0.6 kgm, en conclusión la alternativa de implementar una celda de hidrógeno conlleva a la reducción considerable de gases contaminantes y una mejora positiva en el rendimiento del motor para los vehículos.

Vermeersch, J. (2018) en su investigación, *Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua*, el objetivo principal de este proyecto es construir una celda que demuestre la producción económica y técnicamente viable de hidrógeno y oxígeno teniendo en cuenta diversos factores como el volumen de hidrógeno y oxígeno producido, la corriente que pasa por la celda y la diferencia de potencial en los terminales de la celda. El armazón está compuesto por un metacrilato de 10 mm de espesor. La estructura está dividida en dos secciones principales: una en la parte inferior que tiene dos salidas de agua y otra en la parte superior que tiene separadores para los electrodos, una entrada de agua y un sistema de separación de gases., soporta la estructura, proporciona un sistema eléctrico para alimentar la celda y utiliza estanques llenos de agua para almacenar los gases. En la primera prueba, se inyectaron 3,2 A y 3,15 V en los terminales de la célula, obteniéndose un rendimiento eléctrico del 43,8% y un rendimiento térmico del 51,9%; en la segunda prueba, se inyectaron 8,7 A y 4,2 V, obteniéndose un rendimiento eléctrico del 33,4% y un rendimiento térmico del 39,6%. Estos fueron los resultados de las dos pruebas realizadas.

Cabanillas, J. (2022), en su trabajo de investigación, *Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca al motor de un automóvil a gasolina para mejorar la performance energética ambiental*, con la intención de aumentar la eficiencia y reducir

las emisiones contaminantes mediante el uso de hidrógeno en un vehículo de gasolina; sin embargo, no se pretende que sustituya completamente a la gasolina, sino que se utiliza como aditivo de enriquecimiento. El generador de hidrógeno de 6 células se montó con éxito y tiene un caudal de 0,6 L/min, lo que demuestra que la adición de hidrógeno reduce las emisiones contaminantes. Los hidrocarburos disminuyen del siguiente modo: a 1025 rpm, pasan de 353 ppm a 197 ppm, una disminución del 44,19%; a 2010 rpm, pasan de 212 ppm a 152 ppm, una disminución del 28,3%; y a 4025 rpm, pasan de 144 ppm a 105 ppm, una disminución del 27,08%. La adición de hidrógeno a cada marcha del motor reduce considerablemente la cantidad de monóxido de carbono liberado a la atmósfera. Se determinó que la instalación del generador había dado lugar a una notable mejora de la eficiencia del combustible, ya que se utilizaba un 23,44% menos de combustible para un trayecto de 10 kilómetros cuando se añadía hidrógeno a la gasolina. Esto representa un ahorro económico a medio plazo.

Núñez, J. (2021), en su proyecto de tesis titulado, *Uso del hidrógeno en el motor D13B2 de ciclo Otto como complemento del combustible*, Con el fin de avanzar en esta investigación, se diseñó y construyó un generador de hidrógeno de 500 cm³ de tipo pila seca por electrólisis. A continuación, el hidrógeno como aditivo de la gasolina en el motor de ciclo Otto se investigó mediante cálculos termodinámicos. Los resultados mostraron que la eficiencia efectiva del ciclo no variaba en más de un 1% para ambos combustibles. Además, los cálculos para reducir las emisiones contaminantes arrojaron porcentajes de reducción del 35% para los gases CO₂, CO y HC, y del 40% para las PM.

Menaca, R. & Bedoya, I. (2022), en su artículo titulado, *Una revisión del uso de hidrógeno en motores de encendido por compresión (diésel) y un análisis de su posible uso en motores duales en Colombia*, pretende ofrecer una visión general del estado de la técnica en relación con el uso del hidrógeno en los motores de combustión interna (MCI), en particular en los motores de encendido por chispa (MCE), dado su importante papel en la matriz energética del país y su capacidad para reducir los contaminantes atmosféricos (como el CO_x y el hollín). Se realizó un análisis exhaustivo del rendimiento del MCE en modo dual diésel-hidrógeno, y también se revisó el impacto de añadir hidrógeno al MCE. C Se ha llegado a la conclusión de que la combustión de gasóleo e hidrógeno aumenta el rendimiento del motor, lo que se traduce en un enriquecimiento de entre el 30% y el 40%. Además, la combustión de hidrógeno reduce las emisiones de gases contaminantes porque el agua es el subproducto del proceso de combustión.

Además, llama la atención la técnica de recirculación de los gases de escape (EGR), que reduce considerablemente las emisiones de NOx.

1.3 Justificación

Este proyecto de investigación busca crear un prototipo de hidrógeno que pueda ser integrado como aditivo en un motor de combustión interna. Esto es necesario debido a que los combustibles como la gasolina y el petróleo son recursos finitos que tienden a agotarse, además de reducir el consumo de combustible y las emisiones de gases nocivos como el CO₂. La reducción de las emisiones contaminantes de escape no sólo mejora la calidad del aire, sino que también aumentará el rendimiento de funcionamiento de los motores de combustión interna, lo que hace que esta investigación sea socialmente significativa.

1.4 Hipótesis

Mediante un análisis del sistema de generación de hidrógeno por electrólisis se determina que el efecto en un motor de combustión interna de ciclo Otto es la disminución del porcentaje de emisiones contaminantes en un 70 %.

1.5 Objetivos

Objetivo General

Realizar la implementación de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis para evaluar el desempeño de un motor de combustión interna de ciclo Otto.

Objetivo específicos

- Diseño, construcción y evaluación de un prototipo de generación de hidrógeno por electrólisis de celdas secas.
- Efectuar un análisis comparativo de potencia y consumo de combustible antes y después de la implementación del sistema del generador de hidrógeno.
- Evaluar la reducción de gases contaminantes que proporciona el hidrógeno como combustible

II. MARCO TEÓRICO

2.1 El Hidrógeno

En la naturaleza, el hidrógeno no está presente en forma libre, sino como componente de sustancias como el agua, los hidrocarburos, los alcoholes, etc. Por ejemplo, las moléculas de hidrocarburos deben descomponerse con energía para producir hidrógeno, el hidrógeno se considera la fuente de energía del futuro, y su utilización para reducir las emisiones es una opción muy atractiva. El hidrógeno tiene un poder calorífico muy elevado por unidad de masa (poder calorífico inferior 120 MJ/kg), lo que lo convierte en un combustible que puede utilizarse tanto para el parque automotor como para la generación fija de energía (industrial o doméstica). En términos de producción de energía, un kilogramo de hidrógeno equivale a 2,78 kilogramos de gasolina, 2,80 kilogramos de gasóleo, 2,40 kilogramos de metano y 6,09 kilogramos de metanol. Su uso para producir electricidad mediante pilas de combustible es más eficiente energéticamente que su combustión directa en quemadores o en MCI. (Hernán, 2016)

2.2 El hidrógeno como combustible

En 1776, el inglés Henry Cavendish identificó dos gases distintos como componentes del agua, lo que supuso la primera mención del hidrógeno en la historia de la química. Cavendish lo denominó aire inflamable. Más tarde, Antoine Lavoisier le dio el nombre de "hidrógeno", generador del agua. (Uscamayta , 2019)

Como suele ocurrir, el hidrógeno encontró su primer uso en el mundo real antes de finales del siglo XVIII, cuando el ejército francés lo empleó en globos de reconocimiento. Alemania lo utilizó en sus dirigibles para cruzar el océano Atlántico e incluso como combustible para propulsar los llamados Zeppelins más de un siglo después. Tras el accidente del Hindenburg en 1937, se abandonó esta empresa. El hidrógeno se utilizó posteriormente, aunque sin éxito, como combustible para varios tipos de motores de vehículos, incluidos submarinos y trenes, tanto antes como después de la Segunda Guerra Mundial. Que el agua, o más bien sus componentes de hidrógeno y oxígeno, se convertirán algún día en una fuente inagotable de energía, fue una profecía de Julio Verne en su libro "La isla misteriosa". Sin embargo esto ocurrió. (Reyes, Iñiguez , Pupiales, Soria, & Yépez , 2018)

El potencial de uso generalizado del hidrógeno quedó anulado por el auge del petróleo y el carbón en los siglos XX y XIX, respectivamente. La industria química fue la única del mundo que siguió produciendo una cantidad sustancial de hidrógeno, utilizado inicialmente para crear fertilizantes a base de amoníaco, y después como aditivo en la producción de derivados del petróleo y para extraer azufre y otros contaminantes del combustible de los automóviles (gasóleo y gasolina). Otros factores que impulsaron posteriormente el uso generalizado del hidrógeno fueron el inicio de los viajes espaciales, el medio ambiente y su impacto en el clima, y la preocupación por el agotamiento de los combustibles fósiles a finales del siglo XX, sobre todo en la industria automovilística. (Gutierrez, 2005)

Debido a la llamada pila de combustible, que quema hidrógeno y oxígeno para convertir la energía de la combustión en energía eléctrica, las industrias aeroespacial y automovilística están interesadas en el hidrógeno. Aunque el galés William R. Grove ya había desarrollado esta técnica en 1839, la NASA no empezó a trabajar en ella hasta los años 60 con el fin de utilizarla para generar agua y energía para algunas de sus misiones espaciales. En la actualidad, se están probando numerosos prototipos de pilas de combustible de conocidos fabricantes de automóviles y autobuses. (Laguna, 2014)

2.3 El hidrogeno como combustible del futuro

El primer elemento de la tabla periódica es el H₂. Al ser una molécula diatómica (H₂), es el elemento más ligero del universo. Su átomo está formado por un solo protón y un electrón. Es insípido, incoloro, inodoro y se encuentra en forma gaseosa en circunstancias normales. En la Tierra, constituye alrededor del 75% de toda la materia del universo. (Rodriguez, Sandoval, & Santos, 2022)

Tabla 1

Propiedades termodinámicas del hidrógeno vs metano

Propiedades	Hidrógeno	VS	Metano
Densidad	0.08376 kg/m ³	VS	0.657 kg/m ³
Poder calorífico por unidad de medida	119.83 KJ/g	VS	55.53 KJ/g
Poder calorífico por unidad de volumen	10.050 KJ/m ³	VS	32.56 KJ/g

Nota. Tabla tomada de Rodriguez, Sandoval, & Santos (2022)

Dado que el hidrógeno no se encuentra libremente en la naturaleza y debe obtenerse mediante diversos métodos, incluyendo la extracción de metano, la gasificación de biomasa, la producción biológica, los ciclos termoquímicos y la descomposición electrolítica del agua, entre otros, estas propiedades han hecho posible la realización de estudios centrados en la producción y aplicación del hidrógeno.

2.4 Colores del hidrógeno

Se acuerdo a (Reig, 2022), el color del hidrógeno producido depende de la fuente de energía:

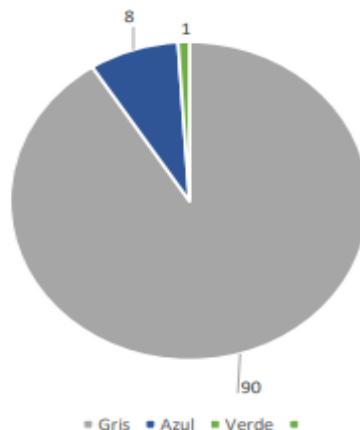
El hidrógeno gris: Es el método más popular por su bajo coste. Se fabrica mediante un proceso químico conocido como gasificación del carbón, reformado al vapor, pirólisis y otros métodos, utilizando carbón u otros combustibles fósiles. generando importantes emisiones contaminantes y de CO₂.

El hidrógeno azul: Se fabrica mediante el reformado al vapor del gas natural, que utiliza alcoholes e hidrocarburos para extraer hidrógeno del CO₂, al tiempo que aprovecha el metano del gas para fabricar hidrógeno con una menor huella de carbono.

El hidrógeno verde: Es más costoso de crear porque procede de fuentes de energía renovables como la eólica, la hidroeléctrica, la mareomotriz, la geotérmica y la solar; aun así, en mayo de 2022, su precio oscilará entre los 3 y los 10 euros por kilogramo. Debido a sus muchas ventajas en la reducción de CO₂, también puede obtenerse mediante procesos biológicos menos desarrollados, pero más populares como la termólisis, la fermentación, los biorreactores de algas y los procesos fotobiológicos.

Figura 1

Metodologías de producción de hidrógeno en el mundo



Nota. Imagen obtenida de Reig (2022)

2.5 Propiedades del Hidrógeno

a) Propiedades Químicas del hidrógeno

En circunstancias normales, el hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido y no venenoso. Es el ingrediente más básico que conoce el ser humano. En un átomo de hidrógeno sólo hay un protón y un electrón. Dado que el hidrógeno está compuesto principalmente por átomos de hidrógeno, a menudo se presenta como una molécula diatómica, razón por la cual el hidrógeno se representa como H₂. Con el 90% del peso del universo constituido por él, es el elemento más abundante en el cosmos y el tercero en la Tierra. Pero como interactúa rápidamente con otros elementos para generar compuestos más estables, rara vez se encuentra en estado puro en la Tierra. Cuando se combina con el oxígeno, crea H₂O, o agua. Puede combinarse con el carbono para generar diversas sustancias químicas, como el carbón, el petróleo y el metano (CH₄). (Bolaños, 2005)

Tabla 2

Propiedades del hidrógeno

Propiedades del hidrógeno	
Z	1
Peso atómico	1.0079
Densidad (gr/ml)	0.07
Volumen molar (mls)	28.6
Punto de fusión (K)	13.957 K a 54 mm
Punto de ebullición (K)	20.39 K
Calor vaporizado (KJ.mol ⁻¹ .mol ⁻¹)	0.903
Potencial ionizante (eV)	13.54
Energía de hidratación H ⁺ (Kcal. Mol ⁻¹ .mol ⁻¹)	269
Energía de enlace H - H (Kcal.mol ⁻¹ .mol ⁻¹)	104.2
Radio covalente (en H ₂)	0.3707
Electroafinidad (eV)	0.715
Radio iónico H ⁻ (en LiH)	1.36
Electronegatividad (Pauling)	2.1
Abundancia % (litosfera e hidrosfera)	1 % (15.4 átomos)

Nota. Tabla tomada de Rivera (2016)

b) Propiedades Físicas del Hidrógeno

Su peso atómico es de 100974 amu, y su estado de oxidación es +1. A excepción del berilio y el magnesio, forma enlaces iónicos con metales alcalinos y alcalinotérreos, enlaces covalentes con no metales y enlaces metálicos con elementos de transición. Salvo en estado gaseoso, el hidrógeno, representado por el símbolo H⁺, siempre está unido a otro elemento. Reacciona con la mayoría de los elementos de la tabla periódica. (Tito, 2022)

c) Inflamabilidad

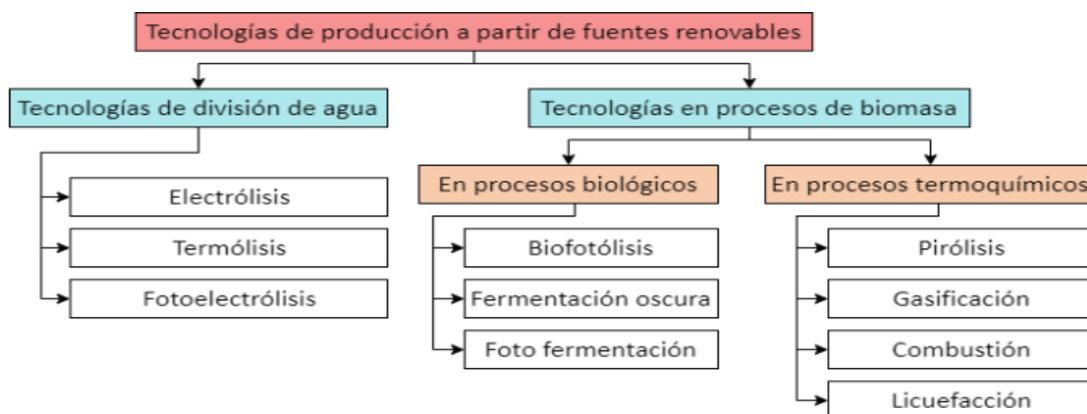
Entre el 4,1% y el 74,8% de la concentración volumétrica de hidrógeno en el aire se sitúan los límites de inflamabilidad del hidrógeno teniendo en cuenta la presión atmosférica a nivel del mar (101,3 kPa) y la temperatura ambiente; cuando el hidrógeno se combina con oxígeno, el rango cambia al 94%. (Chavez, 2018)

2.6 Obtención de Hidrógeno

Hoy en día, las materias primas fósiles representan alrededor del 96% de la producción mundial de hidrógeno industrial, principalmente mediante el reformado al vapor de combustibles fósiles. En todo el mundo se generan, almacenan, transportan y utilizan anualmente 550.000 millones de metros cúbicos; más del 48% proceden del reformado del gas natural, 18% de carbón y 30% de petróleo. A temperaturas entre 1000 y 1300 K, el proceso de reformado produce una combinación de hidrógeno, monóxido de carbono y muy poco dióxido de carbono, presiones de 3-25 bares y la presencia de un catalizador. (Hernán, 2016)

Figura 2

Clasificación de tecnologías de producción a partir de fuentes renovables



Nota. Imagen obtenida de Nikolaidis & Poullikkas (2017)

2.7 Métodos de obtención de hidrógeno

Existen múltiples métodos para obtener hidrógeno, variando en su eficiencia. La clave para que el hidrógeno sea considerado como una fuente de energía limpia radica en asegurar que todo el ciclo de este gas esté libre de emisiones de carbono. Para lograrlo, resulta esencial obtenerlo a través de fuentes de energía que generan bajas o ninguna emisión de gases de efecto invernadero y otros residuos contaminantes. La aplicación industrial y el desarrollo de la producción de hidrógeno en el mundo demuestran la variedad de métodos disponibles para obtenerlo y su aplicabilidad en diferentes contextos. La selección de estos métodos depende de la naturaleza de los procesos involucrados y de las necesidades de la demanda. Los procesos basados en el uso del agua suelen generar hidrógeno de mayor pureza, mientras que los procesos que involucran hidrocarburos tienden a presentar trazas de monóxido de carbono debido a las reacciones que se llevan a cabo en sus reactores. En el desarrollo de la producción de hidrógeno, un elemento crítico a considerar es la eficiencia energética (% EE) por cada molécula implicada en el proceso. Esto resulta fundamental, ya que permite un análisis exhaustivo de las características de los procesos y ayuda a determinar el método más apropiado para implementar en un proyecto específico. A pesar de la diversidad de métodos, como se muestra en la tabla 4, los procesos que utilizan hidrocarburos exhiben las eficiencias más altas. Estos procesos generan subproductos no deseados y no son ideales para la producción de hidrógeno limpio. Dentro de los métodos que emplean agua se encuentran la electrólisis y la termólisis, los cuales carecen de subproductos basados en carbono y se presentan como alternativas importantes para la producción sostenible de hidrógeno. En esta investigación, los autores se centraron específicamente en la electrólisis, por lo que a continuación se ofrece una descripción más detallada. (Rodríguez, Sandoval, & Santos, 2022).

Tabla 3

Principales tecnologías de producción de hidrógeno

Método producción de hidrógeno	Materia prima	Eficiencia energética
Reformado de vapor	Hidrocarburos	70 - 85
Oxidación parcial	Hidrocarburos	60 - 75
Reformado autotérmico	Hidrocarburos	60 - 75
Reformado de plasma	Hidrocarburos	9 - 85
Gasificación de biomasa	Biomasa	35 - 50
Reformado de fase acuosa	Carbohidratos	35 - 55
Electrólisis	H ₂ O	50 - 70
Termólisis	H ₂ O	50 - 70
Fotólisis	H ₂ O	0.5

Nota. Tabla tomada de Torres, Vivanco, & García (2020)

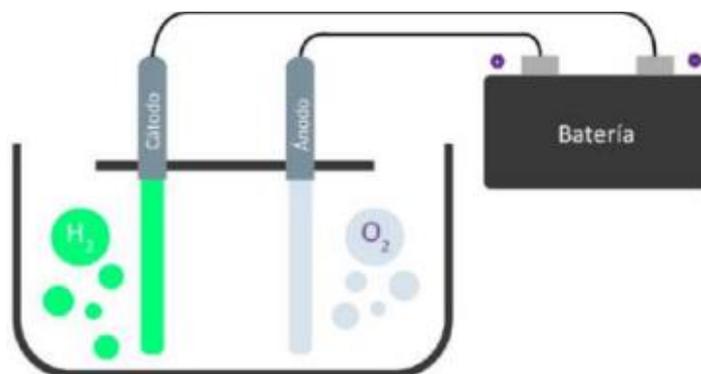
2.7.1 Electrólisis

Por tanto, tenemos que la electrólisis se conceptualiza como el método más popular para crear hidrógeno verde y el más eficiente para descomponer el agua es la electrólisis. El método consiste en sumergir dos electrodos con conexiones de corriente continua (CC) en un electrolito de agua, en el que el electrodo positivo sirve de ánodo y el negativo de cátodo. El ánodo atrae los iones negativos, dando lugar a la formación de oxígeno, mientras que el cátodo atrae los iones positivos, dando lugar a la formación de hidrógeno. Los procedimientos para producir hidrógeno por electrólisis se representan en la Figura 2 y se detallarán más adelante. En primer lugar, se aplica al agua un pretratamiento de desionización para producir un fluido compuesto principalmente por hidrógeno. Para los módulos de electrólisis o electrolizador, que requieren corriente continua (CC) y son alimentados con corriente alterna (CA) por el sistema eléctrico, respectivamente,

disponiendo de un convertidor CA/CC. Es vital señalar que, si las fuentes fueran baterías o paneles solares, no sería necesario un convertidor. Por último, se separan el oxígeno y el hidrógeno, y ambos gases se almacenan. (Rondán, 2016)

Figura 3.

Partes de la electrólisis del agua



Nota. Imagen obtenida de Rondán (2016)

➤ **Tipos de celdas electrolizadoras**

Existen dos tipos de celdas que operan bajo el mismo principio: la celda electrolizadora húmeda, conocida como sumergible, y la celda electrolizadora seca o no sumergible. La celda húmeda, o sumergible, se compone de un recipiente lleno de un electrolito donde los electrodos están sumergidos total o parcialmente. Para fabricar estos electrodos se utilizan con frecuencia tornillos, bobinas de alambre, placas de hierro inoxidable y otros materiales. Los electrodos absorben energía, lo que provoca el hidrógeno, que asciende a través del electrolito y se expulsa por un puerto ubicado en la parte superior. Aunque este tipo de electrolizador suele tener un rendimiento inferior, tiene varias aplicaciones, ofrece algunas ventajas sobre las celdas secas debido a su facilidad de construcción y menor número de componentes. Por otro lado, la celda seca o no sumergible consiste en un dispositivo donde las propias celdas actúan como contenedor, albergando la solución electrolítica en su interior. Esta solución contiene los electrodos necesarios para el proceso de electrólisis. En comparación con la celda húmeda, la celda seca es más compacta y liviana, ya que no requiere un contenedor adicional para el electrolito. Además, se considera menos riesgosa en comparación con la celda húmeda, ya que esta última puede representar un riesgo mayor debido a la posible dispersión de un fluido dañino y la generación de calor. (Rodríguez, Da Silva, & Urbina, 2022)

2.7.2 Pirólisis

La pirólisis es la descomposición rápida por calor de materia orgánica sin oxígeno para producir combustibles líquidos. Los productos químicos orgánicos que se procesan con este método se descomponen en gases, compuestos de oxígeno que pueden condensarse y un subproducto carbonoso conocido como coque. Estos subproductos de la pirólisis pueden utilizarse de diversas maneras. Para aumentar la cantidad de productos gaseosos producidos durante la reacción de pirólisis, en particular el gas de síntesis, que luego puede prepararse para la reacción de desplazamiento de gas de agua (WGS) y un proceso de purificación para producir más hidrógeno, es importante controlar las condiciones de reacción. El bajo valor calorífico de la mezcla gaseosa producida por este proceso, junto con la considerable fracción de biomasa que se desperdicia debido a la carbonización. (Hernán, 2016)

2.7.3 Gasificación de la biomasa

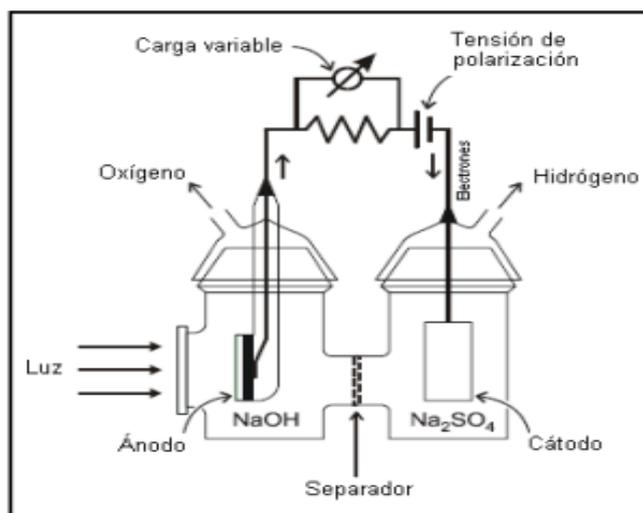
La biomasa se calienta a temperaturas que oscilan entre 700 y 1.200 grados Celsius mediante un proceso de combustión incompleta. El monóxido de carbono, el hidrógeno y el metano constituyen la mayor parte del gas combustible producido. Las temperaturas y presiones del proceso determinarán la cantidad de hidrógeno en el gas final, que puede suponer hasta el 20% de toda la combinación. (Campos, 2013)

2.7.4 Foelectrólisis

En el proceso de electrólisis conocido como fotoelectrólisis, la energía eléctrica necesaria para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno se obtiene exclusivamente a partir de la energía solar. El agua es transparente a las longitudes de onda necesarias, por lo que no puede absorber directamente la energía solar. Una serie de celdas, cada una con dos fotoelectrodos semiconductores sumergidos en un electrolito acuoso y divididos por una membrana que permite la mezcla de gases, pero impide la transferencia de iones, es la técnica más común. El ánodo está formado por un exceso de electrones y el cátodo por un material semiconductor con exceso de protones. Cuando el ánodo se expone a la radiación solar, los electrones captan la energía luminosa y la transfieren al cátodo a través de un circuito externo. Así, se produce un par "electrón-hueco". La reacción resultante entre el hueco positivo y el agua produce iones positivos de hidrógeno y oxígeno gaseoso. El gas hidrógeno se produce cuando los iones de hidrógeno se fusionan con los electrones en el cátodo tras atravesar la membrana. (Brijaldo, Castillo, & Pérez, 2021)

Figura 4

Célula semiconductor fotoeléctrica



Nota. Imagen obtenida de (Ortiz, 2010)

2.7.5 Termólisis

El proceso de desintegración de la molécula de agua mediante energía térmica, normalmente procedente de la radiación solar, se conoce como termólisis o descomposición termoquímica del agua. Puede clasificarse en dos categorías: termólisis directa y termólisis indirecta, en función del número de procesos implicados. A continuación, se ofrece una descripción detallada de cada una de ellas.

a) Termólisis directa

En la termólisis directa, el agua se calienta a una temperatura a la que parte de ella empieza a descomponerse en oxígeno e hidrógeno gaseosos. Aunque parezca relativamente fácil de describir, este método es realmente difícil de ejecutar. En primer lugar, se necesita una temperatura mínima de 2500 K para alcanzar tasas de disociación satisfactorias, ya que la temperatura necesaria para que comience la reacción de descomposición del agua es muy elevada. (Subramani & Nejat, 2015)

b) Termólisis indirecta

La termólisis indirecta, que utiliza ciclos termoquímicos -una serie de varias reacciones químicas-, es un sustituto de la termólisis directa. El ciclo requiere temperaturas máximas más bajas que la termólisis directa: las temperaturas mínimas suelen ser inferiores a 1100 K, mientras que las máximas oscilan entre 1100 y 2300 K. Cada reacción es una fase del ciclo termoquímico, y las temperaturas a las que se produce cada fase varían. Aunque siguen siendo elevadas, estas temperaturas son alcanzables gracias a fuentes de energía renovables como la solar. Las torres solares se utilizan para concentrar la luz solar en una

pequeña zona conocida como receptor, ya que se requieren tecnologías de concentración de la radiación capaces de alcanzar temperaturas de varios cientos de grados centígrados. (Caravantes & Carbajal, 2022)

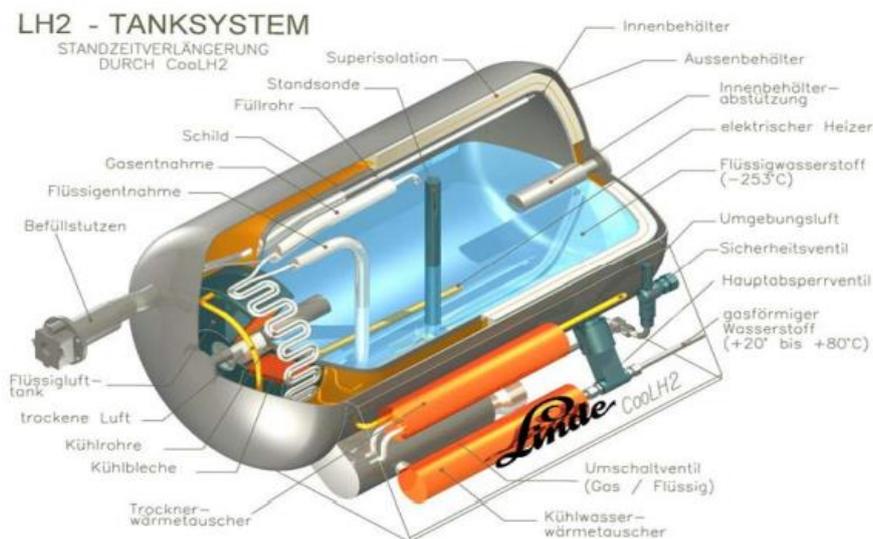
2.8 Almacenamiento de Hidrógeno

a) Almacenamiento de hidrógeno líquido criogénico

El hidrógeno líquido es un medio de almacenamiento deseable porque tiene una densidad energética significativamente mayor que el hidrógeno en forma gaseosa. Los principales inconvenientes de este sistema de almacenamiento de hidrógeno son la energía necesaria para licuar el gas y la estricta regulación de la estabilidad de la temperatura del depósito, necesaria para evitar cualquier posibilidad de sobrepresión. También necesita recipientes criogénicos. Los recipientes metálicos con paredes dobles y aislamiento se utilizan como tanques criogénicos para contener hidrógeno líquido. Hay que tener en cuenta los efectos de la radiación térmica, la convección y la conducción térmica para reducir, las pérdidas térmicas. (Cancino, 2021)

Figura 5

Representación esquemática de un vaso criogénico, diseño y componentes



Nota. Imagen obtenida de Linde (2023)

b) Almacenamiento de hidrógeno gaseoso comprimido

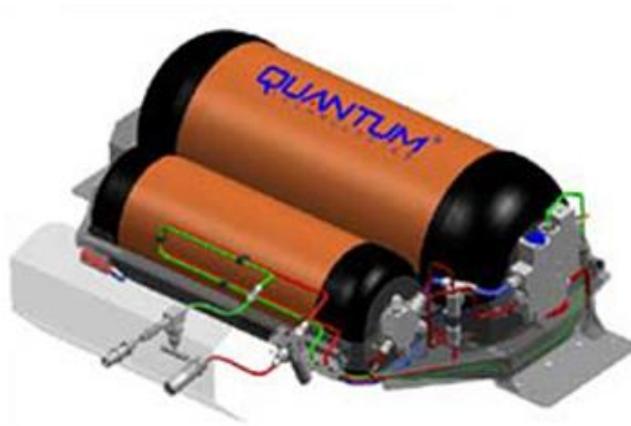
Uno de los sistemas de almacenamiento más sencillos, populares y eficaces es éste. Para garantizar su durabilidad, el hidrógeno a alta presión se almacena en estanques de paredes gruesas (a menudo cilíndricas) construidos con materiales de alta resistencia. El diseño del estanque de almacenamiento, aún no está optimizado porque los estanques son en realidad

más grandes de lo necesario, hay una utilización ineficiente de los materiales y no se ha estimado correctamente la vida útil del recipiente a presión. Los recipientes de almacenamiento de hidrógeno y gas comprimido pueden clasificarse en cuatro tipos, según el Proyecto Europeo Integrado del Hidrógeno (EIHP), encargado de crear normas reglamentarias internacionales para las pruebas de hidrógeno, la certificación de componentes y los sistemas de infraestructura para el repostaje de hidrógeno.

- Tipo I: Cilindro totalmente metálico
- Tipo II: Filamento continuo impregnado de resina envuelto alrededor de un anillo de camisa metálica con carga.
- Tipo III: Filamento continuo envuelto alrededor de una camisa y un anillo metálicos no sometidos a carga axial
- Tipo IV: Filamento de forro no metálico continuo impregnado de resina. (Cancino, 2021)

Figura 6

Tanques de hidrógeno a presión



Nota. Imagen obtenida de (González, 2021)

Tabla 4

Comparación de dos cilindros que almacenan hidrógeno a alta presión

	Tanque de 2L de acero a 200 bares	Tanque de 147 L de acero a 300 bares
Masa del cilindro vacío	3 kg	100 kg
Masa del hidrógeno almacenado	0.036 kg	3.1 kg
Eficiencia de almacenamiento (% de masa de H ₂)	1.20%	3.10%
Energía específica	0.47 k Wh kg - 1	1.2 kWh kg - 1
Volumen del tanque	2.2 L (0.0022 m ³)	147 L (0.0014.3)
Masa de hidrógeno por litro	0.016 kg L - 1	0.014 kg L - 1

Nota. Tabla tomada de (Urroz, 2020)

En la Tabla 2 se comparan dos tecnologías de almacenamiento de hidrógeno a presión. La primera es un cilindro típico de acero aleado de 200 bares. La segunda consiste en aumentar la cantidad de almacenamiento de hidrógeno para aplicaciones como los autobuses. La camisa de aluminio de 6 mm utilizada en la construcción de estos depósitos está rodeada por un compuesto de resina epoxi y fibra de aramida. Esta sustancia es muy dúctil. Aunque 300 bares es la presión máxima que se emplea, 1200 bares es la presión de rotura. El planteamiento para el almacenamiento a gran escala es mucho más eficaz. Sin embargo, esto es un poco engañoso. A pesar de su tamaño, se necesitan varios de estos depósitos para alimentar un motor. Trece de estos depósitos se instalaron en el techo de un autobús utilizado en un intento de hacer funcionar su motor de combustión interna con hidrógeno. La masa total de los depósitos, más la estructura que los sujetaba al techo, ascendía a 2.550 kg, es decir, 196 kg cada depósito. Esto reduce la eficiencia de almacenamiento del sistema al 1,6%, lo que indica que el hidrógeno representa el 1,6% del peso total del sistema. Como resultado, la eficiencia del sistema es comparable a la de la botella de acero. Sólo añadiría unos 2,15 kg a la masa del sistema y reduciría la eficacia de almacenamiento al 0,7% para el sistema de botella de acero de 2 litros. (Urroz, 2020)

2.9 Hidrógeno en motores de combustión

Cuando se quema hidrógeno en motores alternativos surgen algunos problemas relacionados con las emisiones. Es cierto que el único producto de la combustión del hidrógeno es el agua, pero sólo si el comburente es oxígeno puro. Las sustancias químicas

derivadas del nitrógeno (NOx) saldrán a la superficie como resultado de la utilización del oxígeno del aire. Aunque este problema es bien conocido en los motores de combustión alternativa, la mayor temperatura adiabática de combustión del hidrógeno en comparación con los combustibles convencionales lo agrava al favorecer la creación de NOx. (Linares & Moratilla, 2007)

Las siguientes propiedades del hidrógeno indican cómo se comporta en los motores alternativos:

- Amplias limitaciones de inflamabilidad que permiten una buena combustión en casi cualquier relación aire/combustible.
- Deben utilizarse motores de encendido por chispa en lugar de motores diésel debido a la elevada temperatura de autoignición.
- Tanto las ventajas (especialmente ventajosas en los sistemas de inyección a alta presión) como los inconvenientes (como los problemas de detonación en los sistemas de inyección a baja presión) están asociados a la velocidad rápida de la llama.

En función de la formación de la mezcla, puede distinguirse la combustión de hidrógeno en motores alternativos:

Formación externa de la mezcla: Se realiza a presión ambiente, fuera del cilindro. En comparación con un motor de gasolina, puede perderse hasta un 40% de potencia. Esto se debe al impacto que crea la baja presión que hace que el aire sea desplazado por la elevada cantidad de hidrógeno. Un motor volumétrico pierde potencia cuando cambia su concentración de volumen.

Formación interna de la mezcla: Sólo existen versiones experimentales de este tipo de mezcla, y debe trabajarse con hidrógeno líquido manteniendo unas condiciones criogénicas para los inyectores. A unos 100 bares de presión, esto se lleva a cabo en el interior del cilindro. Otra opción es preparar la mezcla a una presión moderada antes de que el cilindro alcance los 10 bares durante la fase de compresión. Este método permite alcanzar valores de potencia equiparables a los de los motores de gasolina. (Doyle, 1996)

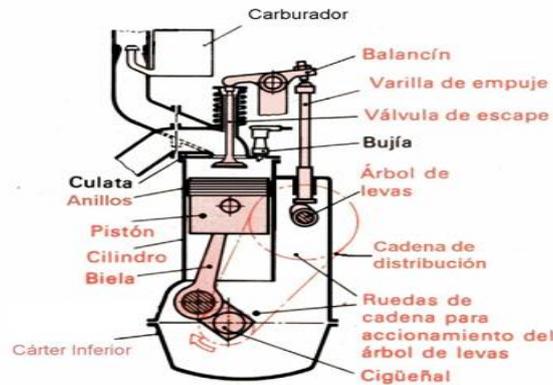
2.10 Motores de combustión interna alternativo

La energía química del combustible se convierte mediante la combustión en energía térmica en los motores alternativos de combustión interna (MCIA), y los mecanismos del motor convierten posteriormente esta energía térmica en energía mecánica. Una máquina de combustión interna (MCIA) es un motor que quema combustible y aire conjuntamente

para realizar trabajo sobre una superficie que se desplaza en movimiento rectilíneo. La figura 5 muestra varios esquemas básicos de construcción de una IACM.

Figura 7

Esquema de un motor de combustión interna alternativo



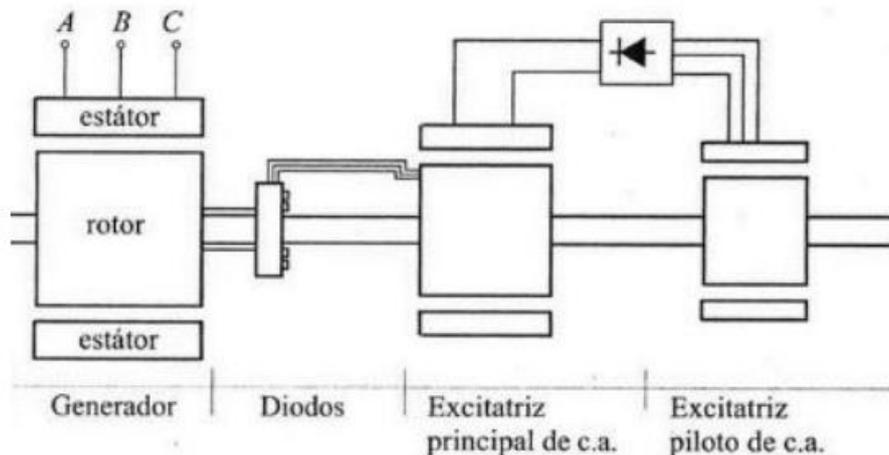
Nota. Imagen obtenida de Zurita (2007)

A continuación, se describe el funcionamiento teórico de un MCIA. El cilindro representado en la figura 7 (izquierda) tiene un diámetro (D) definido. El pistón se desplaza dentro de este cilindro entre dos posiciones extremas conocidas como punto muerto superior (PMS) y punto muerto inferior (PMI). Las válvulas de admisión (Figura 7 derecha) permiten la entrada de gases en el cilindro cuando el pistón se desplaza desde el PMS hasta el PMI. A continuación, el pistón retrocede hacia el PMS, comprimiendo el fluido del cilindro, y cuando se alcanza el PMS, la mezcla se enciende. El pistón realiza el desplazamiento del que se obtiene el trabajo al ser empujado de nuevo hacia el PMI por el aumento de presión provocado por la combustión. Finalmente, un nuevo movimiento ascendente del pistón y la apertura de las válvulas de escape fuerzan la salida de los gases de combustión del cilindro. En realidad, la apertura y el cierre de las válvulas, así como el encendido de la mezcla, se producen con adelantos y retrasos en relación con el PMS y el PMI en aras del funcionamiento práctico del motor. En consecuencia, el ángulo α (figura 7 izquierda) representa el ángulo que gira el cigüeñal en relación con el PMS y el PMI en los distintos momentos de apertura, cierre e ignición. El ángulo de la válvula transversal es el ángulo en el que tanto la válvula de admisión como la de escape permanecen abiertas simultáneamente. El volumen que desplaza el pistón entre el PMS y el PMI se conoce como cilindrada unitaria (VD), y la distancia que recorre el pistón entre estos dos puntos se conoce como carrera (S). La cilindrada total del motor (VT) se calcula multiplicando la

cilindrada unitaria por el número de cilindros del motor. Cuando el pistón está en PMS, se mide el volumen de la cámara de combustión (V_c), que es el volumen mínimo del cilindro. Una característica de funcionamiento importante de un MCIA es la relación de compresión, que se calcula como el cociente entre el volumen mínimo (V_C) y el volumen máximo ($V_D + V_C$). la biela (longitud L), que conecta el cigüeñal (longitud L) con el pistón, hace que el movimiento de traslación del pistón se convierta en una rotación alrededor del eje del cigüeñal. Este eje está conectado a un generador eléctrico, normalmente un alternador síncrono, para producir energía eléctrica. El rotor (bobinado inductor) del generador crea una inducción electromagnética en el estator (bobinado inducido), que recoge en sus bornes la corriente alterna producida por la rotación de los polos (imanes) del rotor. Dicho de otro modo, el alternador es el dispositivo que transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Un grupo electrógeno es una combinación de MCIA y alternador. (López A. , 2020)

Figura 8

Componentes principales de un generador eléctrico



Nota. Imagen obtenida de Barrero Gonzales (2004)

2.11 Criterios de clasificación de los motores alternativos

Los motores de combustión interna recíprocos se clasifican de varias maneras debido a la variedad de alternativas disponibles para su diseño y mecánica auxiliar. Estas opciones incluyen el número y la disposición de los cilindros, el tipo de combustible que se va a utilizar, el ciclo de trabajo, la entrada de aire del cilindro, el proceso de combustión, etc. Existen tantas categorías para una clasificación como combinaciones y características

posibles porque cada clasificación se basa en las especificaciones o criterios que el autor ha asumido. Estos criterios pueden ser simples o complejos. (Payri & Desantes, 2015)

2.11.1 Por el movimiento que realizan

Motor radial: Los cilindros están dispuestos radialmente en forma de rueda. El motor gira alrededor de un cigüeñal central, que está rodeado por un grupo de cilindros. El cigüeñal está fijo en su sitio.

Motor rotativo Wankel: Es un motor que funciona con rotores, a diferencia de los pistones de los motores alternativos.

Motor alternativo: Se trata de un motor térmico que convierte el movimiento rectilíneo en movimiento de rotación empujando un pistón que se desplaza por el interior de un cilindro y hace girar un cigüeñal. (Novillo, 2011)

2.11.2 De acuerdo al combustible empleado

Motores a Gasolina: Es el motor más utilizado en la actualidad. Es un motor alternativo que utiliza una chispa para encender una mezcla de aire y combustible -en este ejemplo, gasolina- en el cilindro. El gas resultante se expande y mueve un pistón, creando movimiento.

Motores a Diésel: El motor diesel funciona según el mismo concepto que un motor de gasolina; pero, debido a la alta temperatura producida por la compresión del aire en el cilindro, el combustible se enciende (Ciclo Diesel).

Motores a Gas: El componente principal del gas natural es el metano (CH₄). Para funcionar con gas natural, el motor debe ser de combustión interna (ciclo OTTO) con encendido por bujía. La forma en que se quema el combustible es muy parecida a la de un motor de gasolina. Mediante la inyección o el efecto venturi, el aire aspirado por el motor se combina con el gas natural en el colector de admisión. A través de la válvula de admisión, la mezcla se introduce en el cilindro, donde se comprime y explota al encenderse la bujía.

Motores a Hidrógeno: En este tipo de motor, el hidrógeno se quema igual que la gasolina. La principal diferencia es que es más respetuoso con el medio ambiente porque, en su combustión, sólo libera vapor de agua, lo que resulta en una contaminación escasa o nula. (Alvarez, 2017)

2.11.3 De acuerdo al ciclo de trabajo

Motor de cuatro tiempos: Este motor divide su ciclo de trabajo en cuatro fases: admisión, compresión, expansión y escape. Cada carrera del pistón o dos vueltas

completas del cigüeñal constituyen el ciclo de trabajo. Cada carrera del pistón implica la ejecución de cada fase.

Motor de dos tiempos: Las cuatro etapas del ciclo de trabajo en este tipo de motor son las mismas que en un motor de cuatro tiempos; la única distinción es que se completan en dos carreras del pistón o en una vuelta completa del cigüeñal. (Miranda, 2020)

2.11.4 De acuerdo al número de cilindros

Motor monocilíndrico: Sólo se utiliza un cilindro para la combustión.

Motor policilíndrico: Es aquel en el que las bielas de dos o más cilindros atacan a un único cigüeñal para llevar a cabo la combustión. Podemos identificar un subconjunto de motores policilíndricos en función de la disposición de los cilindros.

2.11.5 De acuerdo a la ubicación en el vehículo

Motor longitudinal: El motor longitudinal de un automóvil está situado en paralelo al sentido de la marcha, o a lo largo de la trayectoria del vehículo.

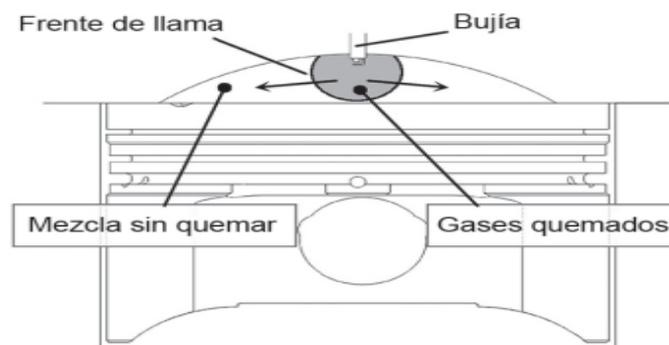
Motor transversal: Perpendicular a la dirección de movimiento del vehículo, el motor transversal está situado a lo ancho de la trayectoria del vehículo. (Ramírez & Basantes, 2013)

2.12 Motor de combustión interna de ciclo Otto

Estos motores, a menudo denominados motores de encendido MEP, tienen una mezcla aire-combustible homogénea al concluir la compresión. La deflagración de la mezcla, provocada por un frente de llama, produce la combustión, mientras que agentes externos como un salto de chispa son responsables del encendido. (Rovira & Muñoz , 2015)

Figura 9

Esquema de combustión en los MEP



Nota. Imagen obtenida de Rovira & Muñoz (2015)

2.13 Etapas de combustión del ciclo Otto

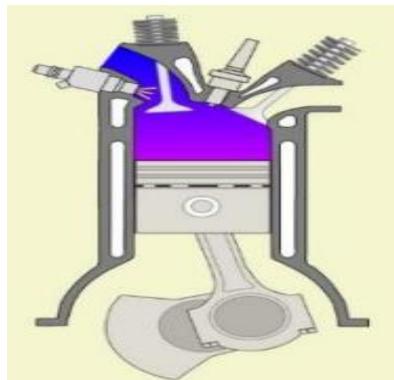
De acuerdo a (Sánchez, 2014) las etapas de la combustión son las siguientes:

a) Admisión

La etapa de admisión hace que la presión en la cámara de combustión descienda porque el pistón cae hasta el punto muerto inferior, la válvula de admisión está abierta y la de escape cerrada. El pistón permanece en la cámara de combustión tras aspirar la combinación de aire y combustible mientras cae.

Figura 10

Etapa de admisión del ciclo Otto



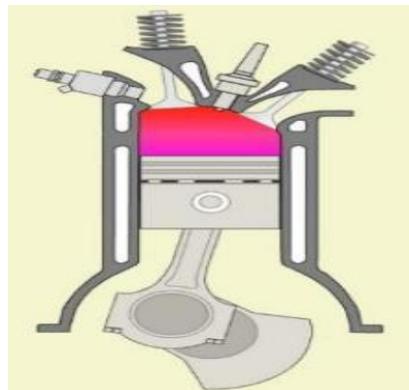
Nota. Imagen obtenida de Sánchez (2014)

b) Compresión

Durante la fase de compresión, cuando el pistón sube hasta el punto muerto superior de la cámara de combustión y comprime la mezcla de aire y combustible, todas las válvulas se cierran para evitar pérdidas de presión.

Figura 11

Etapa de compresión del ciclo Otto



Nota. Imagen obtenida de Sánchez (2014)

c) Combustión

Cuando la mezcla está a punto de alcanzar el PMS, salta una chispa de la bujía que permite que la mezcla arda. Los gases producto de la combustión se expanden, lo que provoca la caída del pistón. El pistón se encuentra todavía en la carrera positiva durante la fase de combustión.

Figura 12

Etapa de combustión del ciclo Otto



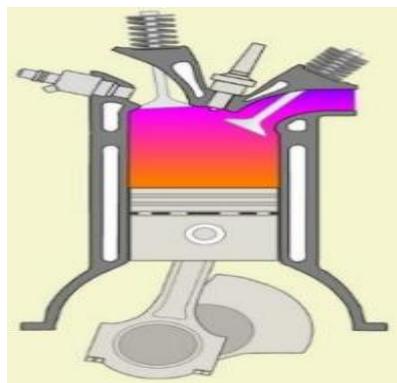
Nota. Imagen obtenida de Sánchez (2014)

d) Escape

Como su nombre indica, la etapa de escape se produce cuando el pistón sube hasta el PMS, eliminando todos y cada uno de los gases producidos durante la combustión. La válvula de admisión debe estar cerrada para que esto suceda, pero se abre la de escape, despejando la cámara de combustión y preparándola para un nuevo ciclo que comienza de nuevo con la admisión.

Figura 13

Etapa de escape del ciclo Otto



Nota. Imagen obtenida de Sánchez (2014)

2.14 Emisiones contaminantes de un motor Otto

A continuación, una lista de las emisiones de los vehículos que se consideran perjudiciales para el medio ambiente y la salud de las personas:

a) Hidrocarburos (HC): Estas partículas, conocidas como contaminantes causantes del smog en las ciudades y también ampliamente reconocidas como extremadamente nocivas para la salud humana, son las que no reaccionaron en la combustión o sólo lo hicieron parcialmente. Si se exponen a ellas repetidamente, pueden desarrollar cáncer, daños en el hígado y otros problemas.

b) Óxido de nitrógeno (NOx): Se producen en el interior del motor cuando el nitrógeno reacciona con el oxígeno atmosférico a temperaturas y presiones muy elevadas. Tanto la generación de smog como la lluvia ácida se ven afectadas por estas emisiones de óxidos de nitrógeno.

c) Monóxido de carbono (CO): Resultado de la ineficacia de estas tecnologías que conducen a una combustión incompleta. Reduce la capacidad natural de la sangre para transportar oxígeno a las células, lo que constituye una de sus consecuencias negativas, lo que aumenta la posibilidad de afecciones potencialmente mortales, como las cardiopatías.

d) Dióxido de carbono (CO₂): Dado que el dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero cada vez más extendido, las emisiones de dióxido de carbono constituyen un problema importante en el debate general sobre el calentamiento global. (Ochoa & Pullay, 2012)

Tabla 5

Cuadro comparativo para los procesos de los ciclos Otto y Diesel

	Ciclo Otto	Ciclo Diesel
Admisión	Cuando el pistón está en PMI durante todo este procedimiento, el motor aspira la mezcla de combustible y aire.	Durante esta fase, el pistón está en PMI, lo que hace que el motor aspire aire.
Compresión	En este proceso, la mezcla se comprime cuando el pistón is en su carrera in el PMS.	Cuando el pistón está en su carrera en el PMS, este proceso provoca la compresión del aire, lo que aumenta la temperatura y la presión.
Combustión	En este procedimiento, la mezcla de aire comprimido y combustible se enciende mediante el salto de	El calor de la alta presión hace que el combustible se encienda al mezclarse con el aire caliente.

	chispa proporcionado por la bujía eléctrica.	
Expansión	Aprovechando la liberación de energía química, la expansión de los gases fuerza el pistón en la dirección del PMI, dando lugar a la carrera de trabajo.	Aprovechando la liberación de energía química, la expansión de los gases fuerza el pistón en la dirección del PMI, dando lugar a la carrera de trabajo.
Escape	Los subproductos del proceso de combustión son expulsados al exterior por el pistón durante esta operación.	Los subproductos del proceso de combustión son expulsados al exterior por el pistón durante esta operación.

Nota. Tabla tomada de Morocho & Nagua (2019)

2.15 Generador eléctrico trifásico

Una máquina eléctrica que gira y convierte la energía mecánica en energía eléctrica se llama generador. La interacción de sus dos componentes principales -el estator estático y el rotor móvil- permite que esto se lleve a cabo. En un generador eléctrico, uno de los dos componentes crea un flujo magnético (que funciona como inductor) que el otro utiliza para convertir en electricidad (que funciona como inducido). Los alternadores y las dinamos son los dos tipos de máquinas eléctricas rotativas a los que pertenecen. El estator es el inducido y el rotor es el elemento inductor. Los generadores utilizados son generadores síncronos protegidos contra salpicaduras. Sus componentes y su sistema de excitación difieren en función de las características de cada equipo y de la zona que sea necesario cubrir. Existen dos tipos de alternadores: con escobillas y sin escobillas. La técnica más utilizada es la que no tiene escobillas, lo que la hace más confiable y útil porque elimina la necesidad de mantenimiento extra de escobillas y anillos rozantes. Los generadores que se coloquen deben cumplir con el código eléctrico nacional debido a que la frecuencia utilizada en el Perú es de 60 Hz. En cuanto a las variables físicas, la conexión de los devanados del generador produce la tensión de salida de la máquina. Si es necesario ajustar la tensión de salida del generador, el fabricante debe especificar el tipo de conexión que se necesita. Esto garantiza la flexibilidad operativa, mejorando el rendimiento del grupo electrógeno al permitir que el generador eléctrico suministre electricidad a la demanda necesaria. (Soto, 2017)

El fenómeno de inducción electromagnética, también conocido como ley de Faraday, sirve de base al principio de funcionamiento del generador eléctrico. La fluctuación del flujo magnético en un conductor o bucle corresponde inmediatamente a la tensión inducida en

el circuito. Esto indica que, para producir la fuerza electromotriz, debe existir una espira por la que pase una corriente si hay un campo magnético que produzca un flujo magnético. El disco de Faraday está formado por un imán en forma de U que gira dentro de un potente electroimán, y un disco de cobre de 12” de diámetro y 1/5” de grosor montado sobre un eje. Aplicando una tira conductora al exterior del disco y otra al eje, utilizó un galvanómetro para demostrar que los imanes permanentes podían generar electricidad.

Las máquinas denominadas alternadores o generadores de corriente alterna convierten la energía mecánica en energía eléctrica en forma de corriente alterna a través del rotor. La mayoría de los alternadores son dispositivos síncronos de corriente alterna, o aquellos que giran a una velocidad síncrona determinada por el número de polos de la máquina y la frecuencia de la fuerza electromotriz. (Ponce & Monfuar, 2014)

Tasa de calor o Heat Rate: Esta métrica de rendimiento energético, comúnmente denominada consumo específico, contrasta el flujo másico de combustible con la potencia efectiva producida por la central eléctrica. Cuando el valor de la Tasa de Calor en un conjunto de valores es el más bajo, se considera ideal. (Mendoza, 2017)

$$Heat\ Rate = \frac{\dot{m}_c}{P_{ef}}$$

Costo variable combustible CVC: Se define como el gasto asociado al consumo de combustible utilizado durante la operación de la central termoeléctrica bajo las normas eléctricas peruanas. Se calcula multiplicando el costo unitario del combustible por la tasa de calor a plena carga. (Mendoza, 2017)

$$C.V.C = Heat\ Rate * Precio\ Unitario\ del\ Combustible$$

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales y servicios

Para la construcción del Prototipo generador de hidrógeno de celdas secas, se consideran los siguientes materiales y servicios.

A. Materiales para la construcción del prototipo generador de hidrógeno

Tabla 6

Materiales para la construcción del generador de hidrógeno

Descripción	Unidad de medida	Referencia
Plancha acrílica especial para generación de hidrógeno HHO de 22.5 x 16 cm y 1 cm de espesor	Unidad	
Placas de acero inoxidable numero 316 especial para realizar hidrólisis de 12.5 x 16.5 cm y espesor de 1.5 mm	Unidad	
Tornillos espárragos hexagonales de 11 cm de longitud y 6 mm de espesor	Unidad	
Tuercas de 6 mm de espesor	Unidad	
Arandela de presión para tales medidas de 6mm	Unidad	
Conectores BSP de 1/4 de polietileno	Unidad	
Codos BSP de 1/4 de polietileno	Unidad	
	metro	

Manguera de polietileno de 6 mm microtubo		
Válvula de alivio de 1/4 de polietileno	Unidad	
Cable INDECO numero 12	metro	
Cable INDECO numero 16	metro	
Discos de corte para acero inoxidable BOSCH 115 x 1mm x 10	Unidad	
Plancha de goma expandido color negro de 1m x 1m	Unidad	
Brocas de perforación para taladro de 6 mm	Unidad	

Nota. Elaboración propia

B. Equipos para la construcción del prototipo y toma de datos en campo

Tabla 7

Equipos para la construcción

Descripción	Unidad de medida	Referencia
Amoladora BOSCH de 1200 W	Unidad	
Taladro percutor eléctrico de 13 mm BOSCH 550 W – 220 V	Unidad	

Pinza amperimétrica digital EXTECH 1000 AAC/DC, 600 AC/DC, 40 MOhms	Unidad	
Generador eléctrico trifásico POWER FORCE de 7.5 kW	Unidad	
Batería de 11 placas ETNA 814 AMP – 60 AH	Unidad	
Balanza de gramos	Unidad	

Nota. Elaboración propia

C. Reactivos para poner en marcha el prototipo generador de hidrógeno

Tabla 8

Reactivos para la hidrólisis

Descripción	Unidad de medida	Referencia
Hidróxido de potasio	Kg	
Agua	Lt	

Nota. Elaboración propia

3.2 Método

3.2.1 El trabajo de Investigación desarrollado es del tipo experimental, de naturaleza cuantitativa.

3.2.2 Diseño de la investigación: De acuerdo a (Sabino, 1992), El diseño de la investigación es una secuencia de pasos secuenciales y estructurados que especifican las pruebas que se van a realizar y los métodos que se van a emplear para la recogida y el análisis de datos. Estos pasos deben adaptarse a las especificidades de cada proyecto de investigación.

La modificación deliberada de la variable independiente y el examen de sus efectos sobre una variable dependiente definen la investigación experimental. En cuanto a sus sub-diseños, los estudios se dividen en tres categorías: (a) pre-experimental, que implica que sólo un grupo recibe una intervención; (b) cuasi-experimental, que implica uno o más grupos experimentales, un grupo de control y una asignación no probabilística de los participantes a ambos grupos; y (c) de tipo experimental, que implica uno o más grupos de intervención, un grupo de control y una asignación probabilística aleatoria de los participantes a los distintos grupos. (Ramos, 2021).



O1: Desempeño del motor de combustión interna sin hidrógeno

O2: Desempeño del motor de combustión interna con hidrógeno

X: Generación de hidrógeno

G.E: Prototipo generador de hidrógeno

3.3 Metodología de cálculo

Se presenta la siguiente secuencia de cálculos para la obtención de resultados y discusión en la presente investigación:

a. Diseño del generador de hidrógeno.

A la hora de diseñar y construir un generador de hidrógeno, hay que tener en cuenta algunos factores, los más cruciales de los cuales son los siguientes:

- Tenemos la opción de fabricar los electrodos con material de acero inoxidable para evitar la corrosión del material más adecuado, el níquel metálico (Ni), que es muy caro de utilizar y mecanizar. Los electrodos constan de un ánodo con carga positiva y un cátodo con carga negativa.

- Existe una correlación entre la gestión de la densidad de corriente y la superficie de los electrodos, ya que éstos deben tener un tamaño de 170 cm² para tener una densidad de corriente de aproximadamente 0,1 A/cm² y crear hidrógeno gaseoso. Este rango teórico permite que el electrolizador funcione a unos 20
- Las placas neutras se distribuyen por el centro de los electrodos del electrolizador y deben estar separadas al menos 3 mm para que fluyan 10 A a través de ellas.
- Se necesita un electrolito para acelerar la reacción de electrólisis; en este caso, el hidróxido de potasio KOH funciona mejor; las exigencias del experimentador pueden elegir los porcentajes de concentración.

En primer lugar, hay dos tapas colocadas en los extremos del generador de hidrógeno. En su interior hay placas metálicas que servirán como electrodos de carga positivo y negativo. En medio de éstas hay placas sin carga, o carga neutra. Por último, se colocan juntas de goma en cada uno de estos elementos para mantenerlos separados y evitar que entren en contacto, lo que hará que nuestro generador quede hermético una vez montado.

El material elegido para las cubiertas del generador es el metacrilato, un plástico no metálico que ofrece el aislamiento necesario para evitar corrientes de fuga. Es resistente, transparente y fácilmente mecanizable, lo que permite observar el comportamiento y la disociación de la molécula de agua en su interior.

Estos dos revestimientos se han elegido con unas medidas de 22,5 x 16 cm y un grosor de 1 cm. Al montar estos revestimientos, se colocarán en ellos preformas de 6 mm de diámetro a través de las cuales se pasarán pernos prisioneros en el orden adecuado.

Simultáneamente, se taladraron dos orificios de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro en la cubierta frontal, en los que se atornillaron dos conectores y codos BSP para la salida de hidrógeno y el acoplamiento de la manguera que permite la entrada de agua en el prototipo.

Lo siguiente en nuestro diseño son los electrodos de carga, que son posibles gracias a la reacción de oxidación y reducción del agua al circular cierta cantidad de corriente eléctrica por el interior del generador durante el proceso de electrólisis. Estos electrodos tienen la siguiente configuración eléctrica: un electrodo cargado positivamente llamado ánodo donde aparece el oxígeno, y un electrodo cargado negativamente llamado cátodo donde aparece el hidrógeno.

Como material para estos electrodos se eligió el acero inoxidable de grado 316. Debido a su contacto constante con el agua y a la reacción electroquímica que surge de la electrólisis que se realiza en la superficie de contacto de cada electrodo, esta sustancia conductora es resistente a la corrosión.

Este acero inoxidable de grado 316 se encuentra fácilmente en el mercado, tiene un contenido de níquel del 10,5% y cumple los requisitos necesarios para ser utilizado en la producción de nuestro generador. Sin embargo, al carecer de las cualidades mencionadas, no se aconseja utilizar materiales alternativos como el cobre o el aluminio. De ser así, habría que sustituir los electrodos con más frecuencia.

Estos componentes miden 12,5 x 16,5 cm y tienen un grosor de 1,5 mm. La idea de utilizar dos electrodos negativos es producir más hidrógeno durante la electrólisis del agua. Por otro lado, los electrodos neutros del generador se utilizan para dividir la diferencia de potencial entre los electrodos positivo y negativo, que deben colocarse en el centro. Si no se utilizan estos electrodos, la diferencia de potencial entre los polos será la fuente de energía total, lo que reducirá la cantidad de hidrógeno producida. Por lo tanto, la diferencia de potencial se divide por el número de electrodos neutros al instalarlos, lo que significa que cuantos más electrodos neutros haya, menos saltos de tensión se producirán hasta alcanzar el valor mínimo de 2 V.

Tenemos un voltaje de 12V de la fuente de alimentación (la batería) para nuestro diseño experimental. Como resultado, tendremos una diferencia de potencial de 4V dividiendo los electrodos neutros entre los electrodos de carga.

Por último, las juntas de goma son una parte esencial del sistema de estanqueidad del generador; crean una barrera eléctrica entre los electrodos de carga, impidiendo que entren en contacto entre sí. Al producir la estanqueidad para construir el generador y detener las fugas de agua e hidrógeno, el tipo de material utilizado debe ser resistente a la corrosión y a la fatiga mecánica.

Debido a la geometría del generador y a nuestro diseño, la junta tendrá forma rectangular. Para ello, utilizaremos un aislante de goma proporcional al grosor de las placas de acero inoxidable de 1,5 mm, pero que sólo cubrirá los bordes de unión de las placas.

b. Ensamblaje del generador de hidrógeno.

Una vez finalizado el proceso de mecanizado, se tendrán en cuenta los siguientes factores antes del montaje del generador:

- Para aumentar el rendimiento del generador y producir una superficie rugosa en ambos lados para las placas, lijaremos sus superficies. Además, eliminaremos cualquier rebaba que sobresalga en los bordes de las placas para evitar cortes durante el montaje.
- Para evitar que entren contaminantes en el interior del generador, las cubiertas acrílicas transparentes también se desbarbarán y limpiarán con diluyente.

Avanzaremos en el montaje de nuestro generador de hidrógeno teniendo en cuenta los factores mencionados. Comenzando por la tapa trasera, que nos servirá de plataforma, colocaremos secuencialmente los espárragos de 6 mm de diámetro en los agujeros exteriores de la tapa, fijándolos con tuercas y las arandelas correspondientes para crear una mayor zona de ajuste.

A continuación, instalaremos una junta de goma que permita separar la tapa y el electrodo de carga 1,5 mm. De esta forma, evitaremos fugas de gas y agua durante todo el proceso de electrólisis. La placa señalada será el cátodo, o placa de carga negativa, donde aparecerá el hidrógeno. Pasaremos un espárrago de 6 mm de diámetro por las esquinas y bordes de esta placa para que sirva de conexión eléctrica al suministrar energía eléctrica al terminal negativo de la fuente de alimentación (la batería).

Primero debe colocarse la placa de carga negativa, seguida de su correspondiente junta de separación. A continuación, se deben colocar cuatro placas neutras, alternando las juntas de separación en el centro, hasta llegar a la última placa, conocida como "ánodo" de carga positiva, que es donde aparecerá el oxígeno. Esta placa se instala en sentido contrario a la placa negativa anteriormente instalada, y en su otra esquina, pasaremos el espárrago de 6 mm de diámetro que actuará como conexión eléctrica al suministrar energía eléctrica al borne positivo de la batería.

Siguiendo este procedimiento, llegaremos al segundo electrodo de carga, denominado "cátodo" de carga negativa, que se coloca en el mismo lugar que el anterior. De esta forma, se producirá hidrógeno y oxígeno en una proporción 2:1 durante la electrólisis del agua. Por último, apagaremos el generador cerrando la tapa frontal, que aloja los conectores roscados de 6 mm de diámetro. Una vez montadas las placas, los separadores de goma y las placas acrílicas, se realizan las conexiones de los codos y conectores BSP y la válvula de alivio, por donde entrará el agua al prototipo y saldrá el gas oxígeno al sistema de protección del burbujeador.

Para la construcción del burbujeador se realiza el mismo procedimiento en esta ocasión se utilizará acrílico en forma cilíndrica, contará con sus juntas de goma proporcional al

tamaño del equipo. sus medidas son las siguientes 16.5 cm de largo y 6 cm de ancho por placa y el diámetro del cilindro es de 5.5 cm.

c. Producción de hidrógeno

Las leyes de Faraday, que demuestran que la materia se transforma en otros productos cuando circula una corriente eléctrica en una solución, deben tenerse en cuenta para determinar la cantidad de hidrógeno producida por el generador de hidrógeno durante el proceso de electrólisis. La corriente sirve como fuerza motriz necesaria para la reacción de "reducción y oxidación" del proceso. El agua debe hacerse conductora antes de poder ser electrolizada. Los iones se añaden disolviendo un electrolito en el agua para acelerar la reacción de electrólisis y producir oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo.

Para tal caso enunciaremos las leyes de Faraday:

- Según la primera ley de Faraday, la masa liberada de una sustancia durante la electrólisis es proporcional a la carga eléctrica que pasa por los electrodos de la solución.
- Ampliando la primera ley, la segunda ley de Faraday afirma que la masa depositada en un electrolito es proporcional a su peso equivalente.

Para tal caso se tiene la siguiente expresión:

$$m = \frac{M * Q}{z * F}$$

Donde:

m: Masa de la sustancia producida en el electrodo (g)

M: Masa atómica de la sustancia (g/mol)

Q: Carga eléctrica que pasa por la solución C (coulomb)

Z: Número de electrones transferidos en la sustancia

F: Constante de Faraday 96485 C/mol.

La cantidad de masa que se deposita en la superficie de un electrodo que ha sido alterado está correlacionada con la corriente eléctrica que pasa a través de él en una cuba electrolítica, según las leyes de Faraday antes mencionadas. Las formas diatómicas del hidrógeno y del oxígeno serán liberadas por los electrodos de carga para nuestro examen. Como resultado, se repite la fórmula de cada elemento en la fórmula anterior.

Para el hidrógeno:

$$m_{H_2} = \frac{M_{H_2} * Q}{Z_{H_2} * F}$$

Para el oxígeno

$$m_{O_2} = \frac{M_{O_2} * Q}{Z_{O_2} * F}$$

Utilizaremos la ecuación de estado de los gases ideales, ya que los productos de la materia transformada se encuentran en estado gaseoso.

$$P * V = R * n * T$$

Donde:

P: Presión atmosférica (MPa)

V: Volumen (m³)

R: Constante universal de los gases ideales (J/Kmol.K)

n: Número de Moles (mol)

T: Temperatura (K)

Despejando el número de moles de la ecuación de estado de los gases ideales

$$n = \frac{P * V}{R * T}$$

De la misma forma en la ecuación de la masa de hidrógeno

$$\frac{m_{H_2}}{M_{H_2}} = \frac{Q}{Z_{H_2} * F}$$

A esta ecuación sustituimos la igualdad del número de moles y obtenemos una fórmula para la obtención del volumen de Hidrógeno:

$$V_{H_2} = \frac{I * t * R * T}{Z_{H_2} * F * P}$$

De igual manera para el oxígeno

$$V_{O_2} = \frac{I * t * R * T}{Z_{O_2} * F * P}$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Diseño y construcción del generador de hidrógeno

Figura 14

Prototipo de generación de hidrógeno de celda seca

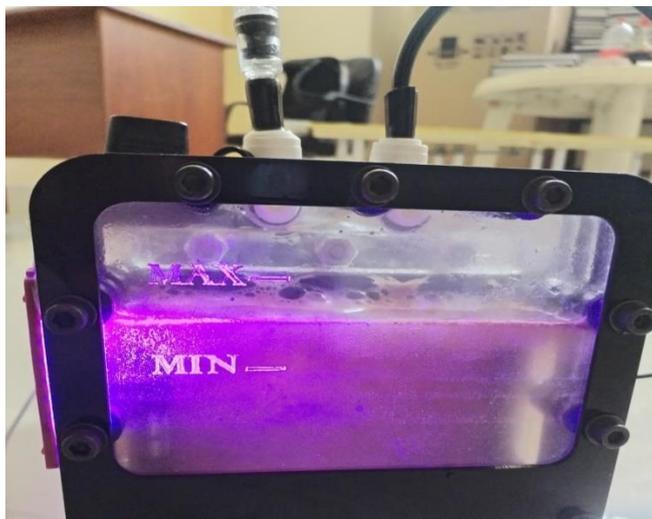


Nota. Elaboración propia

El generador de hidrógeno fue elaborado a base de 5 placas de acero inoxidable de níquel con dimensiones de 12.5 x 16.5 cm de ancho y largo respectivamente y espesor de 1.5 mm, asimismo se utilizaron 5 placas de acrílico con 22.5 x 16 cm de largo y ancho y un espesor de 1 cm, estas fueron ensambladas utilizando los tornillos hexagonales y las tuercas de presión junto a empaquetaduras de color negro cortado a medida de las placas y el acrílico para evitar las fugas en el interior. Posterior a eso se fueron colocando los conectores BSP, codos BSP y la válvula de alivio, tanto para la entrada del agua como a la salida del hidrógeno, para finalizar se insertaron los cables en ambas entradas de los polos positivo y negativo que irán conectados a la batería. En segundo lugar se construyó el burbujeador que con los mismos materiales ya mencionados pero esta vez con una base acrílico cilíndrico de 16.5 cm de largo y un diámetro de 5.5 cm.

Figura 15

Producción de hidrógeno



Nota. Elaboración propia

Los resultados de las pruebas realizadas durante el proceso de electrólisis, que se alimentó con una batería de ácido de 12 V y 87 Ah, se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 9 Ensayos del generador de hidrógeno

Electrolito KOH (gr)	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Tiempo (seg)
30	12	9	30
50	11	13	40
70	10.5	15	50
90	8	18	60

Fuente: Elaboración propia

Se obtiene la producción total con las ecuaciones citadas anteriormente reemplazando los valores de la tabla 7, teniendo en cuenta la variación del compuesto KOH que se irá adicionando por cada toma de dato donde el agua no varía y tiene un volumen de 1 L por cada prueba.

4.1.1. Volumen de producción de hidrógeno

$$V_{H_2} = \frac{I * t * R * T}{Z_{H_2} * F * P}$$

$$V_{H_2} = \frac{9 \text{ A} * 30 \text{ s} * 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}} * K * 298 \text{ K}}{1 * 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}} * 0.1015 * 10^6 \text{ Pa}} * 10^3$$

$$V_{H_2} = 0.068 \text{ L}$$

4.1.2. Volumen de producción de oxígeno

$$V_{O_2} = \frac{I * t * R * T}{Z_{O_2} * F * P}$$

$$V_{O_2} = \frac{9 \text{ A} * 30 \text{ s} * 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}} * K * 298 \text{ K}}{2 * 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}} * 0.1015 * 10^6 \text{ Pa}} * 10^3$$

$$V_{O_2} = 0.034 \text{ L}$$

Se presenta el consolidado de resultados obtenidos de la evaluación experimental de la celda de hidrogeno.

Tabla 10

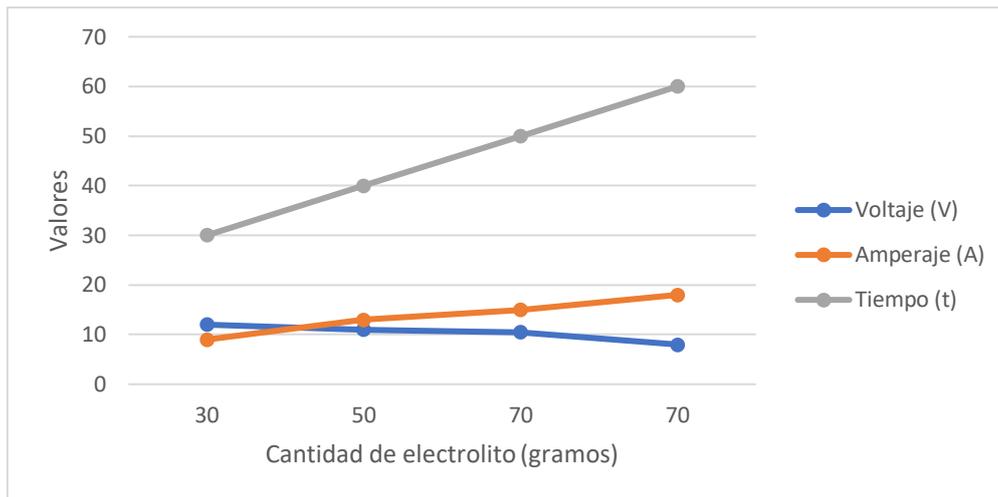
Volumen de hidrógeno, oxígeno y volumen total de producción de hidrógeno

Pruebas	Electrolito KOH (gr)	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Tiempo (T)	Volumen de hidrógeno (L)	Volumen de oxígeno (L)	Volumen total (L)
1	30	12	9	30	0.068	0.034	0.102
2	50	11	13	40	0.131	0.065	0.196
3	70	10.5	15	50	0.177	0.094	0.271
4	90	8	18	60	0.273	0.136	0.409

Nota. Elaboración propia

Figura 16

Proceso de producción de hidrógeno



Nota. Elaboración propia

De las tablas anteriores se desprende que el grado de concentración del electrolito controla la cantidad de hidrógeno y oxígeno producidos en un tiempo determinado. Es importante señalar que el tiempo de producción es una variable crítica porque estos valores determinarán en última instancia cómo se desplaza en el futuro el combustible primario del motor en función del flujo de producción de hidrógeno cuando se utiliza junto con otros combustibles.

4.2 Evaluación del motor de combustión interna.

Se presenta los resultados de la evaluación del desempeño del motor:

a) Mediciones del generador eléctrico monofásico del Grupo Electrónico.

$$Potencia Efectiva = v * i$$

Caso 1:

Tensión: 220 voltios

Corriente: 24,9 Amp

$$Potencia Efectiva = \frac{220 * 4,6}{1\ 000} = 1,012\ kW$$

Se presenta los resultados promedio para 6 mediciones distintas de carga, estas cargas corresponden a los equipos que fueron alimentados al encender el grupo electrónico de 7.5 kW, entre ellos tenemos una amoladora BOSCH, un taladro de mano BOSCH, además del tablero del pabellón nuevo de la escuela de ingeniería en Energía el cual alimenta el auditorio donde las cargas aquí pertenecen a la iluminación, proyector y equipos de sonido. En esta etapa las cargas se fueron adicionando de acuerdo a las pruebas realizadas,

y con la pinza amperimétrica fuimos obteniendo los datos de corriente eléctrica para así obtener la potencia efectiva.

Tabla 11

Desempeño eléctrico del Grupo Electrónico Power Force de 7.5 kW

Prueba	Tensión (v)	Corriente (Amp.)	Potencia Efectiva (kW)
1	220	4,6	1,01
2	220	6,8	1,50
3	220	12,5	2,75
4	220	15,8	3,48
5	220	19,2	4,22
6	220	24,9	5,48

Nota. Elaboración propia.

b) Desempeño del motor de combustión interna del Grupo Electrónico.

Consideraciones:

Eficiencia del Grupo Electrónico = 0,88 (Información de placa)

Consumo de combustible para caso 1= 0,510 galones/h

Poder calorífico inferior del Gasohol de 90 octanos= 42 500 kJ/kg (Fuente: Petroperú)

Densidad del Gasohol 90 octanos= 2,88 kg/galón. (Fuente: Petroperú)

Determinación de la potencia térmica suministrada:

$$Q_{sum.} = \dot{m}_{G90} * PCI_{G90}$$

$$Q_{sum.} = \frac{0,510 \frac{gal}{h} * \frac{2,88kg}{gal} * 42 500 kJ/kg}{3 600} = 17,34 kW$$

La Potencia mecánica saliente del motor de combustión interna y entrante al generador eléctrico es igual a:

$$\eta_{GE} = \frac{P_e}{P_m} * 100\%$$

$$0,88 = \frac{1,012}{P_m} * 100\%$$

$$P_m = 1,15 \text{ kW}$$

Eficiencia del motor de combustión interna.

$$\eta_{MCI} = \frac{P_m}{Q_{sum}} * 100\%$$

$$\eta_{MCI} = \frac{1,15}{17,34} * 100\%$$

$$\eta_{MCI} = 6,63 \%$$

Se presenta el comportamiento de las eficiencias características del grupo electrógeno en evaluación para las 6 posiciones de carga.

Tabla 12

Desempeño del Grupo electrógeno Power Force de 7.5 kW operando con Gasohol 90 octanos

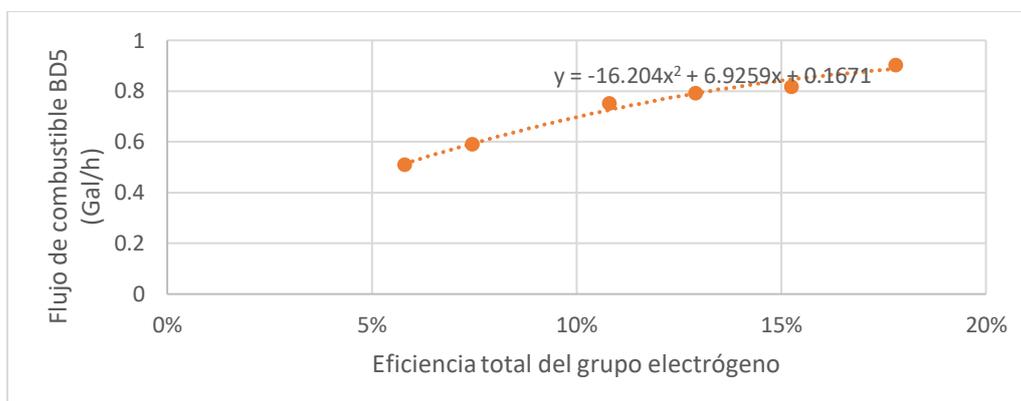
Prueba	Potencia Efectiva (kW)	Ef. Generador	Potencia mecánica (kW)	Galón/h	Potencia Suministrada (kW)	Ef. MCI	Ef. total GE
1	1,012	88,0%	1,15	0,510	17,34	6,63%	5,8 %
2	1,496	88,0%	1,7	0,590	20,06	8,47%	7,45 %
3	2,75	88,0%	3,125	0,750	25,50	12,25%	10,8 %
4	3,476	88,0%	3,95	0,790	26,86	14,71%	12,9 %
5	4,224	88,0%	4,8	0,815	27,71	17,32%	15,24 %
6	5,478	88,0%	6,225	0,902	30,66	20,30%	17,8 %

Nota. Elaboración propia.

Se presenta el comportamiento de las eficiencias características del grupo electrógeno referente a la eficiencia total del grupo electrógeno Power Force operando con gasohol de 90 octanos, se puede observar que la máxima eficiencia alcanzada es de 17,8 % para un consumo de 0,902 galones/hora, el comportamiento no es lineal del desempeño del grupo electrógeno con un valor de 5,8 % con un consumo de 0,510 galones/hora.

Figura 17

Desempeño del grupo electrógeno operando con gasohol de 90 octanos



Nota. Elaboración propia.

c) Del mismo modo se presentan los resultados de los indicadores de desempeño de generación asociados al heat rate, costo variable de combustible y las emisiones de dióxido de carbono por la quema de combustible para ello se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Precio del gasohol 90 octanos: 15,1 Soles/galón. (fuente: <https://www.facilito.gob.pe/facilito/actions/PreciosCombustibleAutomotorAction.do>)

Factor de emisiones para el gasohol :69,3 kg CO₂/TJ (Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - Volumen 2: Energía, pág. 2.16 - 2.17)

Horas de operación supuesta para las emisiones de dióxido de carbono

Tabla 13

Indicadores de desempeño de generación del Grupo electrógeno Power Force de 6 kW operando con Gasohol 90 octanos

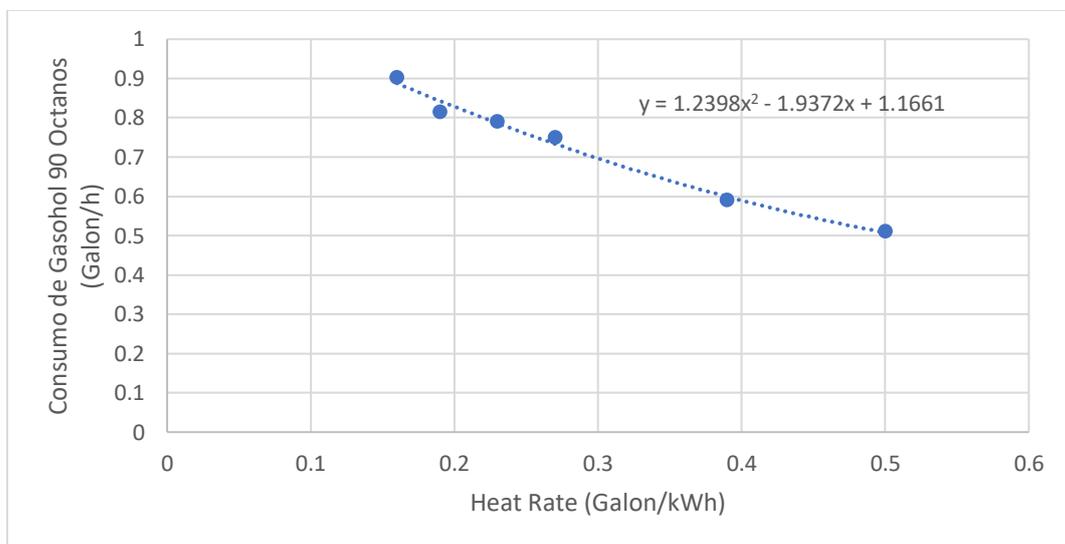
Prueba	Potencia Efectiva (kW)	Consumo Gasohol 90 Oct. (Galon/h)	Heat Rate (Gal/kWh)	CVC (S/kWh)	Emisiones kg CO ₂ para 500 h
1	1,012	0,510	0,50	7,71	2,163
2	1,496	0,590	0,39	6,03	2,502
3	2,75	0,750	0,27	4,17	3,181
4	3,476	0,790	0,23	3,48	3,351
5	4,224	0,815	0,19	2,95	3,457
6	5,478	0,902	0,16	2,52	3,826

Nota. Elaboración propia.

Se presenta el comportamiento de los indicadores de desempeño de generación para el comportamiento a varias posiciones de carga , así tenemos que para una máxima carga evaluada de 5,478 kW y un consumo de combustible de 0,902 galones/hora se tiene un Heat Rate de 0,16 Galones/kWh, mientras que el costo variable combustible con precio de Chimbote de Noviembre 2023 se obtiene un valor de 2,52 Soles/kWh, mientras que para una operación de 500 horas/mes se tiene un valor de emisiones equivalente de 3,826 kg de CO₂.

Figura 18

Heat Rate del grupo electrógeno operando con gasohol de 90 octanos



Nota. Elaboración propia.

Como podemos observar en la gráfica el Heat Rate disminuye a medida que el consumo aumenta a su vez el CVC disminuye estos valores indican que los indicadores están teniendo valores óptimos como lo indica (Mendoza, 2017), sin embargo en la tabla observamos que los índices de emisiones de CO₂ aumentan.

4.3 Evaluación del motor de combustión interna con consumo parcial de hidrogeno.

Se presenta los resultados de la evaluación del desempeño energético del grupo electrógeno operando con suministro parcial de hidrogeno con gasohol de 90 octanos:

a. Caracterización del flujo masico de hidrogeno.

Se presentan los resultados de las mediciones realizadas en la generación de hidrogeno, para un total de 10 pruebas realizadas. Para lo cual la obtención del flujo masico de

hidrogeno, por prueba se tomó en cuenta un tiempo de 20 minutos por prueba, empleándose la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{m_{final} - m_{inicial}}{tiempo}$$

Los valores de:

m_{final} Valor de la masa del depósito de recepción de H2 final del tiempo de evaluación.

$m_{inicial}$ Valor de la masa del depósito de recepción de H2 inicio del tiempo de evaluación.

Tabla 14

Valores de medición de flujo de hidrógeno

Caso	Medida final(kg)	Flujo H2 (kg/s)
1	0,11	0,0000917
2	0,09	0,000075
3	0,12	0,0001
4	0,13	0,0001083
5	0,12	0,0001
6	0,1	0,0000833
7	0,11	0,0000917
8	0,09	0,000075
9	0,09	0,000075
10	0,11	0,0000917
Promedio		0,0000892

Nota. Elaboración propia

b. Ensayos en Grupo Electrónico Power Force de 7.5 kW.

Luego de realizarse la adaptación del sistema de generación eléctrica, acoplándose al carburador del motor de combustión interna el punto de suministro de hidrogeno, se tienen los siguientes resultados.

Carga Eléctrica = 24,9 Amperios.

Potencia Eléctrica generada = 5,48 kW.

Poder Calórico H2= 120 MJ/kg

Flujo masico H2= 0,0000892 kg/s

Potencia térmica suministrada = 30,66 kW

Poder calorífico inferior Gasohol 90= 42 500 kJ/kg

Factor de conversión = 1 kg/s = 951.02 gal/h

$$Q_{sum.} = \dot{m}_{G90} * PCI_{G90} + \dot{m}_{H2} * PCI_{H2}$$

$$30,66 kW = \dot{m}_{G90} * 42 500 kJ/kg + 120 000 \frac{kJ}{kg} * 0,0000892 kg/s$$

$$\dot{m}_{G90} = 0,446 gal/h$$

Se realizaron 4 pruebas a 30,66 kW de potencia eléctrica generada se presentan los siguientes resultados.

Tabla 15

Desempeño del grupo electrógeno con suministro parcial de hidrógeno

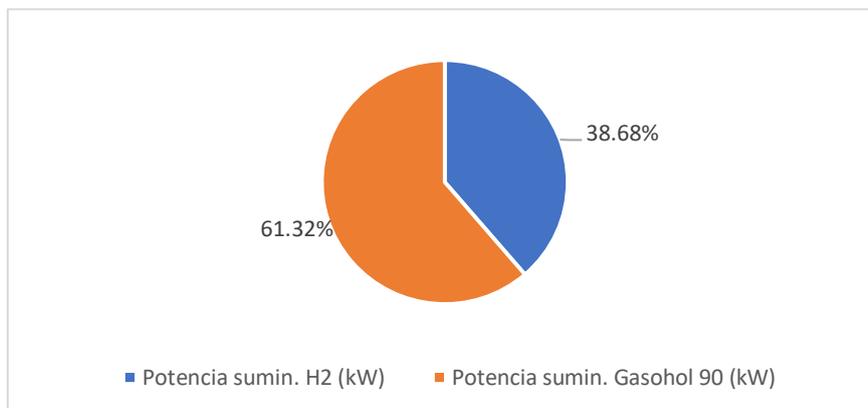
Flujo H2 (kg/sg)	Potencia sumin. H2 (kW)	Flujo Gasohol 90 (Galón/h)	Potencia sumin. Gasohol 90 (kW)	Potencia sumin. Total (kW)	Eficiencia Total GE
0,000089	10,7	0,454	17,17	30,87	19,6%
0,000089	10,7	0,446	16,96	30,66	19,8%
0,000089	10,7	0,453	17,14	30,84	19,6%
0,000089	10,7	0,458	17,27	30,97	19,6%

Nota. Elaboración propia

En relación a la tabla anterior se tiene que la proporción de potencia suministrada al motor de combustión interna a plena carga eléctrica de 30,66 kW, se tiene una proporción del 61,32% de Gasohol de 90 octanos y 38,68% de potencial de hidrogeno.

Figura 19

Proporción porcentual de potencia suministrada



Nota. Elaboración propia

c. Caso: Cargas parciales.

En el caso de la operación a cargas parciales de generación de energía en el grupo electrógeno, se presentan problemas de inestabilidad en la generación de calor suministrado durante la reacción, con fuertes golpes en la culata del motor, esto es debido a que la celda de generación de hidrogeno no cuenta con una válvula reguladora de flujo , ante lo cual al bajar la carga eléctrica, el suministro de combustible por presión baja su flujo, pero el flujo de hidrogeno es en exceso para poder regularlo generando explosiones internas, lo cual por seguridad se ha optado por no realizar experimentos a cargas parciales.

4.2 Indicadores de generación y emisiones de CO2

Se presentan los siguientes resultados de los Indicadores de generación con carga parcial de hidrogeno.

Tabla 16

Indicadores de desempeño del grupo electrógeno con suministro parcial de hidrógeno

Prueba	Potencia Efectiva (kW)	Consumo Gasohol 90 Oct. (Galon/h)	Heat Rate (Gal/kWh)	CVC (S/kWh)	Emisiones kg CO2 para 500 h
Promedio	5,478	0,446	0,081	0,204	2,115

Nota. Elaboración propia

d. Benchmarking energético.

Seguidamente se presentan los resultados del benchmarking energético entre el desempeño del grupo electrógeno a 5,478 kW de potencia eléctrica efectiva, flujo masico de hidrogeno de 0,000089 kg/sg, y con 500 horas de operación para las emisiones de gases de efecto invernadero.

Tabla 17

Benchmarking de indicadores de desempeño del grupo electrógeno con suministro parcial de hidrógeno

Prueba	Potencia Efectiva (kW)	Consumo Gasohol 90 Oct. (Galon/h)	Heat Rate (Gal/kWh)	CVC (S/kWh)	Emisiones kg CO2 para 500 h
Con suministro 100 % Gasohol 90 octanos	5,478	0,902	0,16	2,52	3,826
Con suministro parcial de H2	5,478	0,446	0,081	0,204	2,115
% de Reducción		50,5%	49,37%	91,90%	44,7%

Nota. Elaboración propia

4.4 Discusión de resultados.

Estamos de acuerdo con la investigación de (Diéguez & Gandía, 2014), cuando menciona que la conversión de motores por encendido provocado para su funcionamiento con hidrógeno es factible, sencilla y barato. En esta ocasión los materiales para la construcción del generador de hidrógeno fueron cómodos y accesibles, para acoplar el generador de hidrógeno al motor de combustión interna se realizó una modificación en el carburador para permitir el ingreso del gas de hidrógeno el cuál no fue complicado, para así obtener resultados que cumplen con el objetivo de mejorar la combustión y reducir el consumo de combustible así como disminuir las emisiones de CO2 al ambiente.

Se concuerda el artículo de investigación realizado por (Tamayo, Rosales, Guzmán, & Pazmiño, 2016), quien manifiesta un análisis a los parámetros de un motor de combustión interna de ciclo Otto que utiliza la mezcla de gasolina con hidrógeno como combustible, como resultado la potencia real tiene un aumento de 27,1 % adicionando el hidrógeno, además el consumo de combustible disminuye con la adición de hidrógeno de 401,61 g/kWh a 373,52 g/kWh. En nuestro caso el consumo con Gasohol 90 octanos es de 0,902 Gal/h, mientras que con suministro parcial de H2 presenta un consumo de 0,446 Gal/h.

Se coincide con lo concluido en la tesis de (López J. , 2018), que determina que el hidrógeno como combustible en el motor de combustión interna ocasiona una contundente reducción de emisiones de gases contaminantes. Pero debido a las altas presiones y temperaturas utilizadas en estos motores, parte del oxígeno no se quema completamente durante la combustión del combustible y el oxígeno. Esto da lugar a la combinación de nitrógeno y oxígeno no quemado, que produce óxidos y dióxidos de

nitrógeno nocivos, también conocidos como NOx. Además, hay partículas en la gasolina, algunas de las cuales son nanopartículas que escapan de la combustión y entran en el medio ambiente con los NOx. Durante mucho tiempo se ha afirmado que los motores de ciclo OTTO son más respetuosos con el medio ambiente, ya que producen menos CO2 y, por tanto, disminuyen los efectos del calentamiento global. Sin embargo, hay que reconocer que, mientras que los NOx y otras partículas tienen un impacto negativo directo en la salud humana, el CO2 es inocuo. Aunque los motores modernos emiten muchas más sustancias químicas nocivas en sus humos, los NOx y las nanopartículas han acaparado especial atención por sus repercusiones.

Aunque pueda parecer descabellado utilizar únicamente hidrógeno como combustible sin mezclarlo con ningún otro combustible carbonizado -el objetivo es avanzar hacia un sector energético descarbonizado-, la mezcla de hidrógeno con otros combustibles puede servir para establecer el H2 como solución a corto y medio plazo. Esto tiene la gran ventaja de no requerir modificaciones significativas en los motores. Otra opción es cambiar el gas natural por otro gas sintético que se fabrique utilizando CO2 e hidrógeno.

El hidrógeno es el combustible más prometedor para casi todos los tipos de vehículos del sector del transporte. Esta tecnología reduciría en un tercio las emisiones de dióxido de carbono, a pesar de su escasa densidad energética, los gastos de implantación en este tipo de vehículos y el tiempo de recarga de las baterías.

Dado que técnicas como la electrólisis permiten convertir la electricidad procedente de energías renovables en el gas utilizado como combustible, el hidrógeno es la única alternativa para una transición contaminante que puede adaptarse e incorporarse a los numerosos sectores.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

Se presentan las siguientes conclusiones:

- Se realizó la construcción del generador de hidrógeno utilizando los materiales adecuados como las placas de acero inoxidable, el acrílico, conectores BSP, tornillos y cables para lograr el funcionamiento correcto. A la vez para aumentar la velocidad de generación de hidrógeno se utilizó el compuesto KHO.
- Se evaluó el desempeño energético de un grupo electrógeno de 7.5 kW operando con gasohol de 90 octanos el cual tiene un consumo de 0,902 galones/hora suministrando un total de 30,66 kW, lo cual representa una eficiencia de 17,8% lo cual representa un Heat Rate de 0,16 Gal/kWh, un costo variable de 2,52 Soles/kWh y una reducción de emisiones de CO₂ por 500 horas de 3,826 kg de CO₂.
- Se evaluó el desempeño del grupo electrógeno operando con carga parcial de Hidrogeno, admitiendo tan solo 0,000089 kg/s de Hidrogeno para una carga eléctrica de 30,66 kW, lo que representa el 38,7 % de la potencia térmica suministrada en el motor de combustión interna, con lo cual se requiere tan solo 0,446 galones de gasohol de 90 octanos. La operación se realizó solo a carga máxima debido a que a cargas parciales existe inestabilidad en la operación del suministro de combustible.
- Se evaluó los indicadores de generación, determinándose principalmente que la reducción de dióxido de carbono es del orden de 44,7 % reduciendo desde 3,826 a 2,115 kg de CO₂ para 500 horas de operación a carga máxima de 30,66 kW.

5.2 Recomendaciones

- Para las pruebas de sustitución se recomienda instalar primero una central de hidrogeno normalizada (balones de hidrogeno incluido una red de suministro que incluya sistemas de regulación, arrestallamas, control de flujo, detectores de fuga). En función al suministro de hidrogeno con el sistema descrito se debe ir sustituyendo progresivamente el hidrogeno hasta un porcentaje tal que permita una operación segura y confiable; básicamente por la inestabilidad del hidrogeno durante la combustión.
- La inyección de hidrogeno deberá realizarse con el aire en el múltiple de admisión del motor de manera progresiva y no en el inyector junto con el petróleo BD5, debido a que esta zona es de muy alta temperatura y tendría que además incrementar la presión del hidrogeno a la salida del inyector, lo cual podría ser riesgoso.
- Se recomienda realizar un censo para actualizar la información de los trabajos realizados con hidrogeno para tener una idea acerca del avance tecnológico del empleo del hidrogeno en el Perú.
- Referente a los motores de gran capacidad, aun no se tiene experimentaciones referentes a la sustitución de gasohol por hidrogeno, es motivo de una futura investigación especial para este tipo de motores ciclo Otto cuya característica principal de los combustibles que usa es la detonación.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Á. O. Diaz Rey, J. E. (2018). *Análisis de un generador de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna*. UIS Ingenierías, vol. 17, nº 1, pp. 143-154, 2018. doi:<https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018013>.
- B. Nikhil Aniruddha, G. M. (2022). *Effect of oxy hydrogen gas addition on combustion, performance, and emissions of premixed charge compression ignition engine*. Fuel Processing Technology, vol. 227, 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107098>.
- Campos, J. (2013). *Diseño e implementación de un sistema de inyección de hidrógeno a un motor de combustión interna*. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, Universidad Católica de Santa María, Facultad de ciencias e ingenierías físicas y formales, Arequipa.
- Cancino, R. (2021). *Producción y almacenamiento de hidrógeno verde para aplicaciones energéticas en Chile*. Universidad de Chile, Departamento de ingeniería mecánica, Santiago de Chile.
- Caravantes, D., & Carbajal, J. (2022). *Potencial de producción de H₂ verde a partir de la electrólisis del agua en la región Piura*. Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Piura.
- Diéguez, P., & Gandía, L. (Noviembre de 2014). *Adaptación de un motor de combustión interna alternativo de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno como combustible. Aplicaciones energética y de automoción*. Universidad Pública de Navarra, Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales.
- Farfan, J. U. (2019). *Evaluación experimental de la emisión de los productos de la combustión de un motor gasolina Toyota 1S de 1.8L utilizando gas natural e hidrógeno bajo las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco*. Tesis de ingeniería: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Facultad de ingeniería eléctrica, electrónica, informática y mecánica, 2019. .
- G. Reyes, J. I. (2018). *Estudio de emisiones contaminantes utilizando mezcla de gasolina e hidrógeno como combustible en un motor de combustión interna a 2800 m.s.n.m*. Revista Científica y Tecnológica UPSE, vol. 5, nº 1, pp. 19-28, 2018. doi:DOI: 10.26423/rctu.v5i1.287.
- Hernán, A. (2016). *Producción de Hidrógeno a partir de materias primas renovables derivadas de biomasa*. Tesis para obtener el grado académico de Doctor, Universidad Nacional del Litoral.
- hho. (09 de 07 de 2022). *"Como funciona un motor"*. Obtenido de hho: <https://www.hho-1.com/datos-hidrogeno-hho/?lang=es>
- J. Rovira de Antonio y M. Muños Dominguez. (2015). *Motores de Combustión Interna*. UNED. doi:<https://lopezva.files.wordpress.com/2019/11/343564272-motores-de-combustioninterna.pdf>.
- LINDE AG. (2023). <http://www.linde-gas.de/>. Obtenido de <https://www.linde.com/>.
- López, J. (2018). *Alimentación de un motor monocilíndrico con hidrógeno obtenido a través de la electrólisis del agua*. Universidad Nacional de Loja, Loja - Ecuador.

- Moreno, A., & Vera, D. (2023). Implementación de un celda electrolítica de agua para un prototipo de motor ciclo otto, a fin de disminuir las emisiones de monóxido de carbono (CO). Bogotá DC, Colombia.
- Navarro. (Noviembre de 2019). *EL CICLO OTTO*. Obtenido de https://navarrof.orgfree.com/Docencia/Termodinamica/CiclosGeneracion/ciclo_otto.htm
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597-611. doi:10.1016/j.rser.2016.09.044
- Ochoa, R., & Pullay, P. (2012). *Estudio del comportamiento de los motores ciclo Otto con el uso del hidrógeno como combustible de aporte*. Tesis para obtener el grado de máster (Msc) en sistemas automotrices, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de ingeniería mecánica, Quito.
- Ortiz, C. (Diciembre de 2010). El hidrógeno y sus aplicaciones energéticas. Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/112231477/El-hidrogeno-y-sus-aplicaciones-energeticas>
- Paredes, D. (Septiembre de 2016). *Diseño, construcción y pruebas de una celda de hidrógeno para el vehículo Honda Civic 1977, como alternativa de energía renovable*. Tesis de grado para la obtención del Título de Ingeniería en Mecánica Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador, Quito.
- RODRÍGUEZ RAMÍREZ, Y. L., SANDOVAL SUÁREZ, S. A., & SANTOS MORENO, D. S. (2022). DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN GENERADOR DE HIDRÓGENO ADAPTADO A UN MOTOR DE DOS (2) TIEMPOS EN UNA BICICLETA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ. *Rev. Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, 9(18), 66-75.
- Rondán, J. (2016). *Automatización, Operación y Caracterización de un Electrolizador AEM*. Trabajo de fin de Grado, Universidad de Sevilla, Departamento de ingeniería Energética.
- Subramani, A., & Nejat, V. (2015). *Compendium of Hydrogen Energy*. Elsevier.
- Tamayo Alzate, E. D. (2022). *Modelado de un motor de combustion interna acondicionado con hidrogeno para generacion de energia*. Obtenido de REPOSITORIO UNAL: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81297/16139940.2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Tito, J. (2022). *Implementación de un Generador de Hidrógeno de un Sistema Dual Fuel Hidrógeno / Gasolina de un Vehículo Corsa Wind*. Instituto Superior Tecnológico Vida Nueva, Quito.
- Unzueta, J. C. (2020). *Aumento de la potencia en un motor comercial de encendido provocado alimentado con hidrógeno: mezclas hidrógeno-metano y combustiones anómalas*. Departamento de ingeniería: Universidad Publica de Navarra.
- Y. Romero, N. C. (2021). *Quantifying and spatial change and moving toward a low-carbon future?*. NRDC, pp. 1 - 10. doi:<https://www.nrdc.org/sites/default/files/addressing-climate-change-inperu-IB.pdf>.

VII. ANEXOS

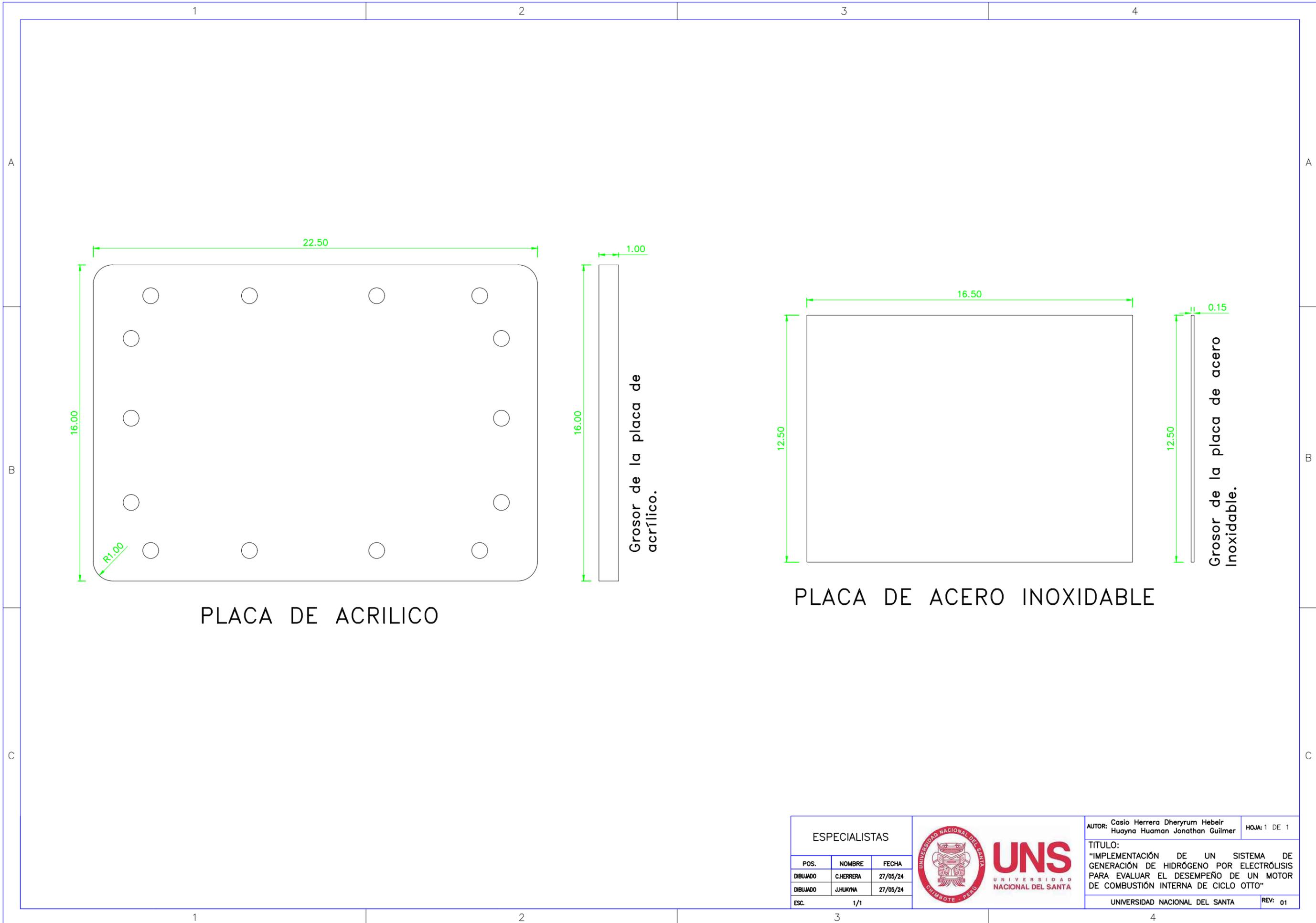
7.1 Construcción del generador de hidrógeno











PLACA DE ACRILICO

PLACA DE ACERO INOXIDABLE

ESPECIALISTAS		
POS.	NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	C.HERRERA	27/05/24
DIBUJADO	J.HUAYNA	27/05/24
ESC.	1/1	



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

AUTOR: Casio Herrera Dheryrum Hebeir Huayna Huaman Jonathan Guilmer	HOJA: 1 DE 1
TITULO: "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CICLO OTTO"	
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA	REV: 01

7.2 Funcionamiento del prototipo generador de hidrogeno



7.3 Obtención del flujo de hidrógeno





7.4 Instalación del generador eléctrico al tablero de la EPIE para su evaluación





7.5 Prueba del prototipo inyectado al generador de hidrógeno

