



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS NIVELES DE EMISIONES DE CO₂, O₂, CO Y HC, EN
UN MOTOR ESTACIONARIO DE CUATRO TIEMPOS IMPLEMENTANDO UN
GENERADOR DE HIDROGENO POR CELDA HÚMEDA**

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

AUTORES: ROMEL LEANDRO CAYAMCELA GUAMÁN

FERNANDO JOSÉ CÁRDENAS INGA

TUTOR: ING. FREDY GONZALO TACURI MOSCOSO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Romel Leandro Cayamcela Guamán con documento de identificación N° 0302678602 y Fernando José Cárdenas Inga con documento de identificación N° 0302935648; manifestamos que:

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

Cuenca, 12 de julio del 2023

Atentamente,



Romel Leandro Cayamcela Guamán

0302678602



Fernando José Cárdenas Inga

0302935648

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

Nosotros, Romel Leandro Cayamcela Guamán con documento de identificación N° 0302678602 y Fernando José Cárdenas Inga con documento de identificación N° 0302935648, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Análisis comparativo de los niveles de emisiones de CO₂, O₂, CO y HC, en un motor estacionario de cuatro tiempos implementando un generador de hidrogeno por celda húmeda”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 12 de julio del 2023

Atentamente,



Romel Leandro Cayamcela Guamán

0302678602



Fernando José Cárdenas Inga

0302935648

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fredy Gonzalo Tacuri Moscoso con documento de identificación N° 0103369542, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS NIVELES DE EMISIONES DE CO₂, O₂, CO Y HC, EN UN MOTOR ESTACIONARIO DE CUATRO TIEMPOS IMPLEMENTANDO UN GENERADOR DE HIDROGENO POR CELDA HÚMEDA, realizado por Romel Leandro Cayamcela Guamán con documento de identificación N° 0302678602 y por Fernando José Cárdenas Inga con documento de identificación N° 0302935648, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 12 de julio del 2023

Atentamente,



Ing. Fredy Gonzalo Tacuri Moscoso, Msc

0103369542

DEDICATORIA 1

A mis queridos padres, Juan Cayamcela y Susana Guamán, quienes siempre han sido mi roca y mi mayor fuente de inspiración, quiero dedicarles de todo corazón este proyecto. Vuestra dedicación inquebrantable y sacrificio para asegurarme una educación. Sin vuestra guía, aliento constante y amor incondicional, este logro no sería posible. Esta tesis es tan vuestra como mía, porque lleva impresa vuestra influencia y enseñanzas.

A mi hermana Tannya Cayamcela, le dedico este proyecto por estar siempre a mi lado, animándome y creyendo en mí incluso cuando dudaba de mis propias habilidades. Vuestro apoyo incondicional y palabras de aliento me han dado la fuerza y la confianza necesaria para superar los obstáculos y alcanzar este hito.

Con humildad, gratitud y un corazón lleno de alegría, dedico esta tesis a todos vosotros. Sin vuestra presencia y amor, nada de esto sería posible.

Romel Leandro Cayamcela Guamán

DEDICATORIA 2

Este trabajo de titulación va dedicado primeramente a Dios, por brindarme calma y mucha determinación en el desarrollo de mis actividades académicas y en mi trabajo de titulación. Por no abandonarme en las etapas difíciles de este camino y siempre mostrarme el camino correcto hacia mis metas.

A mis padres Inés Inga y Abel Cárdenas, por brindarme la oportunidad de desarrollarme académicamente y brindarme todo su apoyo en este camino que ha sido largo y complicado, ya que sin ellos este proceso no sería posible. Por sus valores enseñados, para convertirme en una persona humilde y que no abandona sus objetivos.

De igual manera a mis hermanos Angelica Cárdenas y Carlos Cárdenas, que con sus palabras de motivación han permitido que darme fuerzas en mis actividades, y no rendirme en el desarrollo de estas.

Fernando José Cárdenas Inga

AGRADECIMIENTO 1

En primer lugar, agradezco a Dios por el conocimiento y la oportunidad de estudiar que me otorgo, en segundo lugar, quiero a mis padres, Juan Cayamcela y Susana Guamán. Vuestra confianza en mí y vuestro constante respaldo han sido mi mayor motivación. por inculcarme los valores fundamentales que me han guiado hasta este punto.

A mi compañero de investigación Fernando Cárdenas, agradezco su colaboración y compromiso en este proyecto. ha aportado habilidades únicas y perspectivas valiosas.

A mi tutor de tesis el Ing. Fredy Tacuri, agradezco por su paciencia y por brindar sus conocimientos para que este proyecto se pueda llevar a cabo de la mejor manera. Con sincero agradecimiento, a mis mentores y profesores, gracias por compartir vuestro conocimiento, sabiduría y experiencia conmigo.

Con gratitud y emoción, me agradezco a mí mismo, por el esfuerzo y dedicación.

Romel Leandro Cayamcela Guamán

AGRADECIMIENTO 2

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la vida y la oportunidad de poder desarrollar mis actividades universitarias y este trabajo de titulación, en segundo lugar, agradezco a mi familia, especialmente a mis padres Inés Inga y Abel Cárdenas, por la confianza depositada y constante respaldo que han sido la mayor motivación.

Agradezco a mi compañero de investigación Romel Cayamcela por su colaboración, dedicación y compromiso en el desarrollo de este proyecto, aportando habilidades únicas y motivación en el transcurso del proyecto.

A mi tutor de tesis el Ing. Fredy Tacuri, agradezco por brindarnos sus conocimientos para que el desarrollo de este proyecto de lo lleve de la mejor manera. De igual manera agradezco a todas las personas docentes que me acompañaron en el transcurso de mis actividades académicas, compartiendo sus conocimientos y sabiduría, ayudándome a crecer académica y personalmente.

Fernando José Cárdenas Inga

Resumen

El propósito de esta investigación es la evaluación de un motor de encendido provocado estacionario mediante la utilización de una celda de hidrógeno de tipo húmedo como fuente de combustible. En busca de la reducción de las emisiones y llevar a cabo un análisis de las variables de contaminación, tales como HC, CO, CO₂ y O₂.

En el primer capítulo se realizó una investigación basada en la recopilación de fuentes bibliográficas acerca de la implementación de hidrogeno en motor de combustión interna, donde se analiza detalladamente su funcionamiento y se examinan algunos de sus parámetros clave. También se estudian las propiedades físicas, químicas y termodinámicas del hidrógeno, así como los métodos utilizados en su producción, almacenamiento, proceso de combustión, entre otros.

El segundo capítulo se enfoca en el diseño y ensamble de la celda de tipo húmedo llevando a cabo las pruebas y cálculos necesarios para el suministro de combustible logrando así el funcionamiento del motor estacionario, posteriormente se obtiene mediciones de emisiones con gasolina e hidrogeno como combustible principal, con el objetivo de recopilar 20 muestras para cada tipo de combustible y llevar a cabo su análisis correspondiente.

Por último, en el tercer capítulo se realiza un análisis estadístico básico de las pruebas de emisiones con el fin de visualizar el comportamiento de las variables de estudio, permitiendo determinar de manera más clara y concisa la reducción de gases, que en este caso fue de 86.07% CO₂, 68.19% CO, 26.42% O₂ y 100% HC.

Palabras Clave: hidrogeno, húmeda, celda, gases, estacionario.

Abstract

The purpose of this research is the evaluation of a stationary ignition engine using a wet type of hydrogen cell as a fuel source. In search of reducing emissions and carrying out an analysis of pollution variables such as HC, CO, CO₂ and O₂.

In the first chapter, a research based on the compilation of bibliographic sources about the implementation of hydrogen in internal combustion engine was carried out, where its operation is analyzed in detail and some of its key parameters are examined. The physical, chemical, and thermodynamic properties of hydrogen are also studied, as well as the methods used in its production, storage, combustion process, among others.

The second chapter focuses on the design and assembly of the wet-type cell, carrying out the necessary tests and calculations for the fuel supply, thus achieving the operation of the stationary engine. Subsequently, emission measurements are obtained with gasoline and hydrogen as the main fuel, with the objective of collecting twenty samples for each type of fuel and carrying out the corresponding analysis.

Finally, in the third chapter a basic statistical analysis of the emissions tests is carried out to visualize the behavior of the study variables, allowing to determine more clearly and concisely the reduction of gases, which in this case was 86.07% CO₂, 68.19% CO, 26.42% O₂ and 100% HC.

Keywords: *hydrogen, wet, cell, gases, stationary.*

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA 1	5
DEDICATORIA 2	6
AGRADECIMIENTO 1	7
AGRADECIMIENTO 2	8
RESUMEN	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN	18
PROBLEMA	19
ANTECEDENTES.....	20
IMPORTANCIA Y ALCANCES	21
DELIMITACIÓN.....	21
OBJETIVOS.....	22
OBJETIVO GENERAL	22
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
CAPÍTULO 1. DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE DOCUMENTOS	
BIBLIOGRÁFICOS EN BASE A LA TEMÁTICA ESTABLECIDA SOBRE LA	
UTILIZACIÓN DEL HIDROGENO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN	
INTERNA.	
1.1. INTRODUCCIÓN	23
1.2. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LA UTILIZACIÓN DEL HIDROGENO COMO COMBUSTIBLE Y EL PROCESO DE ELECTROLISIS.....	23
1.2.1. <i>Método de obtención</i>	23
1.2.2. <i>Hidrogeno como combustible</i>	24
1.3. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LA UTILIZACIÓN DEL HIDROGENO COMO COMBUSTIBLE EN MOTORES DE CUATRO TIEMPOS A GASOLINA.	27
1.3.1. <i>Comportamiento térmico del hidrogeno</i>	27

1.3.2. Beneficios del hidrogeno en los motores.....	29
1.4. FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA CELDA HÚMEDA	30
1.4.1. Celdas de hidrogeno.....	30
1.4.2. Celda húmeda.....	32
1.4.3. Funcionamiento de una celda húmeda.....	33
1.5. PROPIEDADES DE COMBUSTIÓN DEL HIDROGENO.....	35
1.5.1. Propiedades químicas y termodinámicas del hidrogeno.....	35
1.5.2. Pre - encendido y golpe del hidrogeno.....	40
CAPITULO 2, ELABORACIÓN DE LA CELDA DE HIDROGENO TIPO	
HÚMEDA E IMPLEMENTACIÓN EN EL MOTOR ESTACIONARIO.....	42
2.1. INTRODUCCIÓN	42
2.2. DISEÑO DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO POR CELDA HÚMEDA PARA UN MOTOR	
ESTACIONARIO.....	42
2.2.1. Descripción del motor.....	42
2.2.2. Cantidad de hidrógeno requerida para el motor	43
2.2.2.1. Tasa de consumo de combustible	44
2.2.2.2. Relación de mezcla aire-combustible para el motor.	44
2.2.2.3. Densidad del hidrógeno.....	45
2.2.2.4. Cantidad de masa de hidrogeno a utilizar.	46
2.2.2.5. Reacción química necesaria para el motor.	47
2.2.3. Cálculo de la Cantidad de hidrógeno requerida para el motor.....	48
2.3. DISEÑO DE LA CELDA EN BASE AL CÁLCULO DE HIDROGENO EN FUNCIÓN DE LA	
NECESIDAD DEL MOTOR	51
2.3.1. La tasa de producción de hidrógeno que se desea obtener.....	51
2.3.2. La eficiencia de la celda en la conversión de energía eléctrica en hidrógeno.	51
2.3.3. La corriente eléctrica para la electrolisis.....	51
2.3.4. Cálculo de la cantidad de electricidad necesaria	52
2.3.5. El área superficial de los electrodos y la distancia entre ellos.....	52
2.3.5.1. Cálculo de la superficie del electrodo:	53
2.3.5.2. Cálculo de la distancia óptima entre los electrodos:	53
2.3.6. El volumen y concentración de electrolito.	54

2.3.6.1. Volumen del electrolito:	54
2.3.6.2. Concentración del electrolito:	54
2.3.7. <i>Cálculo del consumo de energía para la electrolisis</i>	54
2.4. ESPECIFICACIONES CALCULADAS PARA LA CELDA A DISEÑAR	55
2.5. MATERIALES	55
2.5.1. <i>Acero Inoxidable</i>	57
2.5.2. <i>Contenedor de la celda</i>	57
2.5.3. <i>Electrolito</i>	58
2.6. DISEÑO DE LAS PLACAS DE LA CELDA HÚMEDA EN BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y EL TIPO DE MATERIAL	58
2.6.1. <i>Celda ideal</i>	59
2.6.2. <i>Celda calculada ideal</i>	59
2.6.3. <i>Celda en base al volumen del contenedor.</i>	60
2.7. REQUERIMIENTO DE LAS PLACAS.....	60
2.8. PROCESOS DE DISEÑO	61
2.9. DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES Y ELEMENTOS DE LA CELDA.....	63
2.10. MANUFACTURA	64
2.10.1. <i>Procesos de manufactura de componentes</i>	64
2.11. FASES DE INSTALACIÓN DE COMPONENTES EN LA CELDA	65
2.12. PROCESO DE ENSAMBLE DE LA CELDA AL MOTOR DE CUATRO TIEMPOS	68
2.13. PROCESO DE MEDICIÓN DE GASES	69
2.13.1 <i>Proceso de medición de gases (Gasolina)</i>	69
2.13.1.2.Resultados de medición de gases con gasolina	71
2.13.2. <i>Proceso de medición de gases (Hidrogeno)</i>	72
2.13.2.2.Resultados de medición de gases con hidrogeno.....	74
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE ESTADÍSTICA BÁSICA	76
3.1. INTRODUCCIÓN	76
3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	76
3.2.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO DE LAS EMISIONES PARA EL MOTOR FUNCIONANDO CON GASOLINA.....	77

3.2.1.1. Media aritmética.....	77
3.2.1.2. Desviación estándar	78
3.2.1.3. Error	78
3.2.1.4. Intervalo de confianza	79
3.2.2.1. Media aritmética.....	80
3.2.2.2. Desviación estándar	81
3.2.2.3. Error	82
3.2.2.4. Intervalo de confianza	83
3.2.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE GASOLINA RESPECTO A HIDROGENO	83
3.2.3.1. Análisis comparativo de CO ₂	83
3.2.3.2. Análisis comparativo de CO.	84
3.2.3.3. Análisis comparativo de O ₂	85
3.2.3.4. Análisis comparativo de HC.	85
3.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE EMISIONES CON GASOLINA RESPECTO A HIDROGENO..;ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
CONCLUSIONES	88
RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de celdas y sus distintos electrolitos.....	31
Tabla 2 Propiedades químicas y termodinámicas del hidrogeno.	36
Tabla 3 Poder calorífico de determinados combustibles.....	37
Tabla 4 Resultados del hidrogeno en la ecuación estequiométrica	39
Tabla 5 Propiedades del hidrogeno 25 °C y 1 atm.	40
Tabla 6 Especificaciones del motor generador a utilizar en el proyecto.....	42
Tabla 7 Datos para el cálculo de la tasa de consumo del motor.....	44
Tabla 8 Datos para el cálculo de la masa del hidrogeno	46
Tabla 9 Cantidad de hidrógeno requerida para la operación de un motor de combustión.	48
Tabla 10 Resultados obtenidos para el diseño de una celda en base al motor a analizar.	55
Tabla 11 Tipos de materiales.....	56
Tabla 12 Producción de hidrogeno según características de armado.....	59
Tabla 13 Descripción de materiales	63
Tabla 14 Descripción de manufacturado.....	64
Tabla 15 Proceso de ensamblaje de la celda	65
Tabla 16 Celda armada.....	66
Tabla 17 Preparación de tapas de filtros para unión con la celda.	67
Tabla 19 Procedimiento para la medición de gases	70
Tabla 20 Datos de medición con gasolina.....	71
Tabla 21 Datos de medición con hidrogeno	74
Tabla 22 Minitab media aritmética gasolina	77
Tabla 23 Análisis de media aritmética	77

Tabla 24 Minitab desviación estándar.....	78
Tabla 25 Análisis desviación estándar.....	78
Tabla 26 Minitab error estándar.....	79
Tabla 27 Análisis error estándar gasolina.....	79
Tabla 28 Análisis intervalo de confianza gasolina.....	79
Tabla 29 Minitab media aritmética hidrogeno.....	80
Tabla 30 Análisis media aritmética.....	81
Tabla 31 Análisis desviación estándar hidrogeno.....	81
Tabla 32 Análisis desviación estándar.....	81
Tabla 33 Minitab error estándar hidrogeno.....	82
Tabla 34 Análisis error estándar.....	82
Tabla 35 Análisis intervalo de confianza hidrogeno.....	83
Tabla 36 Comparación medias aritméticas.....	86

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Posición geográfica	21
Ilustración 2 Consumo de hidrogeno nivel mundial en 2020.....	26
Ilustración 3 Demanda de hidrogeno.....	26
Ilustración 4 Proceso de electrolisis	34
Ilustración 5 Proceso de combustión del hidrogeno.....	36
Ilustración 6 Valor energético del combustible.....	38
Ilustración 7 Energías mínimas de ignición	41
Ilustración 8 Grafica de la curva de segundo grado.....	49
Ilustración 9 Componentes de la celda.....	62
Ilustración 10 Componentes del generador	62
Ilustración 11 Depósito de combustible retirado.....	68
Ilustración 12 Montaje de celdas sobre el motor.....	68
Ilustración 13 Pesaje cantidad de hidróxido de sodio	72
Ilustración 14 Ánodo y cátodo de la celda	73
Ilustración 15 Pruebas de almacenaje de hidrogeno	73
Ilustración 16 Regulación en tornillo	74
Ilustración 17 Gráfica de series de tiempo de CO ₂ Hidrogeno, CO ₂ Gasolina.....	84
Ilustración 18 Grafica de series de tiempo de CO hidrógeno, CO Gasolina.....	84
Ilustración 19 Grafica de series de tiempo de O ₂ Hidrogeno, O ₂ Gasolina.....	85
Ilustración 20 Grafica de series de tiempo de HC Hidrogeno, HC Gasolina.....	86
Ilustración 21 Grafica de comparación de emisiones.....	¡Error! Marcador no definido.

Introducción

El presente trabajo de titulación tiene como enfoque principal el estudio de emisiones a través del uso de combustibles alternativos como lo es el hidrogeno en un motor estacionario de cuatro tiempos, con el fin de procurar la disminución de combustibles fósiles que generan grandes cantidades de contaminación.

El trabajo se enfocará de la misma manera en la generación de hidrogeno a partir del uso de una celda húmeda, que será añadida al motor, proporcionando los datos necesarios para el análisis estadístico de este y poder proporcionar la información necesaria para la implementación del hidrogeno en este tipo de motores.

Para esto se lleva un análisis bibliográfico sobre el hidrógeno y su forma de producción, que en este caso fue a través del uso de celdas húmedas, después se enfoca en el diseño, proceso de manufactura y ensamble, para así realizar respectivas mediciones con el motor a gasolina e hidrogeno obteniendo los datos de sus emisiones.

Al final con la ayuda del software Minitab versión 19 se obtendrá la Media Aritmética, Desviación estándar, Error e Intervalos de confianza, con esto realizar realizando un análisis descriptivo de emisiones con gasolina, un análisis descriptivo de emisiones con hidrogeno y un comparativo de las medias de emisiones entre gasolina e hidrogeno, obteniendo una disminución significativa en las emisiones de CO₂ con una reducción del 86,07% y en las emisiones de HC con una reducción del 100%.

Problema

Uno de los problemas que afecta a todos es la contaminación ambiental, siendo una de las fuentes los gases de combustión de los motores de encendido provocado, según la O.M.S, las emisiones contaminantes de gases producidas por un motor de combustión interna de cuatro tiempos son aproximadamente de un 5 % de dióxido de azufre, 25 % de dióxido de carbono, 87 % de monóxido de carbono y 66 % de óxidos de nitrógeno. (O.M.S – Organización Mundial de la Salud, 2023) El promedio de la suma de estos gases contaminantes es de 2100 partes por millón, el ser humano puede estar expuesto hasta un límite de 1000 partes por millón sin ser peligroso, según la International Energy Agency (IEA), los motores estacionarios son un claro ejemplo de contaminación ya que no poseen regulación de gases contaminantes, una de las alternativas de solución a este problema es utilizar una fuente de combustible renovable o ecológico, el hidrogeno es una propuesta de combustible, tiene cero emisiones de gases contaminantes, e implementarlo a un motor de cuatro tiempos estacionario ayudaría a reducir notablemente las emisiones contaminantes. (International Energy Agency (IEA – International Energy Agency, 2023.)

Antecedentes

Por el aumento de la demanda de la energía eléctrica se ha incrementado la generación a través de motores de combustión interna, lo que ha originado un aumento significativo de la contaminación a través de los gases de escape, generando un daño en el medio ambiente. La contaminación ambiental es el medio de mayor incidencia en la salud de las personas y con esto reduciendo la calidad y expectativa de vida.

Según las directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire, los efectos combinados de la contaminación del aire ambiente se asocian a 6,7 millones de muertes prematuras cada año se estima que en 2022 la contaminación del aire ambiente por gases de hidrocarburos provocó en todo el mundo 4,2 millones de muertes prematuras debido a personas que viven en países de ingreso bajo y mediano soportando de forma desproporcionada la carga que supone la contaminación del aire exterior, ya que el 89% de los 4,2 millones de muertes prematuras ocurren en esas zonas. (O.M.S – Organización Mundial de la Salud, 2023)

Em base a cifras del Ministerio del Ambiente del país de Ecuador, B1 país perdió más de 115.000 hectáreas de bosques nativos entre los años de 2016 y 2018. ¡Esta situación no se considera un problema grave, al considerar el rol de los árboles en la regulación de la temperatura ambiental y para la eliminación del dióxido de carbono (CO₂)! Las emisiones per cápita de CO₂ han aumentado en casi una tonelada métrica en el Ecuador. El FMI señala que el costo social de la contaminación local del aire, los accidentes y los daños causados a las carreteras por el uso excesivo de energía subsidiada en la nación fue 1.6 veces mayor que el costo fiscal de los subsidios energéticos en el 2015. (Home | Regional Observatory on Planning for Development, 2023.)

Importancia y alcances

Con el desarrollo de este proyecto se evaluará los niveles de contaminación emitidos por un motor estacionario de 4 tiempos de encendido provocado mediante la adaptación de un combustible ecológico como es el hidrogeno, el mismo que se alinea con los objetivos de uso de Energía Asequible, no contaminantes y la Acción por el clima establecidos por el programa de Desarrollo Sostenible de la Organización Mundial de las Naciones Unidas y el programa de creación de oportunidades 2021-2025 de la secretaria nacional de planificación del Ecuador en el apartado de Gestión del Territorio para la Transición Ecológica, que establece el ahorro de combustible de petróleo, optimizando el proceso de generación eléctrica y de eficiencia energética en el sector de hidrocarburos.

Delimitación

El presente proyecto, se lo llevara a cabo en la Provincia del Azuay, Ciudad de Cuenca, Universidad Politécnica Salesiana, encontrada al sur del Ecuador, a una altitud de 2538 m.s.n.m, y una población de 580000 habitantes.

Ilustración 1 *Posición geográfica*



Nota. Mapa de la Universidad Politécnica en la ciudad de Cuenca. Fuente: Google Maps.

OBJETIVOS

Objetivo General

Comparar los niveles de emisiones de CO₂, O₂, CO y HC, en un motor estacionario de cuatro tiempos, implementando un generador de hidrógeno por celda húmeda.

Objetivos específicos

- Desarrollar un análisis de documentos bibliográficos en base a la temática establecida sobre la utilización del hidrogeno en motores de combustión interna.
- Elaborar la celda de hidrogeno tipo húmeda y mediante la implementación en el motor estacionario se evaluará las emisiones.
- Analizar los resultados obtenidos mediante estadística básica.

1. Capítulo 1. Desarrollo del análisis de documentos bibliográficos en base a la temática establecida sobre la utilización del hidrogeno en motores de combustión interna.

1.1.Introducción

Este capítulo, primero se enfocará en el análisis bibliográfico acerca de las diferentes formas de obtener hidrogeno y como implementarlo, se identificará el comportamiento de este y los beneficios de uso en motores de combustión interna. La investigación prioriza el uso de celdas para la generación de hidrogeno, primando el uso de celdas húmedas.

1.2.Análisis bibliográfico de la utilización del hidrogeno como combustible y el proceso de electrolisis

El hidrogeno como combustible es una propuesta planteado décadas atrás por sus beneficios ambientales de acuerdo con Vásquez Freire en el proyecto de investigación de la Universidad Politécnica Salesiana denominado “Optimización de un prototipo para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua utilizando materiales existentes en el mercado nacional, aplicando normas internacionales”, manifiesta que las ventajas del uso del hidrógeno como fuente de en la combustión del hidrógeno genera como resultado agua, trabajando de esta manera, en un ciclo ecológico cerrado; por lo tanto, utilizan agua en la producción y despidiendo agua en el ambiente. (Vásquez, 2009)

1.2.1. Método de obtención

La propuesta más simple de extraer hidrogeno es el proceso de electrolisis, pero posee limitaciones de eficiencia y de rendimiento de extracción dando como resultado un 60 % de fiabilidad de obtención de hidrogeno, de acuerdo con Alfredo Ursúa del departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pública de Navarra en el artículo científico

presentado en la IEEE Xplore denominado “ Producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua: estado actual y tendencias futuras” manifiesta que actualmente, los electrolizadores de membrana de electrolito polimérico (PEM) y alcalinos estos son seguros y confiables, pero solo los electrolizadores alcalinos tienen una capacidad suficientemente grande para producir energía a tasas significativas o de producción de hidrógeno como combustible, mediante sus investigación se concluyó, que su capacidad de producción tiene que aumentar considerablemente a largo plazo para satisfacer la demanda de hidrógeno, debido a que los electrolizadores son con mayor frecuencia del tipo alcalino que trabajan a presión atmosférica, presiones intermedias (4 - 30 bar) e incluso presiones muy altas (448 bar). (Ursúa, 2011)

El hidrógeno producido por electrólisis es la opción más rentable, pero produce un rendimiento energético bajo, debido al consumo energético en la reacción química, en un estudio de investigación desarrollado por Santanu Ghosh publicado en Scrivener Publishing LLC denominado “Sistemas de producción de hidrógeno impulsados por energía geotérmica”, manifiesta que en un ciclo ideal de electrólisis, la energía eléctrica demandada por la reacción disminuye a medida que aumenta la temperatura; por otro lado, la demanda térmica aumenta. En estado líquido, el consumo total de energía disminuye ligeramente a medida que aumenta la temperatura, dando como resultado un proceso eficiente de conversión de energía. (Santanu Ghosh, 2023)

1.2.2. Hidrógeno como combustible

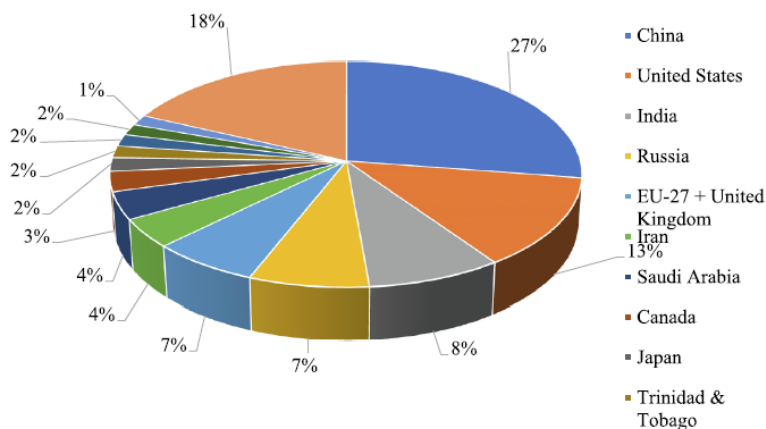
Al obtener el hidrógeno por electrólisis este combustible se puede utilizar en motores de combustión interna provocado, este tipo de combustible tiene como principal características la reducción de emisiones al usarse puro como combustible o en una mezcla con otro tipo de combustible por ejemplo la gasolina o diésel, la reducción de gases de escape contaminantes fue

evidente en la Simulación/modelado termodinámico AVL Boost presentado por Achmad Praptijanto perteneciente al laboratorio de Motores de Combustión Interna, Centro de Investigación de Energía Eléctrica y Mecatrónica, Bandung, Indonesia, en este documento se procederá a desarrollar una simulación para predecir fenómenos de comparación termodinámicos entre la modificación del motor de combustión interna que usa combustible de hidrógeno y los parámetros estándar bajo el método de prueba transitorio y la mezcla con otros combustibles de hidrocarburo. En este trabajo se analizará el desempeño, emisiones, combustión y procesos termodinámicos en el motor de combustión interna. La simulación se realiza en varios parámetros, como carga, velocidad de marcación y diferentes mezclas de combustible de H₂ y diésel. Esta simulación dio como resultado que el valor de NO_x. Después del ciclo 40, el mayor contenido de hidrógeno de los valores de NO_x (0,00009) producirá poco o casi cerca de su valor con el combustible diésel (0,00003). La mayor concentración de NO_x se debe a la temperatura máxima de combustión en el cilindro, que puede ser superar con enfriamiento de carga de entrada. (Praptijanto, 2017)

En base a las investigaciones anteriormente presentadas se puede considerar que es una opción rentable como remplazo a los combustibles de hidrocarburo. En 1970 el electroquímico John Bockris anuncia que el hidrógeno será el combustible más usado en el futuro, dirigiendo la economía hacia la producción de este. (BAIRD, 2001). Hoy en día es una propuesta de combustible que ya está en uso en diferentes países como se observa en la ilustración 2.

Ilustración 2

Consumo de hidrogeno nivel mundial en 2020.

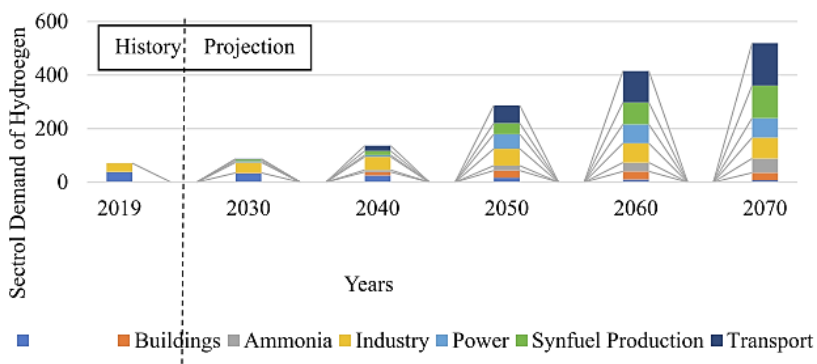


Nota. Grafica del consumo de hidrogeno a nivel mundial en el año 2020. Fuente: (Shubham Kakran, 2022)

El hidrogeno como todo combustible crea una demanda energética en su utilización en diversas áreas como el transporte o la industria, en todo proceso que necesite un combustible como fuente de energía la demanda se correlaciona con el paso del tiempo en base al cambio energético a medida que las reservas de combustibles fósiles se reducen la demanda por un combustible ecológico y sustentable se incrementa como se observa en la ilustración 2.

Ilustración 3

Demanda de hidrogeno



Nota. Grafica de la demanda a través de diferentes sectores a nivel mundial desde el 2019 en proyección al 2070 (Shubham Kakran, 2022)

1.3. Análisis bibliográfico de la utilización del hidrogeno como combustible en motores de cuatro tiempos a gasolina.

El hidrogeno se ha implementado de diferentes formas como el enriquecimiento del aire en la admisión como parte de la mezcla con un hidrocarburo como es la gasolina, o como remplazo a la gasolina siendo hidrogeno más el aire.

Este combustible de hidrógeno también adquiere el nombre oxihidrógeno al ser producido por una celda de tipo húmedo o seco, este combustible tiene un mayor valor calórico y octanaje, donde influirá en la capacidad de una mayor capacidad de explosión del combustible, lo que hará que la potencia aumente y el proceso de combustión sea más eficiente, en el artículo de investigación de RifAh Amalia en el Simposio Internacional de Electrónica 2018 sobre Tecnología y Aplicaciones de Ingeniería (IES-ETA), denominado “Análisis de rendimiento y gases de escape de un motor de cuatro tiempos que utiliza gas oxihidrógeno como combustible suplementario” en esta investigación se introdujo gas oxihidrógeno en el motor de cuatro tiempos, la potencia del eje puede aumentar al aumentar la apertura del acelerador y la concentración varió en 1 – 7 g/L. La máxima potencia efectiva al eje obtenida fue de 1742,57 W. El aumento de la potencia efectiva fue de un 20% al eje, en conclusión, la adición de gas oxihidrógeno hace que el proceso de combustión sea más eficiente porque el oxihidrógeno reaccionará directamente sin retardo de ignición por propagación. (Amalia, Pratilastiarso, Prasetya, & Fadhilah, 2018)

1.3.1. Comportamiento térmico del hidrogeno

En la anterior investigación se plantea el funcionamiento ideal del hidrógeno como combustible en un motor de cuatro tiempos pero de manera teórica, de acuerdo al trabajo de titulación de Jaime Jordán en la Universidad Politécnica Salesiana denominado “Diseño de un prototipo para un sistema de alimentación de gas hidrógeno como combustible alternativo para un

motor de ciclo” , los resultados muestran que un motor funcionando con hidrógeno presenta un mayor trabajo neto en comparación con el de la gasolina, considerando las mismas RPM, presión de admisión y % de exceso de aire. Además, se requiere una menor cantidad de masa de hidrógeno para su funcionamiento. Sin embargo, la eficiencia térmica del ciclo Otto con hidrógeno es menor debido a que la combustión del hidrógeno genera vapor de agua, lo cual enfría el ciclo. (Jaime Jordán, 2010)

En el proyecto de titulación de Bastidas Molina en la Universidad Politécnica Salesiana denominado “Análisis termodinámico de un motor de encendido provocado funcionando con mezclas enriquecidas en oxígeno e hidrógeno obtenidos mediante electrólisis del agua”, se ha implementado una celda de hidrógeno de tipo seco en un vehículo Citroën C-Elysée. Mediante pruebas de laboratorio, vehículo y dinamómetro de chasis, se han analizado parámetros termodinámicos y de gases de escape considerando la mezcla de aire, hidrógeno y gasolina. Los resultados muestran que no es una opción viable para implementar en un vehículo de combustión interna, ya que un automóvil con aporte de gas oxihidrógeno presenta características de funcionamiento similares al vehículo con autonomía estándar a bajas revoluciones. Los análisis realizados en el analizador de gases muestran que un vehículo con aporte energético de gas oxihidrógeno a bajas revoluciones presenta un aumento notable de hidrocarburos no combustionados y dióxido de carbono. Sin embargo, a partir de 2000 RPM, los hidrocarburos no combustionados se reducen considerablemente y a partir de las 3000 RPM, el porcentaje de dióxido de carbono disminuye. Esto indica que el hidrógeno reduce significativamente los gases contaminantes de escape al combinarse con la gasolina en altas revoluciones por minuto. (Bastidas Molina, 2022)

1.3.2. Beneficios del hidrogeno en los motores.

Fuera de ser solo un combustible el hidrogeno también se considera un aditivo en la mezcla de aire combustible, se suministra a través de la admisión, esto tiene muchos beneficios como potenciar la mezcla y retrasa la autoignición, en la investigación de Md. Nurun Nabí de la Universidad Central de Queensland, Perth, WA, Australia, denominado “Evaluación de la influencia de la proporción de hidrógeno en el rendimiento, la combustión y las emisiones en un motor de gasolina de cuatro tiempos”, en el cual se realizó un modelado 1-D con GT-Suite y ANSYS para un motor de gasolina de cuatro tiempos, donde la gasolina se inyecta directamente mientras que el hidrógeno se inyecta en el colector de admisión para una velocidad del motor de 1500 rpm. Además, la modelación se realizó para relaciones de exceso de aire de 1,1 a 1,5 con un incremento de 0,1 para gasolina pura (combustible de referencia) y diferentes combustibles de hidrógeno, dio como resultado Los combustibles de hidrógeno de fracción inferior (H_2 3,99 %, H_2 5,87 %, H_2 7,68 %, H_2 9,41 % y H_2 11,09 %) tienen una buena concordancia en los BMEP (Brake Medium Effective Pressure) entre simulación y resultados experimentales. Los datos de presión y temperatura en el cilindro también tienen una buena alineación entre GT-Suite y ANSYS. La eficiencia energética, la tasa de exergía y energía, y las eficiencias de combustión para los tres combustibles de hidrógeno (H_2 15%, H_2 20% y H_2 25%) son significativamente más altas que las de la gasolina de referencia (H_2 0%). Se encontró que la presión efectiva media instantánea indicada era sustancialmente más alta en comparación con la gasolina pura. (Nabi, 2022)

En el proyecto de titulación de Edison Quezada en la Universidad Politécnica Salesiana desarrollo la implantación de hidrogeno como aditivo al aire de admisión para mejorar y estudiar el rendimiento de un vehículo a gasolina de cuatro tiempos, el proyecto se denomina “Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo Chevrolet steem

1.6L”, Los resultados del estudio revelaron que al agregar gas hidrógeno a la mezcla aire-combustible, se logra reducir el porcentaje de emisiones contaminantes liberadas al medio ambiente. La producción de gas hidrógeno está directamente relacionada con el área de las placas y la intensidad de corriente que fluye a través de ellas, lo cual depende de la cantidad de solución utilizada. Los mejores resultados se observaron en la reducción de hidrocarburos, como se evidenció en el caso del Kia Sportage, donde se logró disminuir de 24 ppm a 5 ppm. En cuanto a la temperatura de la flama adiabática, se obtuvo un valor aproximado de 2370.43 K para el vehículo que funcionaba con gasolina, mientras que con el generador de hidrógeno se alcanzó una temperatura de 2601.43 K. Esto indica que se logra una combustión más eficiente al utilizar hidrógeno como combustible. (Edison Quezada, 2014)

1.4.Fundamento teórico de la celda húmeda

La utilización del hidrogeno tiene como principal objetivo la reducción de gases contaminantes de escape ya sea como un aditivo o como combustible puro, en este proyecto se implementa una celda de tipo húmeda en un motor de cuatro tiempos en remplazo a la gasolina, para ello se debe conocer el fundamento teórico relacionado con celdas de hidrogeno de tipo húmedo.

1.4.1. Celdas de hidrogeno

Una celda de combustible genera electricidad a través reacciones químicas. Muchas de ellas actualmente tienen una eficiencia de hasta el 60 %, con algunas modificaciones tecnológicas, podrían alcanzar casi un 100 %.

De acuerdo con el libro "Fundamentos de las Celdas de Combustible" del Doctor Ryan P. O'Hayre, investigador del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Stanford, se

identifican varios tipos de pilas de combustible, cada una con un principio de funcionamiento distinto. En lugar de utilizar petróleo, muchas de estas pilas utilizan hidrógeno como combustible.

En la actualidad, existen diversos tipos de celdas de combustible que se clasifican según la temperatura de funcionamiento y el tipo de electrolito que emplean. Algunas de estas celdas son adecuadas para su uso en plantas de generación de energía estacionarias, mientras que otras son más apropiadas para aplicaciones portátiles o para la propulsión de vehículos.

Tabla 1
Tipos de celdas y sus distintos electrolitos

Tipo de celda	Electrolito empleado	Temperatura de operación	Reacciones del electrodo	
Electrolito polimérico	Membrana polimérica	60 – 140 °C	Ánodo:	$H_2 = 2H^+ + 2e^-$
			Cátodo:	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- = H_2O$
Metanol dirigido	Membrana polimérica	30 – 80 °C	Ánodo:	$CH_3OH + H_2O = CO_2 + 6H^+ + 6e^-$
			Cátodo:	$\frac{3}{2} O_2 + 6H^+ + 6e^- = 3H_2O$
Alcalina	Hidróxido de potasio	150 – 200 °C	Ánodo:	$H_2 + 2OH^- = H_2O + 2e^-$
			Cátodo:	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- = 2OH^-$
Ácido fosfórico	Ácido fosfórico	180 – 200 °C	Ánodo:	$H_2 = 2H^+ + 2e^-$
			Cátodo:	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- = H_2O$
Carbonato fundido	Carbonato de litio/ potasio	650 °C	Ánodo:	$H_2 + CO_3^{2-} = H_2O + CO_2 + 2e^-$
			Cátodo:	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- = CO_3^{2-}$

Oxido solido	Circonita estabilizada con itria	1000 °C	Ánodo:	$H_2 + O_2 = H_2O + 2e^-$
			Cátodo:	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- = O_2$

Fuente: (Hidrogeno, 2022).

En este proyecto la celda a utilizar es de tipo húmeda, por lo tanto, es de tipo alcalino con un electrolito de base de hidróxido de potación a pesar de que es uno de los diseños más antiguos para pilas de combustible al tener el principio de electrolisis se convierte en una de las celdas más puras con relación a recolección limpia de hidrogeno.

1.4.2. Celda húmeda

Una celda húmeda de hidrógeno es un tipo de celda electroquímica que utiliza una solución acuosa de ácido como electrolito para generar electricidad a partir de agua.

Las celdas húmedas de hidrógeno tienen una menor eficiencia que las celdas de combustible de hidrógeno de membrana de intercambio protónico (PEMFC) debido a que la solución acuosa de ácido puede interferir con la generación de corriente eléctrica y la transferencia de iones en el electrolito.

Las ventajas del electrolizador de celda húmeda son:

- Producir relativamente más gas.
- El mantenimiento del electrolizador es más fácil.
- El diseño del electrolizador es más fácil.

Las desventajas del electrolizador húmedo son:

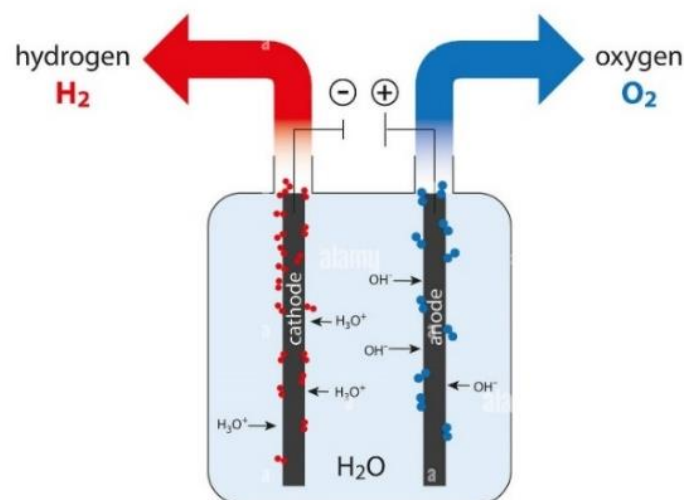
- El calor que surge en las células HHO se acumula, por lo que las células se calientan más.
- La corriente eléctrica que se utiliza tiende a aumentar constantemente por lo que la producción de gas es inestable.
- La eficiencia cae a medida que incrementa la temperatura.

Las celdas húmedas de hidrógeno se utilizan en algunas aplicaciones industriales, como la producción de amoníaco y la refinación de petróleo, así como en algunas aplicaciones de energía renovable, como las celdas de combustible de hidrógeno. Sin embargo, las celdas de combustible de hidrógeno más comunes utilizan un electrolito sólido en lugar de un electrolito líquido.

1.4.3. Funcionamiento de una celda húmeda

El principio de funcionamiento de la celda húmeda es la electrolisis alcalina, este proceso utiliza electrolizadores alcalinos los cuales funcionan mediante el transporte de iones de a través del electrolito desde el cátodo hasta el ánodo, produciendo hidrógeno en el cátodo. Los electrolizadores, funcionan a 100° - 150 °C, utilizan una solución alcalina líquida de hidróxido de sodio o de potasio como electrolito. En este proceso, el ánodo y el cátodo están separados lo que impide que se vuelvan a mezclar. (Pratt, 2022)

Ilustración 4
Proceso de electrolisis

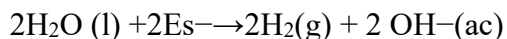


Nota. Proceso de electrolisis por compuestos alcalinos. Fuente: (Pratt, 2022)

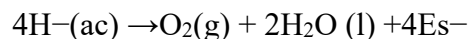
En una celda húmeda de hidrógeno, el electrolito es generalmente ácido tipo alcalino, como el ácido sulfúrico diluido, y se utiliza para transportar los iones de hidrógeno (H^+) entre los dos electrodos. El hidrógeno se introduce en el electrodo negativo (ánodo), donde se divide en protones (H^+) y electrones (e^-). Los protones se transportan a través del electrolito hacia el electrodo positivo (cátodo), donde se combinan con los electrones y el oxígeno del aire para formar agua. En este tipo de celda de manera inversa puede generar energía eléctrica, el hidrógeno se introduce en el electrodo negativo (ánodo), mientras que el oxígeno se introduce en el electrodo positivo (cátodo). En el ánodo, el hidrógeno se divide en protones (H^+) y electrones (e^-). Los protones se disuelven en el electrolito y se dirigen hacia el cátodo, mientras que los electrones fluyen a través de un circuito externo para crear una corriente eléctrica.

La reacción química en la electrólisis del agua es la siguiente:

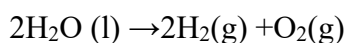
Cátodo (reducción):



Ánodo (oxidación):



Reacción general:



1.5. Propiedades de combustión del hidrogeno

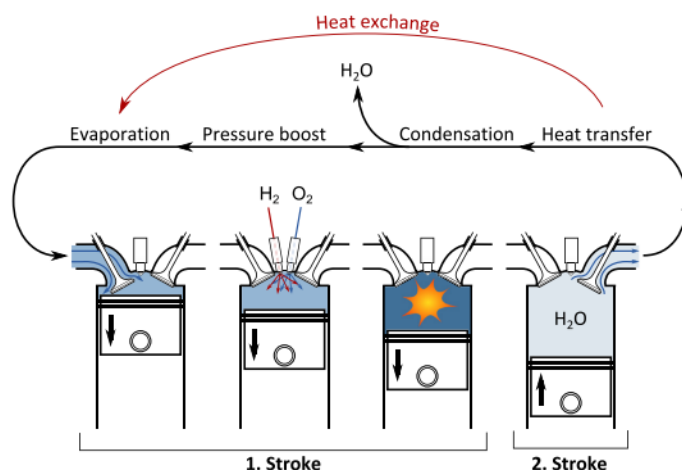
En una combustión de hidrógeno con oxígeno a presión constante, el agua generada ha alcanzado el punto de condensación, se libera una cantidad de energía de 285 kJ por mol de hidrógeno (equivalente a 2 gramos), en condiciones normales esta energía liberada se conoce como la entalpía de combustión. (Leon, 2003)

Las moléculas de agua experimentan un estado excitado durante su formación inicial y posteriormente pasan a un estado fundamental, lo cual provoca la liberación de radiación térmica. Cuando el hidrógeno se quema en presencia de aire, la temperatura alcanza aproximadamente los 2000 °C. (McCarthy, 2008)

1.5.1. Propiedades químicas y termodinámicas del hidrogeno.

La combustión del hidrógeno no genera contaminantes, ya que su único subproducto es agua (reacción 1), como se muestra en la ilustración 6. En contraste, los combustibles fósiles emiten CO₂ (reacción 2), el cual se acumula en la atmósfera y es uno de los principales contribuyentes al fenómeno conocido como "efecto invernadero". (Verhelst, 2014)

Ilustración 5
Proceso de combustión del hidrogeno



Nota. Proceso de combustión por hidrogeno. Fuente: (Verhelst, 2014)

El hidrogeno como todo elemento químico tiene propiedades químicas y termodinámicas las cuales están expresadas en la tabla 2.

Tabla 2
Propiedades químicas y termodinámicas del hidrogeno.

Propiedades químicas del hidrogeno		Propiedades termodinámicas del hidrogeno	
Masa atómica (masa molar)	11.00794 u.m.a. (g/molécula)	Densidad (a las condiciones normales)	0.0000899 a (273 K (0 °C)) g/cm ³
Configuración electrónica	1s<1	Temperatura de fusión	14.01 K
Radio del átomo	53 pm	Temperatura de ebullición	20.28 K
Radio covalente	32 pm	Calor de fusión	0.117 kJ/mol
Radio de iono	54 (-1 e) pm	Calor de evaporación	0.904 kJ/mol
Electronegatividad	32.20 (escala de Pauling)	Capacidad térmica molar	14.235 J/ (K mol)
Grados de oxidación	1,0,-1	Volumen molar	14.1 cm ³ /molécula gramo

Energía de ionización (primer electrón)	1311.3 kJ/mol	Termo conductividad	(300 K) 0.1815 W/(mK)
---------------------------------------------------	---------------	----------------------------	-----------------------

Nota. Propiedades químicas y termodinámicas del hidrogeno con sus magnitudes.

Fuente: (JSC, 2023)

El hidrógeno forma agua al oxidarse; cuando este gas se quema, dos átomos de hidrógeno se combinan con un átomo de oxígeno de la atmósfera y forman agua, esta reacción produce una expulsión de energía obteniendo un poder calorífico superior a la gasolina como se observa en la tabla 3, por lo tanto, es un combustible más eficiente en relación con el volumen de gasolina que se debe utilizar para realizar el mismo trabajo dentro de la cámara de combustión como se observa en la ilustración 5.

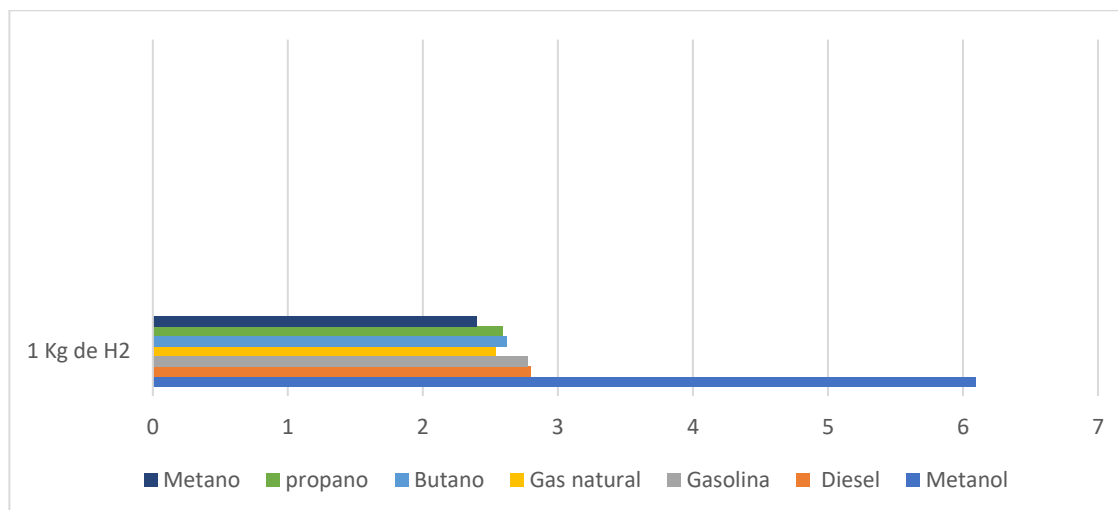
Tabla 3
Poder calorífico de determinados combustibles.

Combustible	KJ/g	Kcal/g	BYU / lb
Hidrógeno	141.9	33.9	61
Gasolina	47	11.3	20
Diesel	45	10.7	19.3
Etanol	29.7	7.1	12
Propano	49.9	11.9	21
Butano	49.2	11.8	21.2
Madera	15	3.6	6
Carbón lignito	15	4.4	8
Carbón	27	7.8	14
Gas natural	54	13	23

Fuente: (Guillermo G. Reyes, 2018)

Ilustración 6

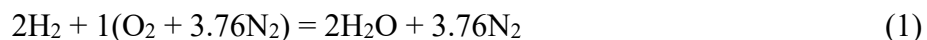
Valor energético del combustible.



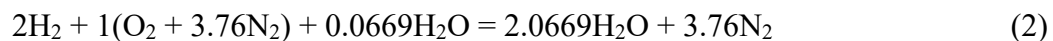
Nota. Grafica de valor energético basado en poder calorífico inferior. Fuente: (IGNACIO GUERRA, 2008)

Al tener en cuenta las propiedades químicas y termodinámicas del hidrogeno y saber cómo funciona el proceso de combustión se puede determinar la ecuación estequiométrica de la reacción aire combustible, estas ecuaciones estequiométricas balanceadas del ciclo Otto están formuladas al 100% de aire teórico.

La primera ecuación para plantear se toma en cuenta que el aire de ingreso no contiene humedad.



En el segundo caso se determina la ecuación estequiométrica del hidrogeno considerando la humedad al 100% de aire teórico, la cual se calcula en número moles utilizando la ecuación:



En base a las ecuaciones planteadas se procede a calcular las fracciones molares, masas molares de los reactivos y productos como se observa en la tabla 4.

Tabla 4
Resultados del hidrogeno en la ecuación estequiométrica

HIDROGENO		
	REACTIVOS	PRODUCTOS
Numero moles totales Nmt (Kmol)	6.83	5.83
Y_iH₂	0.29	-
Y_iO₂	0.15	0
Y_iN₂	0.55	0.65
Y_iH₂O	0.01	0.35
Mm H₂ (Kg/Kmol)	2.02	-
Mm O₂ (Kg/Kmol)	31.99	31.99
Mm N₂ (Kg/Kmol)	28.01	28.01
Mm H₂O (Kg/Kmol)	18.02	18.02
Masa molar total Mmt (Kg/Kmol)	20.88	24.46
Relación aire combustible AC		34.50

Nota. Resultado del cálculo de las fracciones molares, masas molares y productos del elemento del hidrogeno en la ecuación estequiométrica. Fuente: (Shubham Kakran, 2022)

Para la combustión del hidrogeno en los motores de combustión interna, tienden a generar una quema limpia y estos trabajos de una manera eficiente gracias a sus características de combustión única del hidrogeno, generando una combustión ultra pobre reduciendo así gran cantidad del NO_x.

1.5.2. Pre - encendido y golpe del hidrogeno

La temperatura de autoignición del H₂ es de unos 858 K, significa que el hidrogeno es más adecuado como combustible de un motor de encendido por chispa.

Tabla 5

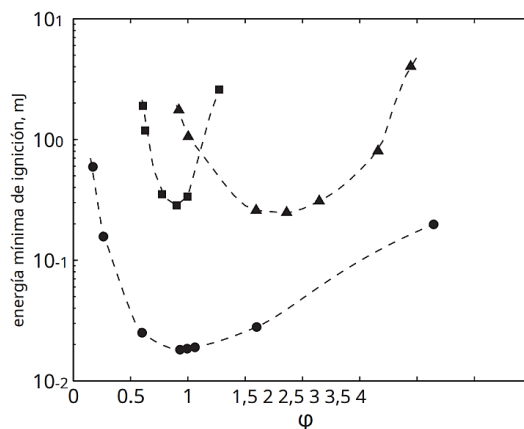
Propiedades del hidrogeno 25 °C y 1 atm.

Comparación de las propiedades de los combustibles			
^a Liquido a los 0 °C, ^b Es estequiométrica, ^c Metano, ^d Vapor.			
Propiedades	Hidrogeno	GNC	Gasolina
Densidad (kg/m³)	0.0824	0.72	730 ^a
Límites de inflamabilidad (% de volumen en el aire)	4-75	4.3-15	1.4-7.6
Límite de inflamabilidad	0.1-7.1	0.4-1.6	≈0.7-4
Autoencendido de la temperatura en el aire (K)	858	723	550
Energía mínima de encendido (mJ)^b	0.02	0.28	0.24
Velocidad de la llama (ms⁻¹)^b	1.85	0.38	0.37-0.4
Temperatura adiabática de la llama (K)^b	2480	2214	2580
Distancia de extensión (mm)^b	0.64	2.1 ^c	≈2
Estequiométrica combustible /radio de aire masa	0.029	0.069	0.068
Estequiométrica fracción de volumen %	29.53	9.48	≈ 2 ^d
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	119.7	45.8	44.79
Calor de combustión (MJ/kg_{air})^b	3.37	2.9	2.83

Fuente: (C.M. White, R.R. Steeper, A.E. Lutz, 2006)*

Ilustración 7

Energías mínimas de ignición



Nota. Gráficas de energías mínimas de ignición de (•) mezclas de hidrógeno aire, (-) metano-aire y (-) heptano-aire en relación con-a presión atmosférica. Fuente: C.M. White*, R.R. Steeper, A.E. Lutz, 2006)

A pesar de la alta temperatura de autoignición, las energías de ignición de las mezclas de hidrógeno y aire son aproximadamente un orden de magnitud más bajas que las de las mezclas de hidrocarburos y aire. Esto se observa en la Ilustración 7, donde las energías mínimas de ignición para mezclas de hidrógeno-aire, propano-aire y heptano-aire a presión atmosférica se representan en función de la relación de equivalencia, dónde se define como la relación entre la relación de masa de aire/combustible real y la relación de masa de aire/combustible estequiométrica. Las bajas energías de ignición de las mezclas de hidrógeno y aire significan que H_2 . Los ICE están predispuestos a los efectos limitantes de la pre - ignición. El efecto limitante de la pre - ignición es que un evento de estos adelantará el inicio de la combustión y producirá una mayor tasa de liberación de calor químico. A su vez, la mayor tasa de liberación de calor da como resultado un aumento rápido de la presión, una mayor presión máxima del cilindro, oscilaciones acústicas y un mayor rechazo de calor que conduce a temperaturas más altas en la superficie del cilindro. (C.M. White*, R.R. Steeper, A.E. Lutz, 2006)

2. CAPITULO 2, Elaboración de la celda de hidrogeno tipo húmeda e implementación en el motor estacionario

2.1.Introducción

En este capítulo se observará todos los procesos desarrollados para la creación de la celda húmeda de hidrogeno como se desarrollan sus cálculos para el diseño, elecciones materiales, proceso de manufactura y ensamble. También se enfoca sobre la puesta en funcionamiento de este con gasolina e hidrogeno con sus respectivas adaptaciones, para así proceder a la toma de datos de las emisiones causadas al momento del uso del motor con gasolina y con hidrógeno.

2.2.Diseño del generador de hidrógeno por celda húmeda para un motor estacionario

El diseño de una celda de hidrógeno de tipo húmeda tiene que ser desarrollada en base a las necesidades y especificaciones del motor en el que se va a implementar, de manera teórica. La cantidad de hidrógeno que debe suministrarse al motor se encuentra directamente relacionada con su tamaño.

2.2.1. Descripción del motor

El motor en el cual se implementará un generador de hidrogeno por celda húmeda corresponde a un motor estacionario de 1200 Watts, de cuatro tiempos de la marca Hyundai a gasolina con sistema OHV refrigerado por aire, se puede observar las especificaciones en la siguiente tabla 6.

Tabla 6
Especificaciones del motor generador a utilizar en el proyecto

HHY1200L		
Generador	Frecuencia nominal (Hz)	60

	Nominal CA potencia de salida(kW)	0.9
	Max AC potencia de salida(kW)	1.0
	1 – Fase nominal CA voltaje(V)	120 V, 5 A
	Factor de Potencia	1.0
Motor	Tipo	OHV 4 tiempos refrigerado por aire de 3 HP
	Desplazamiento(cm ³)	80 cm ³
	Ignition model	T.C.I.
	A partir del modelo	Inicio de retroceso
	Max salida(kW/rpm)	1.8/3000
	Capacidad del depósito (L)	4.8
	Capacidad de aceite(L)	0.6(10 W 30 aceite)
	Tiempo de trabajo continuo	8.0 Horas
Dimensiones	Dimensiones del generador (mm)	455 x 355 x 39 L x W x H(mm)
	Dimensiones de la caja (mm)	470 x 370 x 423 L x W x H(mm)
	Peso en vacío (Kg)	26

Fuente: Autores

2.2.2. Cantidad de hidrógeno requerida para el motor

De acuerdo con las especificaciones del motor a utilizar, se puede determinar la cantidad de hidrogeno requerida para la combustión y de esta manera tener los datos necesarios para diseñar la celda según la cantidad de hidrogeno a producir para ello se procede a calcular lo siguiente:

2.2.2.1. Tasa de consumo de combustible

Determinar la tasa de consumo de combustible del motor en litros por hora (L/h). Esto se puede encontrar en las especificaciones del motor o se puede calcular con la ecuación número 3.

Tabla 7

Datos para el cálculo de la tasa de consumo del motor.

Datos para determinar la tasa de consumo del motor	
Tiempo de trabajo continuo del motor	8 horas
Capacidad del depósito en litros	4.8 litros
Revoluciones constantes a	3000 rpm

Fuente: Autores

Calculo:

$$consumo = \frac{\text{litros}}{\text{horas}} \quad (3)$$

$$consumo = \frac{4.8}{8}$$

$$consumo = 0.6 \frac{l}{h}$$

La tasa de consumo de combustible de este motor es de 0.6 litros por hora, de gasolina a 3000 rpm constantes durante 8 horas.

2.2.2.2. Relación de mezcla aire-combustible para el motor.

La relación de mezcla aire-combustible en este, que posee un carburador dependerá del ajuste del carburador y variará dependiendo de las condiciones de operación.

Sin embargo, es común que los carburadores de los motores estacionarios de bajo cilindraje estén diseñados para proporcionar una relación de mezcla aire-combustible cercana a la relación estequiométrica, es decir, la relación ideal para una combustión completa a revoluciones constantes.

La mezcla aire-combustible varía según el tipo de combustible, pero para la gasolina Super, la relación estequiométrica es aproximadamente 14,7:1 en términos de masa. Esto significa que se necesitan 14,7 unidades de masa de aire para mezclarse con una unidad de masa de gasolina y así obtener una combustión completa.

En un motor de 80 cm³ carburado, su relación aire-combustible es de 14 unidades de masa de aire, la relación sería de 14/15 para el aire y 1/15 para el combustible, considerando que la gasolina a utilizar es de 92 octanos, en términos estequiométricos se trata de una mezcla rica de combustible.

2.2.2.3.Densidad del hidrógeno.

La densidad del hidrógeno depende de la presión y la temperatura a la que se encuentra, por lo que es importante utilizar la densidad correspondiente a las condiciones en las que se usará el motor.

En la ciudad de Cuenca la temperatura nominal aproximadamente a las 10 pm es de 15 a 20 °C en un día despejado con una altura a nivel del mar de 2,560 m con presión atmosférica de 1030 hPa (256 kPa), se correlaciona una presión atmosférica estándar (101,325 kPa), la densidad del hidrógeno a 15 °C es de aproximadamente 0.0848 kg/m³.

Calculo:

$$d = \frac{Pat\ cuenca * D\ hidrogeno}{Pat\ estandar} \quad (4)$$

$$d = \frac{256\ kPa * 0.0848\ \frac{kg}{m^3}}{101.325\ kPa}$$

$$d = 0.214\ kg/m^3$$

2.2.2.4. Cantidad de masa de hidrogeno a utilizar.

La cantidad de masa de hidrogeno está determinado por el volumen de combustible del motor con relación a la densidad a utilizar en el hidrogeno.

Tabla 8

Datos para el cálculo de la masa del hidrogeno

Datos para determinar la masa de hidrogeno	
Volumen del depósito de combustible	4.8 L
Densidad calculada de hidrogeno	0.214 kg/m ³

Fuente: Autores

Calculo:

$$masa = volumen * densidad \quad (5)$$

$$masa = 0.0048\ m^3 * 0.214\ \frac{kg}{m^3}$$

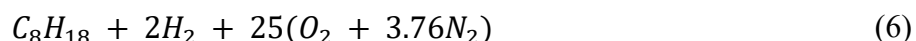
$$masa = 0.00102\ kg$$

Se necesitará una masa de 0.00102 kg de hidrogeno para el motor de 80 cm³, la carga y la temperatura del motor pueden influir en la cantidad real de hidrógeno que se requiere.

2.2.2.5.Reacción química necesaria para el motor.

Para la reacción química se parte desde cómo se comporta el suministro de hidrogeno en un motor a gasolina, en el que se suministra aire con hidrogeno más gasolina, según esta mezcla se determinar el caudal del hidrogeno en determinada cantidad de masa lo que posteriormente ayudara a tener un factor de conversión para la relación de aire- hidrogeno para posteriormente realizar el cálculo.

La reacción química se puede representar de la siguiente manera, en una mezcla de aire, hidrogeno y gasolina:



Esto significa que se necesitan 1 molécula de gasolina (C_8H_{18}), 2 moléculas de hidrógeno (H_2) y 25 moléculas de aire ($O_2 + 3.76N_2$). En términos de masa, se requieren 114 gramos de gasolina, 4 gramos de hidrógeno y 343 gramos de aire.

La estequiometría de la reacción depende de la proporción de hidrógeno y gasolina en la mezcla combustible, así como de la cantidad de oxígeno y nitrógeno presentes en el aire. Para una combustión completa, la cantidad de oxígeno debe ser suficiente para reaccionar con todo el hidrógeno y todo el carbono presente en la gasolina.

Es importante tener en cuenta que la relación estequiométrica puede variar según la proporción real de hidrógeno, gasolina, oxígeno y nitrógeno en la mezcla combustible, y que una combustión incompleta puede producir subproductos no deseados y reducir la eficiencia del motor.

En la tabla 9 se observa la cantidad de hidrogeno en una mezcla aire, hidrogeno y gasolina con relación al tamaño del motor, donde se suministra 40 gramos de hidrogeno para una relación

estequiométrica ideal, en términos de caudal corresponde a la cantidad de hidrogeno correcta a suministra.

Tabla 9

Cantidad de hidrógeno requerida para la operación de un motor de combustión.

Cilindraje en Litros	Litros de H₂ por minuto
0	0
1	0.16
1.3	0.21
1.6	0.26
1.8	0.29
2	0.32
2.3	0.37
2.5	0.4
2.8	0.45
3	0.48
3.3	0.53
3.5	0.56
4	0.65

Nota. Cantidad de hidrógeno requerida para la operación de un motor de combustión en mezcla con el combustible habitual en función de su tamaño Fuente:(«Datos sobre generadores de hidrógeno, diseño de celda HHO», 2021).

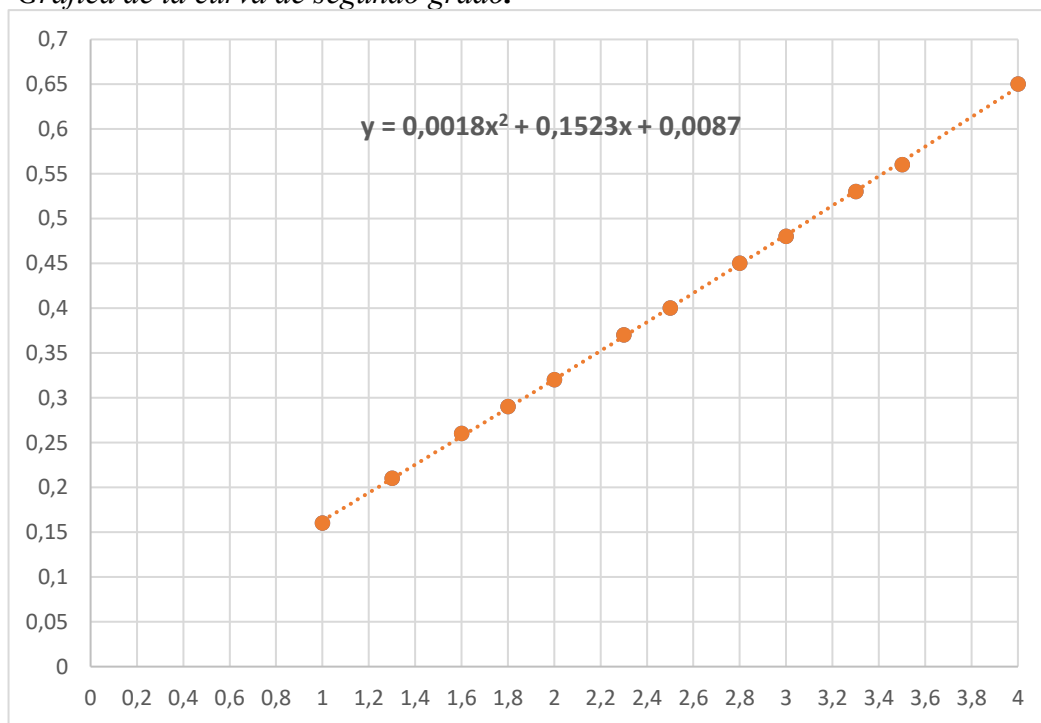
2.2.3. Cálculo de la Cantidad de hidrógeno requerida para el motor

Tomando en cuenta la tabla anterior se realiza la gráfica de los datos como puntos en el software de Excel, considerando el tamaño del motor como el eje x y la cantidad de hidrogeno en litros por minuto como eje y, como se observa en la Ilustración 8.

Posteriormente se inserta una línea de tendencia la cual corresponde a una curva poligonal de segundo grado lo que permite extraer la ecuación de determinada curva.

Ilustración 8

Grafica de la curva de segundo grado.



Nota. Grafica de la curva poligonal de segundo grado realizada en Excel.
Fuente: Autores

Con la ecuación se puede determinar la cantidad de hidrogeno en litros por minuto remplazando en x el tamaño del motor en litros, de esta manera se calcula la cantidad de hidrogeno para un motor de 80 cm³ para una estequiometria ideal de 4 gramos en la mezcla.

$$y = 0.0018x^2 + 0.1523x + 0.0087 \quad (7)$$

$$y = 0.0018(0.08)^2 + 0.1523(0.08) + 0.0087$$

$$y = 0.02088$$

Los litros de hidrogeno por minuto que requiere un motor de 80 cm³ es de 0.02088 de manera teórica en una mezcla de aire, hidrogeno y gasolina, donde 4 gramos corresponden al

hidrogeno. Esta cantidad de hidrogeno se utiliza como punto de partida para generar una relación estequiométrica de 34.5:1 aire-hidrogeno, la cantidad de aire se determina por la cantidad de oxígeno necesaria para la relación con el combustible. En el caso del hidrógeno, se requiere 1 molécula de oxígeno por cada 2 moléculas de hidrógeno.

La ecuación química balanceada para la combustión completa del hidrógeno en aire es:



Esta ecuación indica que dos moléculas de hidrógeno reaccionan con una molécula de oxígeno. Por lo tanto, la cantidad de aire requerida para una combustión completa de hidrógeno es 8 veces la cantidad de hidrógeno en masa. En términos de masa, la relación estequiométrica de aire y combustible para la combustión completa de hidrógeno es de aproximadamente 34.5 gramos de aire por cada gramo de hidrógeno.

Si el motor posee un espacio volumétrico de 80 cm³ tiene la capacidad de albergar una mezcla estequiométrica, como mínimo 118 gr de hidrogeno, con este valor se relaciona con el caudal a 4 gr de hidrogeno dando como resultado:

Cantidad de hidrogeno = 4 gramos = 0.02088 L/min

Para una cantidad de 118 gramos =

$$\frac{118g * 0.02088 L/min}{4g} = 0.6159L/min \quad (9)$$

El suministro de hidrogeno en un minuto es de 0.6159 litros lo cual de manera teórica corresponde a la cantidad adecuada para una combustión completa en una estequiometria de 34.5:1.

2.3. Diseño de la celda en base al cálculo de Hidrogeno en función de la necesidad del motor

En el marco teórico se presenta la celda a utilizar, para diseñar una celda de tipo alcalino húmedo que produzca hidrógeno, se considera los siguientes datos técnicos:

2.3.1. La tasa de producción de hidrógeno que se desea obtener.

Para el motor de 80 cm³, anteriormente de manera teórica se determina un suministro de 0.6159 L/min = 615.9 mol/min = 20.265 mol/s.

2.3.2. La eficiencia de la celda en la conversión de energía eléctrica en hidrógeno.

La eficiencia de una celda de electrólisis del agua se puede calcular como la relación entre la energía química almacenada en el hidrógeno producido y la energía eléctrica consumida por la celda, la eficiencia típica de una celda de tipo húmedo es del 60% al 80%.

2.3.3. La corriente eléctrica para la electrolisis

Una celda de tipo alcalino húmedo que produce hidrógeno utiliza una corriente eléctrica para dividir el agua (H₂O) en sus componentes de hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂).

Cálculo de la corriente necesaria para la producción de hidrógeno:

$$I = (Q / (2 * n * F)) * (10 / \eta) \quad (10)$$

Donde:

I = corriente mínima para la producción de hidrógeno (Amperios).

Q = tasa de producción de hidrógeno deseada (mol/s).

n = número de electrones transferidos por molécula de hidrógeno (2 para la reacción de producción de hidrógeno).

F = constante de Faraday (96,485 C/mol).

η = eficiencia de la celda en la conversión de energía eléctrica en hidrógeno.

Calculo:

$$I = (Q / (2 * n * F)) * (10 / \eta)$$

$$I = (20.265 \text{ mol/s} / (2 * 2 * 96,485 \text{ C/mol})) * (10 / 0.65)$$

$$I = 8.078 \text{ A}$$

2.3.4. Cálculo de la cantidad de electricidad necesaria

La cantidad de electricidad necesaria para producir una cierta cantidad de hidrógeno depende de la eficiencia de la celda y de la cantidad de hidrógeno deseada. Para producir un mol (1 gramo) de hidrógeno, se necesitan 96,485 culombios de electricidad.

Capacidad máxima del tanque 4.8 litros en gramos son 4800 gr a una densidad de 1 gr/cm³.

Cálculo de la cantidad de electricidad necesaria:

$$\text{cantidad de electricidad} = \frac{4800 \text{ gr} * 96.485 \text{ culombios}}{1 \text{ gr}} \quad (11)$$

$$\text{cantidad de electricidad} = 463128 \text{ culombios}$$

2.3.5. El área superficial de los electrodos y la distancia entre ellos.

Conocer el área del electrodo permite obtener las medidas que se utilizan al diseñar las placas que conforman la estructura del cátodo y ánodo en la celda de tipo húmedo, estas placas deben estar separadas correctamente para un desplazamiento adecuado de la electrolisis entre electrodos.

2.3.5.1.Cálculo de la superficie del electrodo:

$$A = \frac{I}{j * 3600} \quad (12)$$

Donde:

A = superficie del electrodo (m²).

j = densidad de corriente máxima (A/m²).

I= amperaje máximo a suministrar en la electrolisis

Calculo:

$$A = I / (j * 3600)$$

$$A = 9 A / (0,5 A/m^2 * 3600)$$

$$A = 0.035 m^2$$

2.3.5.2.Cálculo de la distancia óptima entre los electrodos:

$$d = \frac{k * \eta * T}{2 * \alpha * F * c} \quad (13)$$

Donde:

d = distancia entre los electrodos (m).

k = constante de Boltzmann (1.38 × 10⁻²³ J/K).

T = temperatura óptima de operación (K).

α = coeficiente de transferencia de masa.

c = concentración del electrolito (mol/m³).

Calculo:

$$d = (k * \eta * T) / (2 * \alpha * F * c)$$

$$d = (1.38 \times 10^{-23} J/K * \eta * T) / (2 * \alpha * F * c)$$

$$d = 0.004 m$$

2.3.6. El volumen y concentración de electrolito.

2.3.6.1. Volumen del electrolito:

Para esta celda la capacidad que va a albergar el electrolito tiene como capacidad máxima un litro de volumen es decir $0.001 m^3$.

2.3.6.2. Concentración del electrolito:

Para la celda de tipo húmeda la relación del compuesto alcalino, en este caso la solución de hidróxido de sodio, se debe disolver 10 g de NaOH en 100 ml de agua destilada hasta que se forme una solución saturada, se requiere una cantidad suficiente de electrolito alcalino para cubrir los electrodos y asegurar un buen contacto eléctrico.

2.3.7. Cálculo del consumo de energía para la electrolisis

El consumo de energía para la producción de hidrógeno se puede calcular como el producto de la corriente eléctrica, el voltaje y el tiempo de electrólisis.

La fórmula para el consumo de energía es:

$$Energía\ eléctrica\ consumida\ (J) = A \times V \times s \quad (14)$$

Donde:

Energía eléctrica consumida (J)

Corriente eléctrica (A)

Voltaje (V)

Tiempo (s)

Calculo:

$$J = 9A \times 12V \times 28800s$$

$$J = 3110400 \text{ julios}$$

2.4.Especificaciones calculadas para la celda a diseñar

Tabla 10

Resultados obtenidos para el diseño de una celda en base al motor a analizar.

Especificaciones	Resultado
Tasa de consumo de combustible	$0.6 \frac{l}{h}$
Densidad del hidrógeno	0.214 kg/m^3
Masa de hidrogeno	0.00102 kg
Suministro de hidrogeno	$0.6649L/min$
Estequiometria	34:1
Eficiencia	60 – 80 %
Corriente eléctrica para la electrolisis	3.361 A
Cantidad de electricidad necesaria	463128 <i>culombios</i>
Volumen del electrolito	0.001 m^3
Concentración del electrolito	10 g de NaOH en 100 ml
Distancia óptima entre los electrodos	0.004 m

Fuente: Autores

2.5.Materiales

Para una mejor elección de materiales para el diseño de la celda húmeda se consta con una lista según sus características para su posible elección como se observa en la tabla 11:

Tabla 11
Tipos de materiales.

Partes de la celda	Posible Material
Cátodo, ánodo, tuberías	HIERRO Y ACEROS
	ALUMINIO Y SUS ALEACIONES
	COBRE Y SUS ALEACIONES
	NÍQUEL Y SUS ALEACIONES
	TITANIO Y SUS ALEACIONES
Deposito del electrolito	POLIETILENO (PE)
	POLI METACRILATO DE METILO (PMMA)
	POLIAMIDAS-nailon - (PA)
	POLIESTIRENO (PS)
	POLIURETANO (PU)
	POLICLORURO DE VINILO (PVC)
	POLI TEREFTALATO DE ETILENGLICOL (PET)
	POLI ETERETERCETONA (PEEK)
	RESINAS EPOXI (EP)
	ELASTÓMEROS, COMO CAUCHO NATURAL (NR)
Burbujeador	POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS DE VIDRIO (GFRP)
	POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO (CFRP)
	POLÍMEROS CARGADOS
	CERMETS

Fuente: (Ashby, M. F., & Jones, D. R. H., 2018)

2.5.1. Acero Inoxidable

Los aceros inoxidable son una de las mejores elecciones para el desarrollo de la celda, pero entre varios de estos se toma como mejor opción los AISI 304 Y 316.

Los aceros 304 tienen una composición que lo hace muy resistente a la corrosión y la oxidación, cabe aclarar que el nombre inoxidable, no se refiere a que este no se oxide, pero esto se refiere a que es un acero que dura más que los otros comunes.

El acero AISI 304 es resistente al calor, fácil de limpiar, económico, resistente a bajas temperaturas, y soporta de manera adecuada a las deformaciones.

Algunas de sus propiedades se las explica a continuación:

- Su capacidad calorífica es de $500 \text{ J} / (\text{Kg} \cdot \text{K})$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y contiene un coeficiente de dilatación térmica a 100 C DE $16.0-17.30 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$.
- Su densidad es de 7.3 g/cm^3 .
- Su punto de fusión esta entre los $1400 - 1455 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Capacidad elástica de 193.000 N/mm^2 .
- Una conductividad térmica de $15/16 \text{ W/m K}$.
- Una resistencia eléctrica a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ de $70 - 72 \mu\text{Ohmcm}$.

2.5.2. Contenedor de la celda

Al realizar el proceso de electrolisis una vez manufacturada la celda debe ser sumergida en agua y poder realizar la electrolisis. Para esto se opta por adquirir filtros de 8 bares ya que estos por sus características soportan la presión al momento de la electrolisis y la temperatura generada.

A continuación, se presentan condiciones de operación de estos filtros:

- Presión Dinámica de Operación: 10-125 psi (0.7-8.6 bar).
- Presión estática de operación: 100 psi (6.9 bar).
- Temperatura de operación; 35-100 °F (2-38 °C).
- Flujo de servicio máximo: 3.17 gpm (12 L/min).

2.5.3. Electrolito

Para la elección del electrolito se eligió el hidróxido de sodio ya que cuando se lo disuelve en el agua o al neutralizarlo con un ácido este liberara una gran cantidad de calor, el cual se puede usar como combustible. El uso general es con una solución al 50% en peso y como solido se le encuentra como pellets, barras, hojuelas y tortas.

2.6. Diseño de las placas de la celda húmeda en base a los resultados obtenidos y el tipo de material

El diseño de la celda húmeda está centrado en el número de placas y el amperaje que utiliza para la electrolisis, el acero inoxidable 304L se eligió como material para las placas y una batería de 12 v a 9 amp hora para el diseño de la celda. La celda debe producir como mínimo 0.6159 litros por minuto con un amperaje mínimo de 8.078 amperios.

Para simplificación matemática de las leyes de Faraday un generador de hidrogeno con una celda húmeda teórica de 7 placas de 303 cm² por placa en contacto con el electrolito, puede generar 64 ml por minuto de hidrogeno por un amperio de corriente, con estos datos como referencia se procede a calcular con 0.664 litros por minuto.

Tabla 12
Producción de hidrogeno según características de armado

	Nº de placas	Amperios	Mililitros/ minuto, con un electrolito ideal	Mililitros/minuto, con un electrolito al 60% de eficiencia	Área de contacto con el electrolito en cm ²
Celda Teórica referencial	7	1	64	38.4	303
Celda ideal	7	1	664	396.6	3143.62
Celda calculada ideal	7	8.07	511.37	306.82	2421.02
Celda en base al volumen del contenedor.	20	9	1629.43	977.65	300

Fuente: Autores

2.6.1. Celda ideal

Tomando en cuenta la celda húmeda teórica de 7 placas a un amperio de corriente se establece el caudal de hidrogeno que se requiere, el cual es de 664 mililitros por minuto, de esta manera se correlaciona, así se obtiene el área de contacto con el electrolito siendo este de 3143.62 cm², pero esta cantidad de área no es ideal para las dimensiones utilizadas en la celda ya que es un área muy grande.

2.6.2. Celda calculada ideal

En base a la celda ideal se establece la corriente calculada con anterioridad a la necesidad del motor en cuestión de cantidad de hidrogeno a producir que es de 8.7 amperios, este cambio de corriente modifica la cantidad de área en contacto con el electrolito reduciéndola a 2421.02 cm², que por consecuente sigue siendo muy grande para la cavidad de volumétrica de contenedor de la celda que es de un litro de capacidad.

2.6.3. Celda en base al volumen del contenedor.

Al considerar los materiales a utilizar la celda queda delimitada a 9 amperios de corriente y un espacio volumétrico de 1000 cm^3 , en base a esto la celda debe tener 20 placas que suma un área de 300 cm^2 en contacto con el electrolito, debido a que a 9 amperios de corriente en solo 7 placas se producirá un exceso de temperatura, lo que en teoría se reduce la producción de hidrogeno.

Considerando un área de 300 cm^2 es ideal para la cavidad del contenedor a utilizar y en una división de 20 placas no existe calentamiento, lo que en teoría produce 1.6 l/min de hidrogeno en un electrolito ideal, en este caso el electrolito es de hidróxido de sodio su eficiencia es de 60% reduciendo la producción a 977.65 mililitros por minuto, para el caudal requerido mínimo de 664 mililitros por minuto se encontrara por encima del mínimo en el motor de 80 cm^3 que se va a utilizar.

Los límites para tolerar según la ley de Faraday por cada centímetro cuadrado de acero inoxidable se necesita 0.084 amperios para generar hidrogeno, sin sobre pasar el límite de sobrecalentamiento o deficiencia energética en electrolisis, por lo tanto:

$$\text{Amperaje maximo} = 0.084 * 300 \text{ cm}^2 = 10 \quad (15)$$

La celda esta diseñada para soportar 10 amperios sin llegar a calentarse.

2.7.Requerimiento de las placas

El área total para utilizar es de 300 cm^2 en 20 placas, correspondería a 15 cm^2 por placa de área de contacto con el electrolito, se considera una junta de 5 cm^2 de área, la placa debe ser de 4 cm por 5 cm.

La junta está dividida entre contacto y aislante para esta condición el aislante es de 11 mm de diámetro y el contacto de 6 mm de diámetro.

Área de junta:

$$A = (\pi * 11^2) + (\pi * 6^2) \quad (16)$$

$$A = 419.274 \text{ mm}^2$$

Área de Placa:

$$A = 15\text{cm}^2 + (419.274 \text{ mm}^2 / 100)) \quad (17)$$

$$A = 19.192 \text{ cm}^2$$

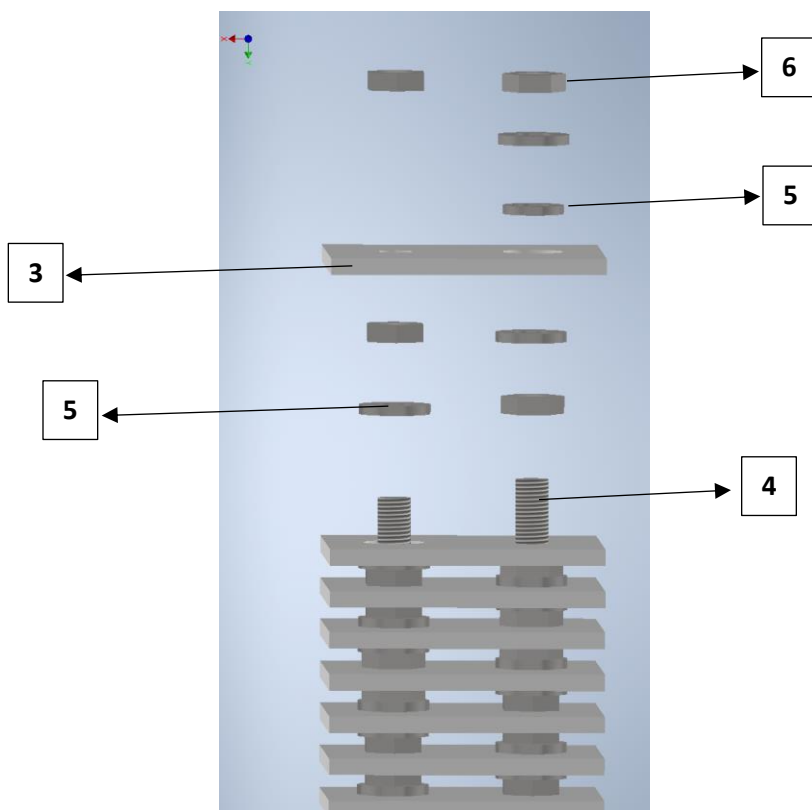
Para el diseño de la celda húmeda se necesitará 20 placas de 19.192 cm² de manera teórica dando un centímetro cuadrado de margen de error por fallas en corte o colgaduras de acoplamiento de manera práctica, por lo tanto el área será de 20 cm².

2.8. Procesos de diseño

El diseño de las placas en base a las especificaciones anteriormente planteadas con relación a dimensiones, juntas de asilamiento y de contacto, se desarrollará en un software CAD, en la extensión de Autodesk denominada Inventor, el plano desarrollado para las placas se encuentra en el anexo 2.

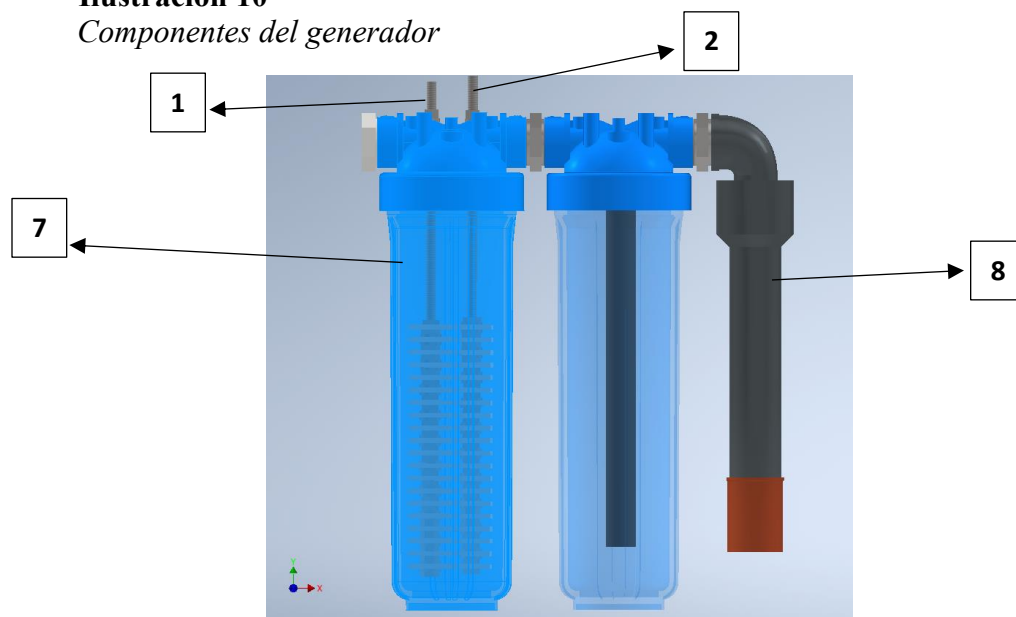
En base a los planos de las placas se usa el diseño 3D para la simulación de ensamble de cátodo y ánodo, que poseen una estructura de 10 placas en contacto con el electrolito respectivamente como se observa en la en la ilustración 9 y 10.

Ilustración 9
Componentes de la celda.



Nota. Grafica 3D de la celda, para mejor entendimiento de los componentes revisar la tabla 13. Fuente: Autores

Ilustración 10
Componentes del generador



Nota. Grafica 3D de los componentes del generador; para mejor entendimiento de los componentes revisar la tabla 13. Fuente: Autores

La configuración de contacto entre placa y varilla roscada M6, se realiza mediante tuercas de 6 mm de diámetro interior con un paso de rosca M6 hexagonales como se observa en los planos del anexo 4, en cuanto a la configuración del aislamiento de placa de ánodo a cátodo o viceversa se desarrolla mediante arandelas de nailon en distribución externa y externa, al tener la placa un agujero de diámetro de 11 mm permite introducir una arandela de nailon entre la barrilla y la placa aislando el contacto directo y con arandelas de diámetro exterior de mayor diámetro, se aísla el contacto de la placa con las tuercas de sujeción, esta configuración se expresa en la acotación del anexo 4. Se desarrolla este proceso hasta obtener 10 placas de ánodo y 10 placas del cátodo entrelazado pero aislado uno del otro.

2.9.Descripción de componentes y elementos de la celda

Tabla 13

Descripción de materiales

Numero	Componente	Material	Cantidad	Descripción
1	Ánodo	Acero inoxidable 304L.	1	Compuesto de 10 placas y 1 varilla.
2	Cátodo	Acero inoxidable 304L.	1	Compuesto de 10 placas y una varilla
3	Placa	Acero inoxidable 304L.	20	Un área de 5 mm x 4 mm, de un grosor de 1.5 mm, y con dos perforaciones de 6 mm y 11 mm.
4	Varilla	Acero Galvanizado.	2	Roscada de 6 mm
5	Arandela	Acrílico	60	20 arandelas de 6 mm y 40 de 15 mm
6	Tuerca	Acero Inoxidable	40	Tamaño de 6 mm
7	Filtro	Poliuretano reforzado	2	Soporta presión de 8 bares, termoestable.

8	Tubería	PVC	6	Codos $\frac{3}{4}$, uniones $\frac{3}{4}$, reducciones de $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$.
9	Empaques	Caucho	4	Caucho vulcanizado termo formable
10	Válvula	Acero inoxidable	1	Cierre manual con una reducción $\frac{1}{2}$ a

Fuente: Autores

2.10. Manufactura

2.10.1. Procesos de manufactura de componentes

El proceso de manufactura esta realizado en base a las medidas planteadas, el resultado de los componentes se puede observar en el anexo 1, estos componentes se elaboraron con los procesos marcados en la tabla 14.

Tabla 14
Descripción de manufacturado.

	Elemento	Corte	Perforación	Pulido	Termoformado	Cantidad
Cátodo	Placas	x	x	x		10
Ánodo	Placas	x	x	x		10
Soporte separador de electrodos	Acrílico	x	x			2
Separador de cátodo y ánodo	Arandelas de nailon 15 mm		x			40
Separador de placas	Arandelas de nailon 6 mm		x			20
Tubería de unión entre la	Tubos de PVC de 1 pulgada				x	1

celda y el burbujeador

Tubería de unión entre el burbujeador y el sistema de combustible	Tubos de 1 pulgada	x	1
	Tubos de ½ pulgada	x	1

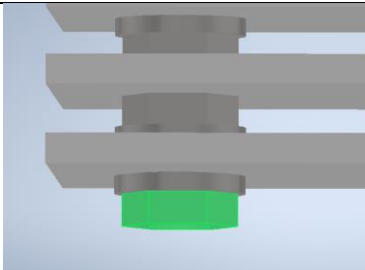

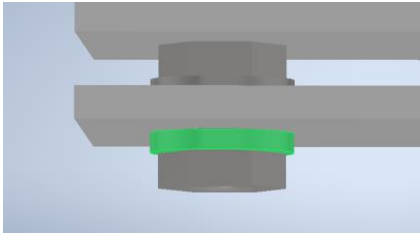
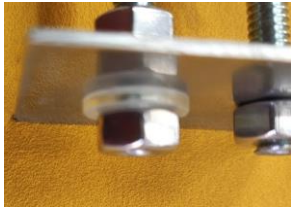

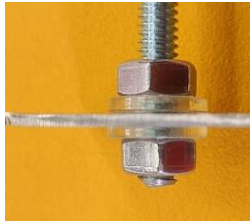
Fuente: Autores

2.11. Fases de instalación de componentes en la celda

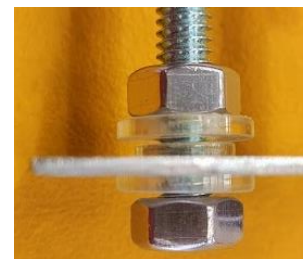
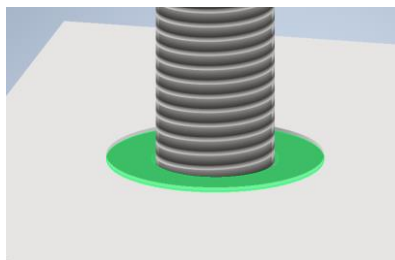
1. Ensamblar el cátodo y el ánodo mediante un entrelazado, con la configuración anteriormente mencionada para el contacto y aislamiento entre placa y la varilla.

Tabla 15

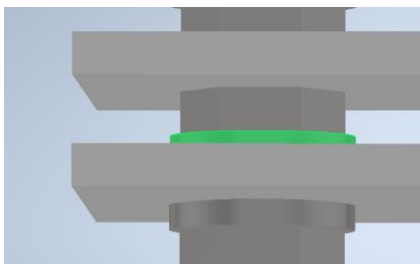
Proceso de ensamblaje de la celda

Proceso	Ilustración del diseño 3D	Ilustración del armado
Se inserta la tuerca de fijación		
De pues de la tuerca se inserta una arandela de nailon para el aislamiento externo		
Se inserta la palca por el agujero de 11 mm de diámetro		

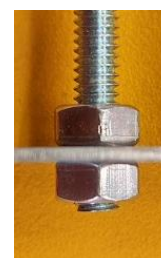
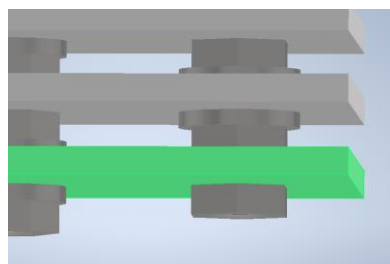
Se aísla de manera interna con la arandela de nailon a la barrilla



Por último, se inserta la arandela externa para finalizar el aislamiento acompañado de la tuerca de fijación para apretar el conjunto.



Para la sección de placa en contacto con la varilla se utiliza el agujero de 6 mm de diámetro el cual está en contacto con la varilla y se aprieta con las tuercas de sujeción sin aislamiento por arandela de nailon

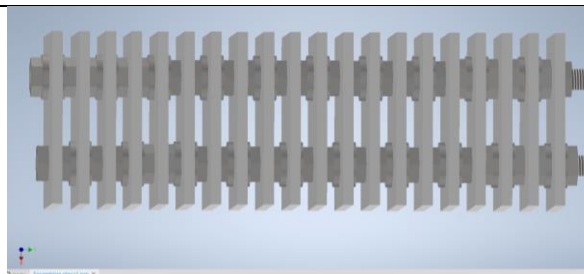


Fuente: Autores

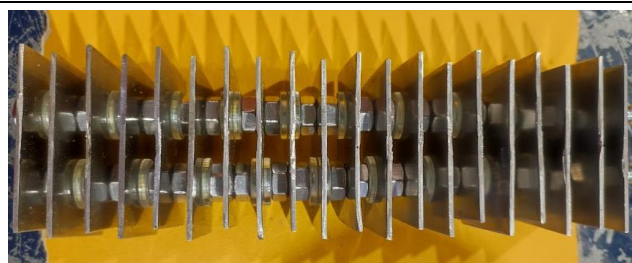
Esta configuración da como resultado la celda que se introducirá en el electrolito como se observa en la tabla 16.

Tabla 16
Celda armada

Cátodo y ánodo diseñado en 3D



Cátodo y ánodo armado






Fuente: Autores

- Se procede a perforar en la tapa del contenedor con las medidas de las varillas optadas para la realización del ánodo y el cátodo, una vez realizado esta perforación se ingresa la celda a través de las perforaciones, se procede al sellado con empaques de caucho tanto por interno como por externo y después ajustar la celda contra la tapa con su respectiva tuerca.

Tabla 17

Preparación de tapas de filtros para unión con la celda.

Proceso	Ilustración
<p>Se prepara la tapa del filtro para que la conexión del burbujeador con la celda sea directa mediante un vaciado.</p>	
<p>Después de tener una superficie adecuada perforar la salida para las varillas.</p>	
<p>Se adecua empaques para asegurar la hermeticidad de la celda con las varillas</p>	
<p>Se atornilla las varillas con la tapa de la celda</p>	

Fuente: Autores

- Terminada la preparación del primer filtro se procede con el paso de hidrogeno entre filtros mediante una tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro, donde el hidrogeno producido en la

celda desembocara hacia el interior del burbujeador mediante una manguera de 1 pulgada de diámetro, terminando así el desarrollo del burbujeador.

4. En la salida del burbujeador se conecta el resto de la tubería, de esta saldrá una manguera que será conectada hacia un contenedor de hidrogeno, este almacenará una cierta cantidad de hidrogeno.

2.12. Proceso de ensamble de la celda al motor de cuatro tiempos

1. Vaciar y retirar el tanque de combustible del motor estacionario.

Ilustración 11

Depósito de combustible retirado.



Nota. Deposito fuera del motor estacionario.

Fuente: Autores

2. Dar arranque al motor y dejarlo en funcionamiento hasta que termine el consumo de combustible sobrante.
3. Una vez consumido todo el combustible, se procede al montaje de la celda y el burbujeador sobre el motor.

Ilustración 12

Montaje de celdas sobre el motor



Nota. Celdas montadas en la parte superior del motor. Fuente: Autores

4. Se desarrolla un contenedor de hidrogeno que se encuentra sumergido en agua, con esto evitando la mezcla de hidrogeno con el aire y generando presión con la misma agua.
5. Después se conecta el contenedor de hidrogeno hacia la entrada de combustible, pero sin permitir el paso de hidrogeno.

2.13. Proceso de medición de gases

El proceso de medición de gases se desarrolla con el motor funcionando con gasolina e hidrógeno, los valores de medición se obtuvieron con un analizador de gases modelo AGS 688 el cual permitirá la medición del CO, CO₂, O₂, HC.

2.13.1 Proceso de medición de gases (Gasolina)

Para el desarrollo de la medición de gases, el combustible es de 92 octanos y capacidad del tanque al máximo, en la tabla se demuestra el procedimiento para la toma de datos de los gases emitidos por el motor.

Tabla 18
Procedimiento para la medición de gases

Para la medición se adecuo una tubería extendida para el sistema de escape debido a que la sonda del medidor de gases no cabe por el orificio de escape del motor, y también es muy reducido la distancia de escape es decir las temperaturas son altas lo que dañaría la sonda de medición, debido a esto la hermeticidad del escape no es de 100% ya que solo es una adaptación.



Posteriormente se inserta la sonda al escape.



Se conecta el medidor de gases a la sonda.



Se calibra el analizador y se procede a medir los gases.

Para la medición de revoluciones se utilizó un medidor de pulsos inductivo conectado a la bujía del motor.



2.13.1.2.Resultados de medición de gases con gasolina

Realizado el proceso para la medición se obtiene los datos de las emisiones requeridas que serán un total de 20 a 1500 rpm, en la tabla 20 se observa los datos obtenidos.

Tabla 19
Datos de medición con gasolina.

Nº	RPM	CO ₂	CO	O ₂	HC
1	1500	6.1	2.5	7.11	370
2	1500	6.3	2.56	7.20	375
3	1500	6.1	2.45	6.9	368
4	1500	6.2	2.8	7.20	372
5	1500	6.1	2.6	7.11	373
6	1500	6.3	2.56	7.11	365
7	1500	6.2	2.5	7.05	370
8	1500	6.1	2.5	6.95	373
9	1500	6	2.4	7.11	365
10	1500	6.1	2.5	7.12	368
11	1500	6	2.5	7.2	370
12	1500	6	2.4	7.11	365
13	1500	6.3	2.5	6.9	364
14	1500	6.2	2.45	7.1	373
15	1500	6.3	2.6	7.23	366
16	1500	6.3	2.4	7.11	365
17	1500	6.2	2.56	7.11	370
18	1500	6	2.5	7.15	365
19	1500	5.9	2.54	6.97	368
20	1500	6.1	2.37	7.11	370

Fuente: Autores

2.13.2. Proceso de medición de gases (Hidrogeno)

1. Conectada la celda hacia el motor, se procede al pesaje de la cantidad requerida de hidrogeno para posterior diluirlo en agua destilada.

Ilustración 13

Pesaje cantidad de hidróxido de sodio



Nota. Pesaje del hidróxido en balanza Hunter. Fuente: Autores

2. Con a la mezcla preparada se la introduce en el filtro que contiene la celda, después se sumerge la celda hasta que esta se cubra por completo y se sella.
3. En el burbujeador ingresar agua destilada hasta que se sumerja la manguera un 90% aproximadamente.
4. Montada la celda y conectada al motor conectar la batería hacia el ánodo y el cátodo de la celda para que empiece la generación de hidrogeno.

Ilustración 14
Ánodo y cátodo de la celda



Nota. Conexión de pinzas hacia el cátodo y ánodo de la celda.
Fuente: Autores

5. Generado el hidrogeno se procede a almacenarlo en el contenedor sumergido sin permitir el paso de este hacia el motor.

Ilustración 15
Pruebas de almacenaje de hidrogeno



Nota. Pruebas de funcionamiento del contendor de hidrogeno.
Fuente: Autores

6. Una vez almacenada cierta cantidad de hidrogeno se permite el paso hacia el motor.
7. Con el paso del hidrogeno desde el contenedor, poner de forma inmediata en marcha el motor.

8. Una vez encendido el motor regular el paso de aire hacia el carburador, para regular el rpm del motor.

Ilustración 16
Regulación en tornillo



Nota. Calibración del paso de aire en el motor. Fuente: Autores

Realizado los pasos anteriores procede a realizar los descrito en la tabla 20.

2.13.2.2.Resultados de medición de gases con hidrogeno

Los resultados de esta prueba se indican en la tabla 21.

Tabla 20
Datos de medición con hidrogeno

Nº	RPM	CO ₂	CO	O ₂	HC
1	1500	0.8	0.9	1.89	0
2	1500	0.7	0.86	1.84	0
3	1500	0.8	0.84	1.88	0
4	1500	0.9	0.72	1.86	0
5	1500	0.9	0.78	1.87	0
6	1500	0.8	0.89	1.84	0

7	1500	0.8	0.82	1.86	0
8	1500	0.9	0.79	1.86	0
9	1500	0.8	0.87	1.86	0
10	1500	0.7	0.86	1.9	0
11	1500	0.9	0.78	1.86	0
12	1500	0.8	0.74	1.94	0
13	1500	0.9	0.80	1.95	0
14	1500	0.9	0.77	1.9	0
15	1500	0.9	0.71	1.94	0
16	1500	0.8	0.81	1.95	0
17	1500	0.8	0.76	1.94	0
18	1500	1.0	0.63	1.64	0
19	1500	0.9	0.73	1.87	0
20	1500	1.1	0.91	1.83	0

Fuente: Autores

3. Capítulo 3. Análisis de los resultados obtenidos mediante estadística básica

3.1.Introducción

Con los datos obtenidos en el capítulo anterior se procederá a realizar el análisis de resultados mediante estadística básica donde se evaluará la media aritmética, desviación estándar, error y los intervalos de confianza, para así realizar el estudio de relaciones entre diferentes variables, proporcionando una comprensión más precisa y objetiva de los datos recopilados, con la utilización de un software estadístico se reduce el riesgo de error de cálculo por ese motivo se utilizó la herramienta de Minitab en su versión 19, realizando un análisis descriptivo de emisiones con gasolina, un análisis descriptivo de emisiones con hidrogeno y un comparativo de las medias de emisiones entre gasolina e hidrogeno, con esto observar la reducción significativa de gases como por ejemplo los HC los cuales presentaron una reducción del 100%.

3.2.Análisis estadístico

Para el análisis de las variables de estudio se aplicará estadística descriptiva (Media aritmética, Desviación estándar, Error y el Intervalo de confianza), y una comparación de los resultados para el motor funcionando con gasolina e hidrógeno. determinando estos valores en el software Minitab. Se realizarán tres análisis:

- Análisis estadístico descriptivo de las emisiones para el motor funcionando con gasolina.
- Análisis estadístico descriptivo de las emisiones para el motor funcionando con gasolina.
- Análisis comparativo de emisiones con gasolina respecto a hidrogeno.

3.2.1. Análisis estadístico descriptivo de las emisiones para el motor funcionando con gasolina

3.2.1.1. Media aritmética

Tabla 21
Minitab media aritmética gasolina

Estadísticos descriptivos: CO₂, CO, O₂, HC						
Estadísticas						
Variable	N	Media	Error estándar de la media	Mínimo	Mediana	Máximo
CO ₂	20	6.1400	0.0275	5.9000	6.1000	6.3000
CO	20	2.5095	0.0213	2.3700	2.5000	2.8000
O ₂	20	7.0925	0.0212	6.9000	7.1100	7.2300
HC	20	368.75	0.750	364.00	369.00	375.00

Fuente: Autores

Tabla 22
Análisis de media aritmética

Análisis de media aritmética con gasolina		
CO₂	6.140	La cantidad de CO ₂ da a conocer la totalidad de combustión, por lo general a mayor CO ₂ mejor la quema de gasolina, en este caso la combustión es incompleta lo que provoca un nivel de CO ₂ bajo.
CO	2.509	El CO en su mayoría depende de la combustión del hidrocarburo en este caso es alto ya que la combustión es imperfecta al tener mayor oxígeno en la mezcla
O₂	7.092	En términos técnicos es una cantidad muy alta de oxígeno para el tamaño del motor utilizado, esto se debe a que se encuentra en una estequiometria de mezcla pobre.
HC	368.75	La cantidad elevada de HC, se debe a la combustión incompleta del combustible, lo cual se identifica con el porcentaje de emisiones de CO ₂ el cual es bajo.

Fuente: Autores

3.2.1.2.Desviación estándar

Tabla 23

Minitab desviación estándar:

GASOLINA				
Estadísticos descriptivos: CO₂, CO, O₂, HC				
Estadísticas				
Variable	N	Desv.Est.	Varianza	CoefVar
CO2	20	0.1231	0.0152	2.01
CO	20	0.0953	0.0091	3.80
O2	20	0.0950	0.0090	1.34
HC	20	3.35	11.25	0.91

Fuente: Autores

Tabla 24

Análisis desviación estándar:

Análisis de la desviación estándar con gasolina		
CO₂	0.123	El valor de la dispersión de los datos no demuestra ser amplia en relación con la media aritmética obtenida, demostrando tener una buena toma de datos que se corroborara con el error obtenido.
CO	0.095	La desviación presentada en las mediciones de CO Y O ₂ , da a notar un nivel bajo de la dispersión de los datos, esto se refleja en el cálculo del error de estos.
O₂	0.095	
HC	3.35	La desviación estándar en HC es muy alta proporcionando un mayor error en la dispersión de datos.

Fuente: Autores

3.2.1.3.Error

El error de medición entre datos está dentro el margen de error de exactitud del analizador de gases Brain BEE AGS-688, por lo tanto, el error de medición de la media está determinada por la fiabilidad de medición del analizador.

Tabla 25
Minitab error estándar

GASOLINA	
Estadísticos descriptivos: CO2, CO, O2, HC	
Estadísticas	
Variable	Error estándar de la media
CO2	0.0275
CO	0.0213
O2	0.0212
HC	0.750

Fuente: Autores

Tabla 26
Análisis error estándar gasolina

Análisis del error estándar con gasolina		
CO₂	0.0275	El error presentado en la medición es menor a 0,1, demostrando un error bajo lo cual se corrobora con el valor presente en la desviación estándar.
CO	0.0213	El error presentado por estos gases es similar ya que la dispersión de datos es similar y no se alejan del valor de la media presentada, lo que dice que la toma de datos es correcta.
O₂	0.0212	
HC	0.750	El margen de error en medición para el HC es de 1 ppm, por lo tanto, produce un error de medición alto lo que conlleva a tener una dispersión muy amplia en la medición.

Fuente: Autores

3.2.1.4. Intervalo de confianza

Tabla 27
Análisis intervalo de confianza gasolina

Análisis del intervalo de confianza con gasolina		
CO₂	(6.0861, 6.1939)	Para el CO ₂ el intervalo de confianza es relativamente reducido por lo que de las 20 mediciones desarrolladas solo 10 entran en ese intervalo de confianza.

CO	(2.4677, 2.5513)	Para el CO el intervalo de confianza es relativamente reducido por lo que de las 20 mediciones desarrolladas 9 se encuentran dentro del intervalo de confianza.
O ₂	(7.0507, 7.1343)	Para el O ₂ el intervalo de confianza es relativamente amplio considerando el margen de error, por lo que de las 20 mediciones desarrolladas 11 entran en el intervalo de confianza.
HC	(367.282, 370.218)	Para el HC el intervalo de confianza es amplio por el margen de error de 1 ppm, por lo que de las 20 mediciones desarrolladas 8 entran en los intervalos de confianza.

Fuente: Autores

3.2.2. Análisis estadístico descriptivo de las emisiones para el motor funcionando con hidrógeno

3.2.2.1. Media aritmética

Tabla 28

Minitab media aritmética hidrogeno

HIDROGENO						
Estadísticos descriptivos: CO₂, CO, O₂, HC						
Estadísticas						
Variable	N	Media	Error estándar de la media	Mínimo	Mediana	Máximo
CO ₂	20	0.8550	0.0211	0.7000	0.8500	1.1000
CO	20	0.7985	0.0162	0.6300	0.7950	0.9100
O ₂	20	1.8740	0.0151	1.6400	1.8700	1.9500
HC	20	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Fuente: Autores

Tabla 29
Análisis media aritmética

Análisis de media aritmética con hidrogeno		
CO₂	0.855	La presencia de dióxido de carbono (CO ₂) y monóxido de carbono (CO) debería ser nula, sin embargo, el respiradero del cárter al enviar partículas de aceite hacia el filtro de aire, estas ingresan hacia la cámara de combustión del motor, provocando la presencia de estas emisiones.
CO	0.798	
O₂	1.874	Normalmente, durante la combustión del hidrógeno, no debería haber presencia de oxígeno en los gases, no obstante, el acople para el escape no permite una hermeticidad del 100%, dándose por consecuente el aumento de las emisiones de O ₂ .
HC	0	Debido a la ausencia de hidrocarburos en la medición, no se dispone de una media aritmética para utilizar como punto de referencia. En caso de que existieran, la cantidad sería mínima y el analizador carece de la precisión necesaria para cuantificarla.

Fuente: Autores

3.2.2.2.Desviación estándar

Tabla 30
Análisis desviación estándar hidrogeno

HIDROGENO				
Estadísticos descriptivos: CO₂, CO, O₂, HC				
Estadísticas				
Variable	N	Desv.Est.	Varianza	CoefVar
CO2	20	0.0945	0.0089	11.05
CO	20	0.0724	0.0052	9.07
O2	20	0.0674	0.0045	3.60
HC	20	0.000000	0.000000	*

Fuente: Autores

Tabla 31
Análisis desviación estándar

Análisis de la desviación estándar con hidrogeno		
CO₂	0.0945	La desviación estándar de las mediciones en relación con el CO y O ₂ no es significativa, debido a que el margen de precisión de la medición es de 0.1, lo cual se encuentra dentro del rango de error establecido, por ende, garantiza la correcta toma de datos.

CO	0.0724	La desviación es relativamente baja para los valores proporcionados en el margen de precisión del analizador que es de 0.01, por lo tanto, provocará un error bajo, esto también se expresa en la desviación de O ₂ , de esta manera se garantiza la correcta toma de datos.
O₂	0.067	
HC	0	No se genera desviación ya que el valor proporcionado es único.

Fuente: Autores

3.2.2.3.Error

Tabla 32

Minitab error estándar hidrogeno

HIDROGENO		
Estadísticos descriptivos: CO₂, CO, O₂, HC		
Estadísticas		
Variable	N	Error estándar de la media
CO ₂	20	0.0211
CO	20	0.0162
O ₂	20	0.0151
HC	20	0.000000

Fuente: Autores

Tabla 33

Análisis error estándar

Análisis del error estándar con hidrogeno

CO₂	0.021	El intervalo de error se define por la precisión de medición del analizador de gases, que se establece en un máximo de 0.01. Por lo tanto, las mediciones de CO ₂ , CO y O ₂ , presentan un error estándar adecuado, esto es corroborado con la desviación estándar la cual es baja,
CO	0.016	
O₂	0.015	
HC	0	No existe error ya que las mediciones son iguales a cero.

Fuente: Autores

3.2.2.4. Intervalo de confianza

Tabla 34
Análisis intervalo de confianza hidrogeno

Análisis del intervalo de confianza con hidrogeno		
CO₂	(0.8136, 0.8964)	Para el CO ₂ el intervalo de confianza es relativamente bajo por lo que de las 20 mediciones desarrolladas 16 se encuentran en el intervalo de confianza.
CO	(0.7668, 0.8302)	Para el CO el intervalo de confianza es relativamente reducido por lo que de las 20 mediciones desarrolladas 9 se encuentran dentro del intervalo de confianza.
O₂	(1.8445, 1.9035)	Para el O ₂ el intervalo de confianza es relativamente amplio considerando el margen de error, por lo que de las 20 mediciones desarrolladas 5 entran en el intervalo de confianza.
HC	0	Para el HC no existe intervalo de confianza, debido a que no existen datos de medición.

Fuente: Autores

3.2.3. Análisis comparativo de gasolina respecto a hidrogeno

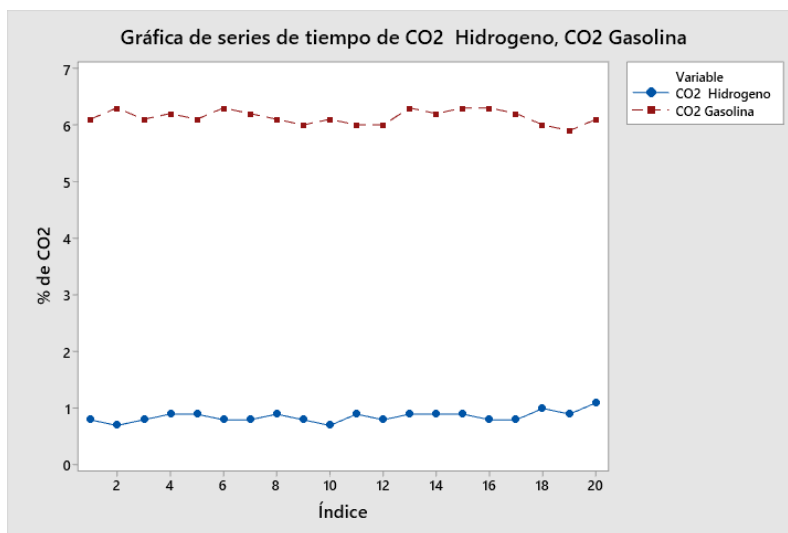
La comparación de emisiones entre gasolina e hidrógeno se representa mediante gráficas que muestran la medición de cada gas en relación con los datos obtenidos. Estas gráficas revelan curvas horizontales, ya que todas las mediciones se realizaron a la misma velocidad de revoluciones por minuto.

3.2.3.1. Análisis comparativo de CO₂.

En la ilustración 17, se presenta el comportamiento de CO₂, observando una disminución en el porcentaje de emisiones pasando de un valor pico de 6.3% en gasolina a 1.1% en hidrogeno, generando una diferencia de valor del 5.2% entre estas.

Ilustración 17

Gráfica de series de tiempo de CO₂ Hidrogeno, CO₂ Gasolina.



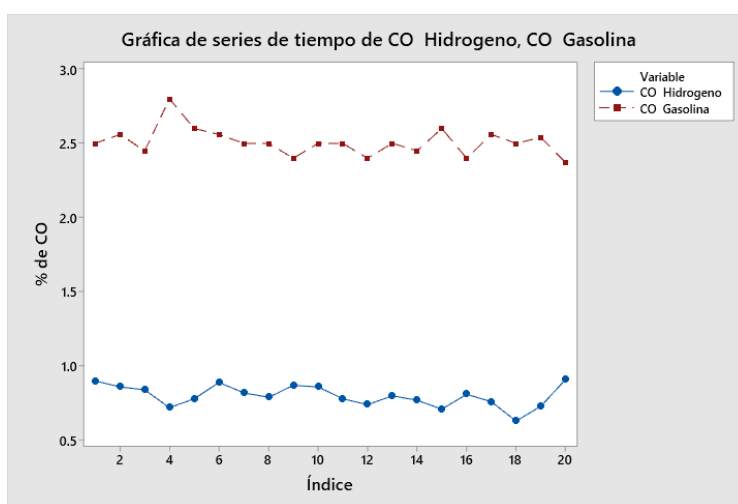
Nota. Los datos representan el valor de las mediciones en porcentaje y el índice representa el número de medición realizada. Fuente: Autores

3.2.3.2. Análisis comparativo de CO.

En la ilustración 18, se presenta el comportamiento de CO, observando una disminución en el porcentaje de emisiones pasando de un valor pico de 2.8% en gasolina a 0.91% en hidrogeno, generando una diferencia de valor del 1.89% entre estas.

Ilustración 18

Gráfica de series de tiempo de CO hidrógeno, CO Gasolina.



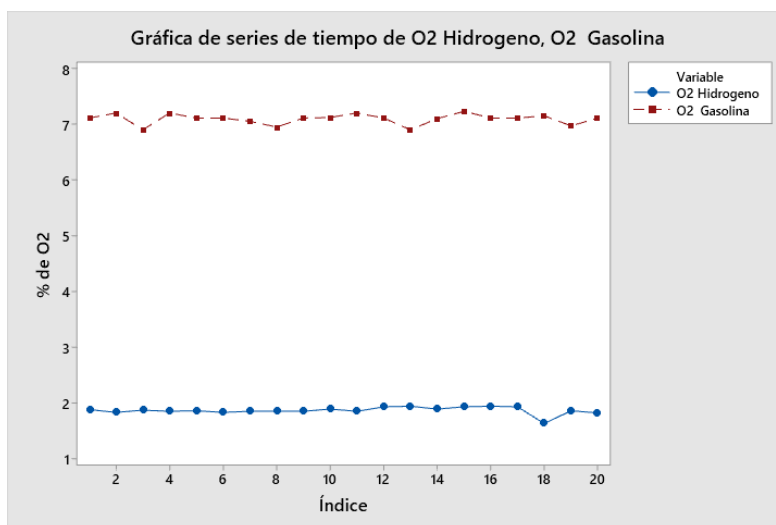
Nota. Los datos representan el valor de las mediciones en porcentaje y el índice representa el número de medición realizada. Fuente: Autores

3.2.3.3. Análisis comparativo de O₂.

En la ilustración 19, se presenta el comportamiento de O₂, observando una disminución en el porcentaje de emisiones pasando de un valor pico de 7.23% en gasolina a 1.95% en hidrogeno, generando una diferencia de valor del 5.28% entre estas.

Ilustración 19

Gráfica de series de tiempo de O₂ Hidrogeno, O₂ Gasolina.



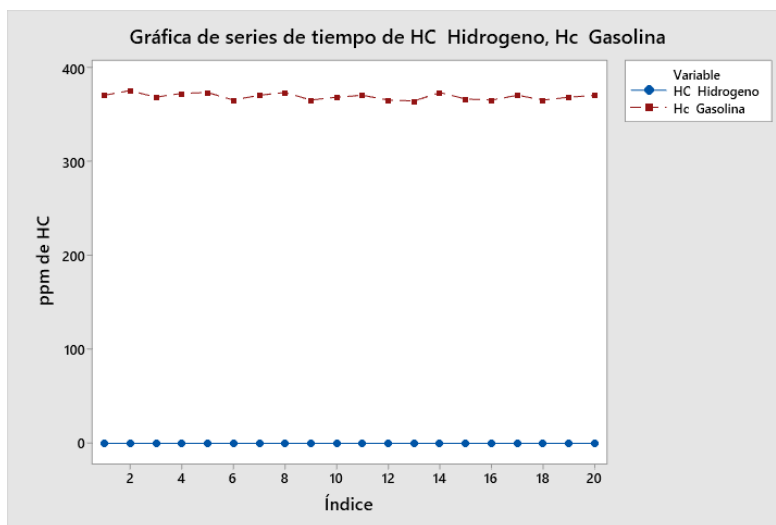
Nota. Los datos representan el valor de las mediciones en porcentaje y el índice representa el número de medición realizada. Fuente: Autores

3.2.3.4. Análisis comparativo de HC.

En la ilustración 20, se presenta el comportamiento de HC, observando una disminución en el porcentaje de emisiones pasando de un valor pico de 375 ppm en gasolina a 0 ppm en hidrogeno, generando una diferencia de valor completa de estas.

Ilustración 20

Gráfica de series de tiempo de HC Hidrogeno, HC Gasolina.



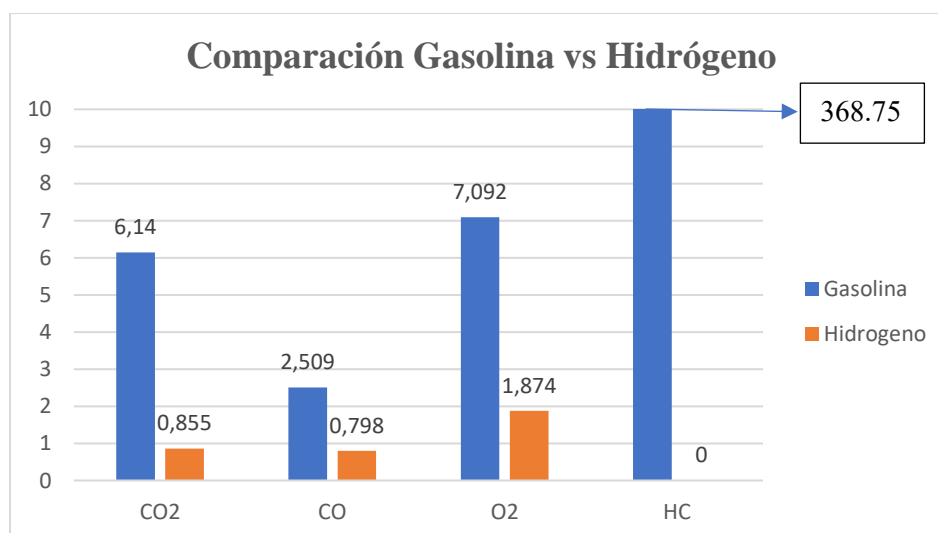
Nota. Los datos representan el valor de las mediciones en partículas por millón y el índice representa el número de medición realizada. Fuente: Autores

3.3. Análisis comparativo de emisiones con gasolina respecto a hidrogeno.

Se realiza la comparación de las medias obtenidas en relación a las emisiones del motor con el uso de gasolina e hidrogeno, en la ilustración 21 se observa gráficamente la reducción de los gases medidos y en la tabla 35 se observa la diferencia porcentual que hay entre ellos.

Ilustración 21

Gráfica de comparación de emisiones.



Nota. En la gráfica realiza en Excel se demuestra la comparación de los valores de las emisiones según el tipo de combustible. Fuente: Autores

Tabla 35
Comparación medias aritméticas

Análisis de la comparación de la media aritmética			
Gases	Gasolina	Hidrogeno	Análisis
CO₂	6.140	0.855	Al realizar una comparación de las medias de emisiones entre los dos combustibles, se observa una reducción del 86,07% en las emisiones.
CO	2.509	0.798	La reducción de CO es de 68.19%.
O₂	7.092	1.874	La comparación de las medias de emisiones entre los dos combustibles, se observa una reducción del 26,42% en las emisiones de O ₂
HC	368.75	0	Se genera en los hidrocarburos una reducción del 100% de las emisiones.

Fuente: Autores

Conclusiones

El análisis exhaustivo de los documentos bibliográficos permite tener una visión general de la investigación a realizar, en el trabajo de Achmad Praptijanto, demuestra que en motores a gasolina con hidrogeno como combustible principal, este redujo el gas de NOx a 0.00009%, así como en el proyecto de investigación de RifAh Amalia, expone que la reducción de gases en una mezcla de gasolina-hidrogeno, se reduce considerablemente a altas revoluciones por minuto dando una potencia efectiva al eje de 1742,57 W, considerando así un incremento del 20 %. La investigación de MD Nurun Nabi da como resultado que una concentración de entre 3.99% a 11% de hidrogeno en un motor de gasolina la presión efectiva incrementa, en comparación al uso gasolina, con esta información recopilada se genera una base para la elección y diseño de materiales, así como para realización de los análisis que se generaran a partir de los datos obtenidos.

En la elaboración de la celda de tipo húmedo, se usó 40 gramos de hidróxido de sodio disuelto en un litro de agua destilada en una celda diseñada con 20 placas de acero inoxidable con una distribución entrelazada entre cátodo y ánodo, sometido a 9 amperios a 12v permitió tener una generación de hidrogeno de manera continua a baja presión, de esta forma dando la oportunidad de almacenar este combustible y poder suminístralo al motor, logrando así su funcionamiento y dando paso a la medición de los gases, para la medición con gasolina se utilizó un combustible de 92 octanos y para el encendido del motor con hidrogeno, se añadió un contenedor de hidrogeno que se encuentra sumergido en agua, proporcionando la cantidad de hidrogeno necesaria para un respectivo encendido, para la realización de las mediciones se adaptó un acople de 1,40m de largo en el escape del motor evitando así causar daños a la sonda de medición, cabe recalcar que las mediciones se realizaron a un régimen de 1500 rpm.

El análisis de los resultados obtenidos mediante estadística básica ayuda a generar un análisis preciso en la comparación de datos, mediante media aritmética se analizaron las 20 mediciones de cada combustible dando un total de 6.14% CO₂, 2.509% CO, 7.092% O₂ y 368.75 ppm H_C para la gasolina y 0.855% CO₂, 2.509% CO, 7.092% O₂ y 0 ppm H_C para el hidrogeno. Al comparar el resultado de las medias aritméticas se observa una reducción de gases en 86.07% CO₂, 68.19% CO, 26.42% O₂ y 100% H_C, con el uso del hidrogeno como combustible principal, con los resultados obtenidos de la desviación estándar y el error, ya que los valores presentados son bajos y demuestra que las mediciones tomadas son correctas.

Con el análisis de los resultados obtenidos se identifica como buena opción la sustitución de la gasolina por el hidrógeno, ya que como se observa la reducción de gases es significativa promoviendo así el uso de energías que benefician al medio ambiente y la salud de las personas. El cual se alinea con los objetivos de uso de Energía Asequible, no contaminantes y la Acción por el clima establecidos por el programa de Desarrollo Sostenible de la Organización Mundial de las Naciones Unidas y el programa de creación de oportunidades 2021-2025 de la secretaria nacional de planificación del Ecuador en el apartado de Gestión del Territorio para la Transición Ecológica.

Recomendaciones

Como primera consideración se propone que este tipo de proyectos se implemente y estudie en tecnologías más actuales como es la inyección de combustible, la hibridación, baterías, entre otras.

Al momento de trabajar con hidróxido de sodio se recomienda el uso de prendas protectoras, así como gafas, guantes y mandil, para poder evitar afecciones que puede generar el hidróxido.

Debido a las limitantes técnicas el estudio en motores estacionarios es muy escasa, por tal motivo se recomienda contribuir con estudios es este tipo de motores.

Se recomienda contribuir con más estudios en la generación de contenedores de hidrógeno que suministren la cantidad necesaria para el encendido en motores.

El uso del hidrogeno como combustible constituye una propuesta muy fiable en la reducción de gases, por tal motivo se recomienda continuar con estudios, investigaciones y pruebas, que ayuden a posicionar a esta tecnología en diversas áreas como es la movilidad y la generación eléctrica.

Bibliografía

- Amalia, R., Pratilastiarso, B., Prasetya, H. E., & Fadhilah, M. Y. (2018). *Análisis de rendimiento y gases de escape de un motor de cuatro tiempos que utiliza gas oxihidrógeno como combustible suplementario*. Bali: IEEE.
- BAIRD, C. (2001). *Química ambiental*. España: Reverte.
- BASSE COURT, P. L. (2015). Estado de la tecnología en la cadena de valor del gas natural: aplicaciones a nuevos productos y servicios. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño*, 156-158.
- Bastidas Molina, M. D. (2022). *Análisis termodinámico de un motor de encendido provocado funcionando con mezclas enriquecidas en oxígeno e hidrógeno obtenidos mediante electrólisis del agua*. Quito: UPS.
- Edison Quezada, D. T. (2014). *Implementación de un generador de hidrógeno de celda seca en un vehículo chevrolet steem 1.6l*. Cuenca: Ups.
- Guillermo G. Reyes, J. F. (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. *UPSE*, 19-28.
- Hidrogeno, C. N. (2022). *H centro nacional del hidrogeno*. Obtenido de H centro nacional del hidrogeno: <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/#:~:text=El%20hidrógeno%20es%20el%20primer,es%20insípido%2C%20incoloro%20e%20inodoro.>
- IGNACIO GUERRA, M. B. (2008). Fuentes de energía para el futuro. *Ministerio de Educación de España*, 95.
- Jaime Jordán, C. Z. (2010). *Diseño de un prototipo para un sistema de alimentación de gas hidrógeno como combustible alternativo para un motor de ciclo*. Cuenca: UPS.

- JSC, G. (2023). *Hidrogeno Innovaciones calida escala*. Obtenido de Hidrogeno Innovaciones calida escala:
<https://www.grasys.com/es/gases/industrial/hydrogen/>
- Leon, C. (2003). *EL RECORRIDO DE LA ENERGÍA EN CASTILLA Y LEÓN*. Obtenido de
[https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/combustible-hidrogeno.html#:~:text=A%20partir%20de%20esos%20valores,\)%20de%20120%20MJ%2Fkg](https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/combustible-hidrogeno.html#:~:text=A%20partir%20de%20esos%20valores,)%20de%20120%20MJ%2Fkg).
- McCarthy, J. (14 de 3 de 2008). *Hydrogen*. Obtenido de Hydrogen:
<https://web.archive.org/web/20080314043136/http://www-formal.stanford.edu/jmc/progress/hydrogen.html>
- Nabi, M. N. (2022). Evaluación de la influencia de la proporción de hidrógeno en el rendimiento, la combustión y las emisiones en un motor de gasolina de cuatro tiempos. *IEEE*.
- Praptijanto, A. (2017). Análisis termodinámico de ciclos transitorios utilizando técnicas de simulación para motores diesel de hidrógeno de combustible dual. *IEEE*.
- Pratt, G. (14 de 3 de 2022). *Crowcon Dtecting Gas Saving Lives*. Obtenido de Crowcon Dtecting Gas Saving Lives: <https://www.crowcon.com/es/blog/hydrogen-electrolysis/>
- Roca, J. A. (2 de 11 de 2022). *El periodico de la energia* . Obtenido de El periodico de la energia:
<https://elperiodicodelaenergia.com/hidrogeno-futuro-cero-neto-cinco-graficos/>
- Santanu Ghosh, A. K. (2023). Sistemas de producción de hidrógeno impulsados por energía geotérmica. *Scrivener Publishing LLC*, 343.
- Shubham Kakran, A. s. (2022). Hydrogen energy in BRIGS-US: A whirl succeeding fuel treasure. *ELSEVIER*.
- Ursúa, A. (2011). Producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua: estado actual y tendencias futuras. *IEEE*, 410 - 426.

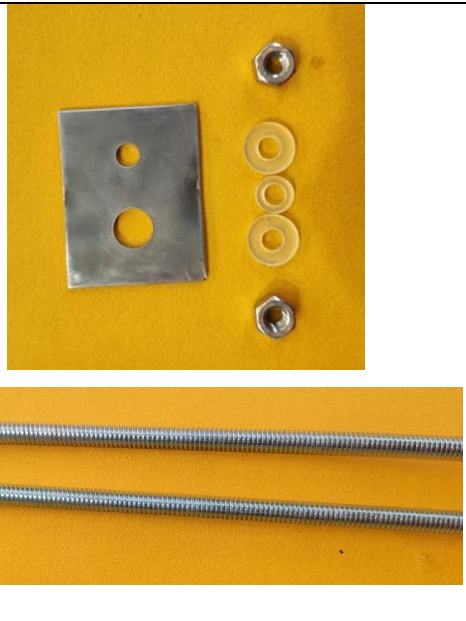


Vásquez, F. (2009). Optimización de un prototipo para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua utilizando materiales existentes. *Investigación, ciencia y tecnología*, 109-115.

Verhelst. (2014). Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. *HYDROGEN ENERGY*.

WHITE, C., STEEPER, R., & LUTZ, A. (2006). The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(10), 1292–1305. doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.12.001

Anexos**Anexo 1**

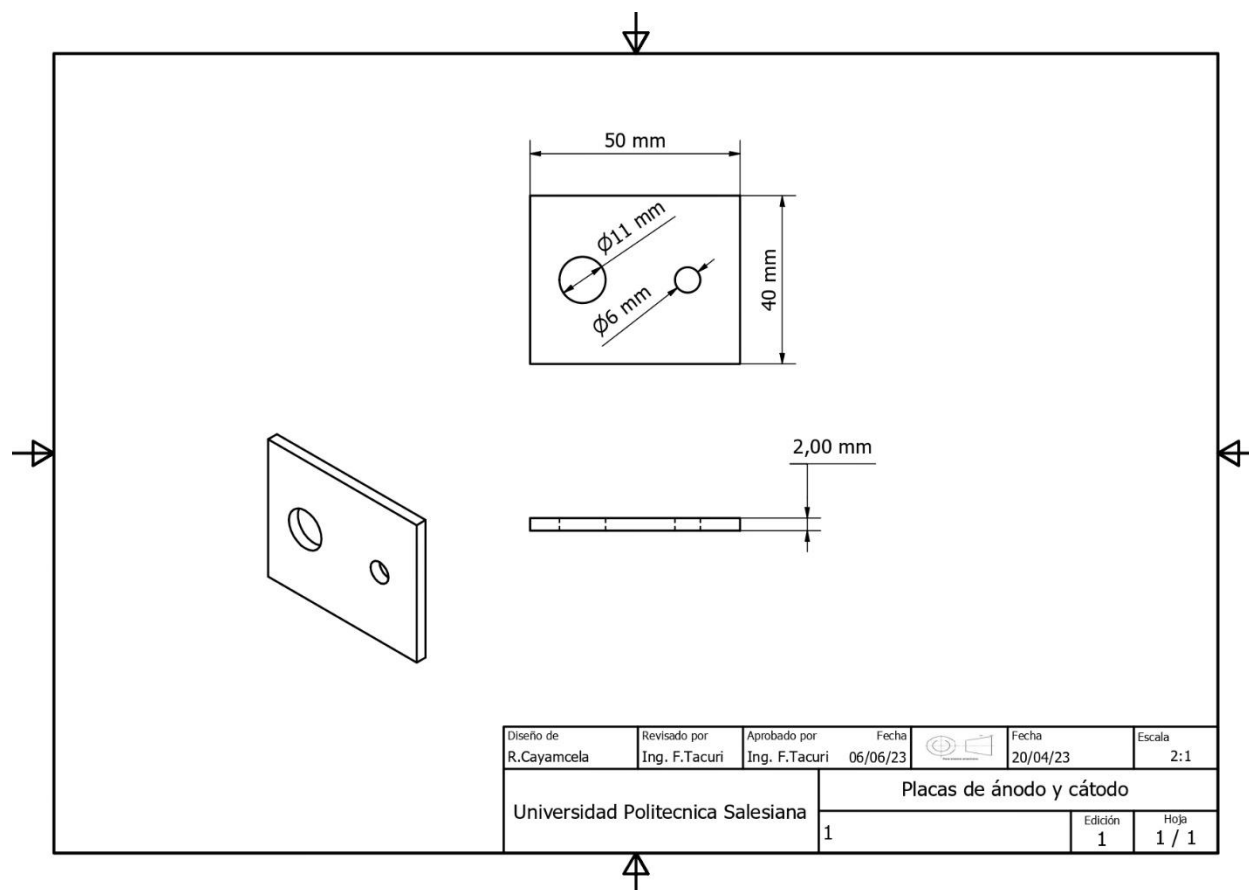
Elementos de la celda de tipo húmedo

	Elemento	Imagen
Cátodo y ánodo	Placas, varillas, tuercas y arandelas	
Separador de cátodo y ánodo	Arandelas de nailon 11 mm	
Separador de placas	Arandelas de nailon 6 mm	

Tubería de unión entre la celda y el burbujeador	Tubos de PVC de 1 pulgada
Tubería de unión entre el burbujeador y el sistema de combustible	Tubos de 1 pulgada Tubos de ½ pulgada
Batería	Gel de 12v a 9 amp

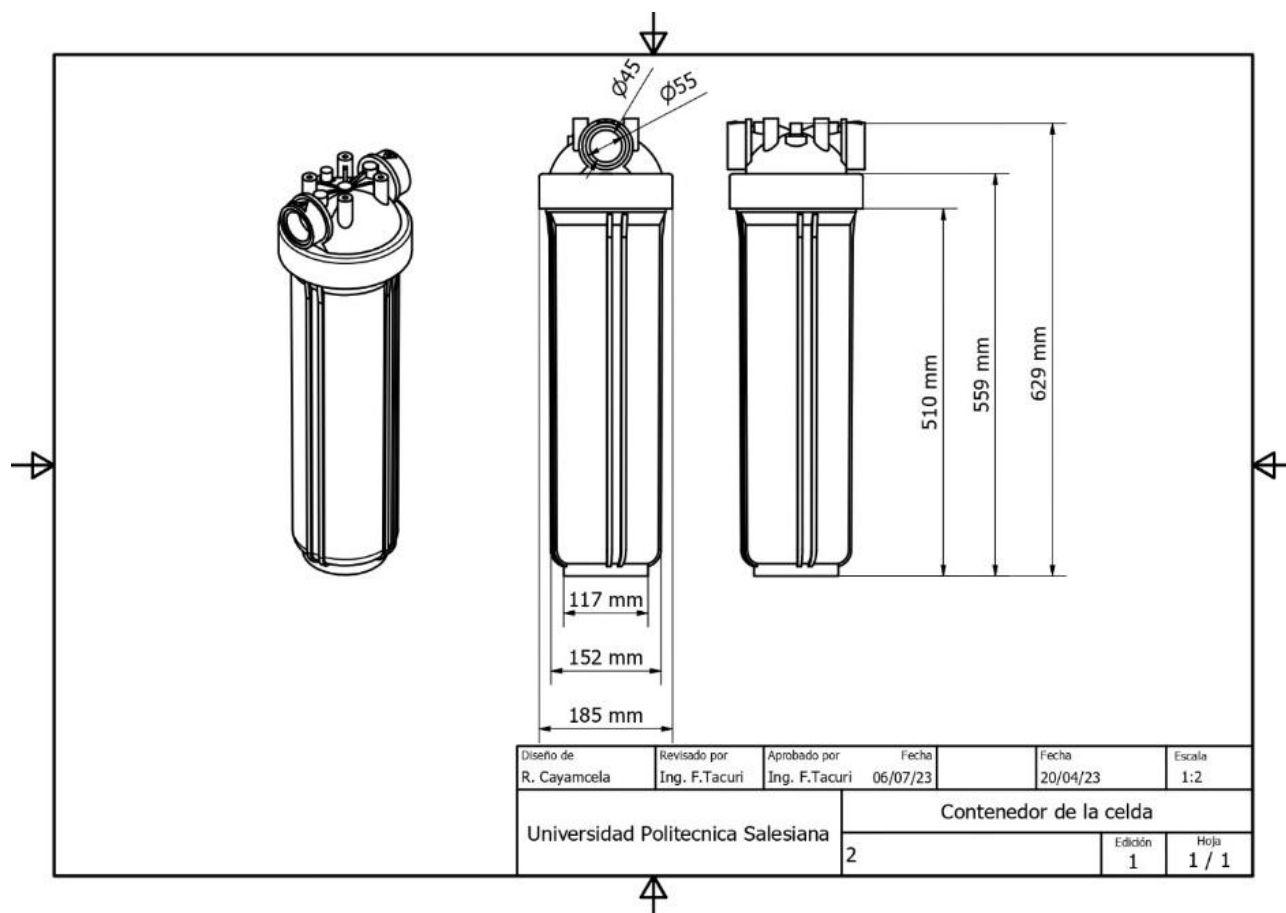
Anexo 2

Plano acotado de placas utilizadas en el cátodo y ánodo.



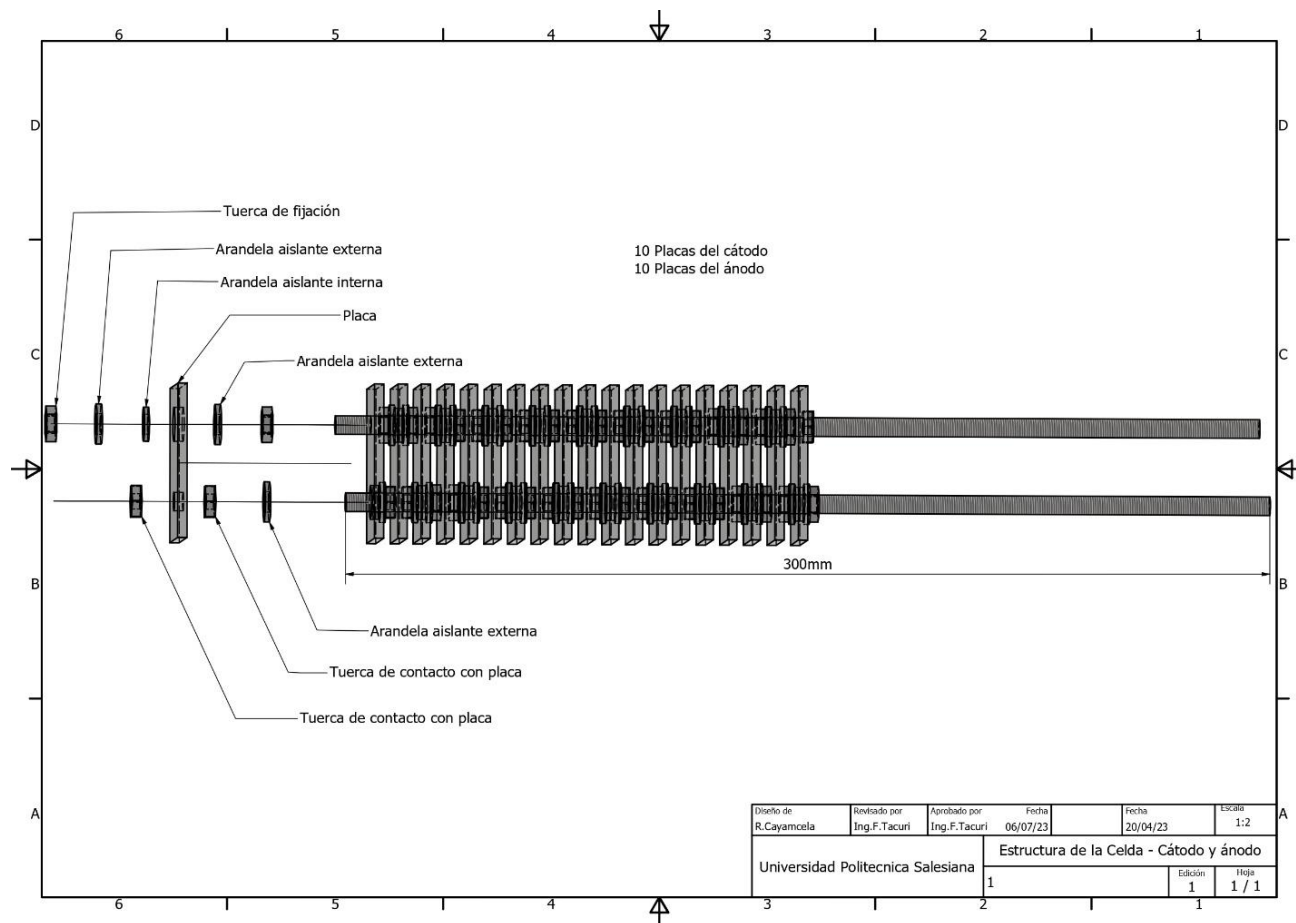
Anexo 3

Plano acotado del contenedor de la celda al mismo tiempo del burbujeador.



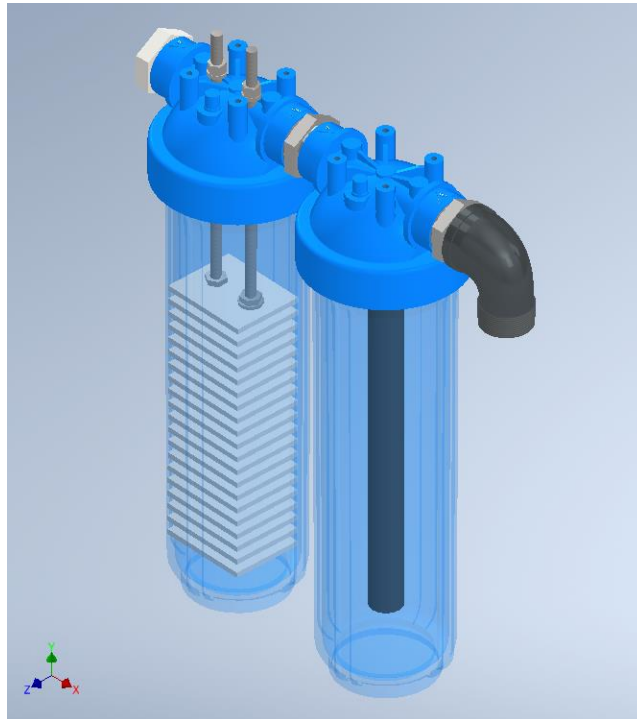
Anexo 4

Plano de ensamble, con una explosión de armado para observar la configuración de placas con su debida acotación.

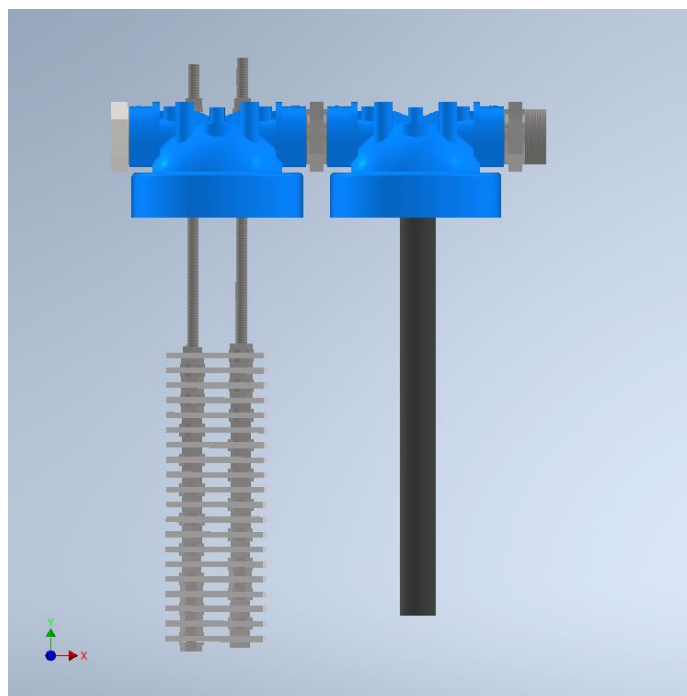


Anexo 5

Diseño de la celda de tipo húmedo en 3D en el software de inventor.

**Anexo 6**

Vista del interior de la celda y burbujeador en 3D.



Anexo 7

Pesaje del hidróxido de sodio.



Anexo 8

Motor sin tanque de combustible.



Anexo 9

Sistema de generación de hidrogeno por celda húmeda ensamblado sobre el motor estacionario.



Anexo 10

Conexión del sistema eléctrico para la celda de tipo húmedo.



Anexo 11

Ejemplo de mediciones con el motor con hidrogeno como combustible.



Anexo 12

Ejemplo de mediciones con el motor con gasolina como combustible.



Anexo 13

Intervalos de confianza calculados mediante Minitab de las emisiones de gasolina

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
20	6.1400	0.1231	0.0275	(6.0861, 6.1939)

μ : media de CO₂

Desviación estándar conocida = 0.1231

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar	IC de 95% para μ
---	-------	-----------	----------------	----------------------

de la media				
20	2.5095	0.0953	0.0213	(2.4677, 2.5513)

μ : media de CO

Desviación estándar conocida = 0.0953

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la IC de 95% para μ	
			media	μ
20	7.0925	0.0950	0.0213	(7.0507, 7.1343)

μ : media de O2

Desviación estándar conocida = 0.0953

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la IC de 95% para μ	
			media	μ
20	368.750	3.354	0.021	(368.708, 368.792)

μ : media de HC

Desviación estándar conocida = 0.0953

Anexo 14

Intervalos de confianza calculados mediante Minitab de las emisiones de hidrogeno.

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la IC de 95% para μ	
			media	μ
20	0.8550	0.0945	0.0211	(0.8136, 0.8964)

μ : media de CO2

Desviación estándar conocida = 0.0945

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la IC de 95% para μ	
			media	μ
20	0.7985	0.0724	0.0162	(0.7668, 0.8302)

μ : media de CO

Desviación estándar conocida = 0.0724

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la IC de 95% para μ	
			media	μ
20	1.8740	0.0674	0.0151	(1.8445, 1.9035)

μ : media de O2

Desviación estándar conocida = 0.0674