

Universidad Católica De Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica



“USO DEL HIDRÓGENO EN EL MOTOR D13B2 DE CICLO OTTO COMO COMPLEMENTO DEL COMBUSTIBLE”

Tesis presentada por el Bachiller:

Núñez Fuentes, Jesús Máximo

para optar el Título Profesional de

Ingeniero Mecánico Electricista

Asesor:

Dr. Gordillo Andia, Carlos Alberto

Arequipa- Perú

2021

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA MECANICA ELECTRICA Y MECATRONICA
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 27 de Noviembre del 2021

Dictamen: 004044-C-EPIMMEM-2021

Visto el borrador del expediente 004044, presentado por:

2008242591 - NUÑEZ FUENTES JESUS MAXIMO

Titulado:

**USO DEL HIDRÓGENO EN EL MOTOR D13B2 DE CICLO OTTO COMO COMPLEMENTO DEL
COMBUSTIBLE**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

1530 - FERNANDEZ BARRIGA CAMILO GRIMALDO
DICTAMINADOR



3040 - VALDEZ LOAIZA JUAN CARLOS
DICTAMINADOR



9185 - SIERRA VASQUEZ JULIO RAUL
DICTAMINADOR

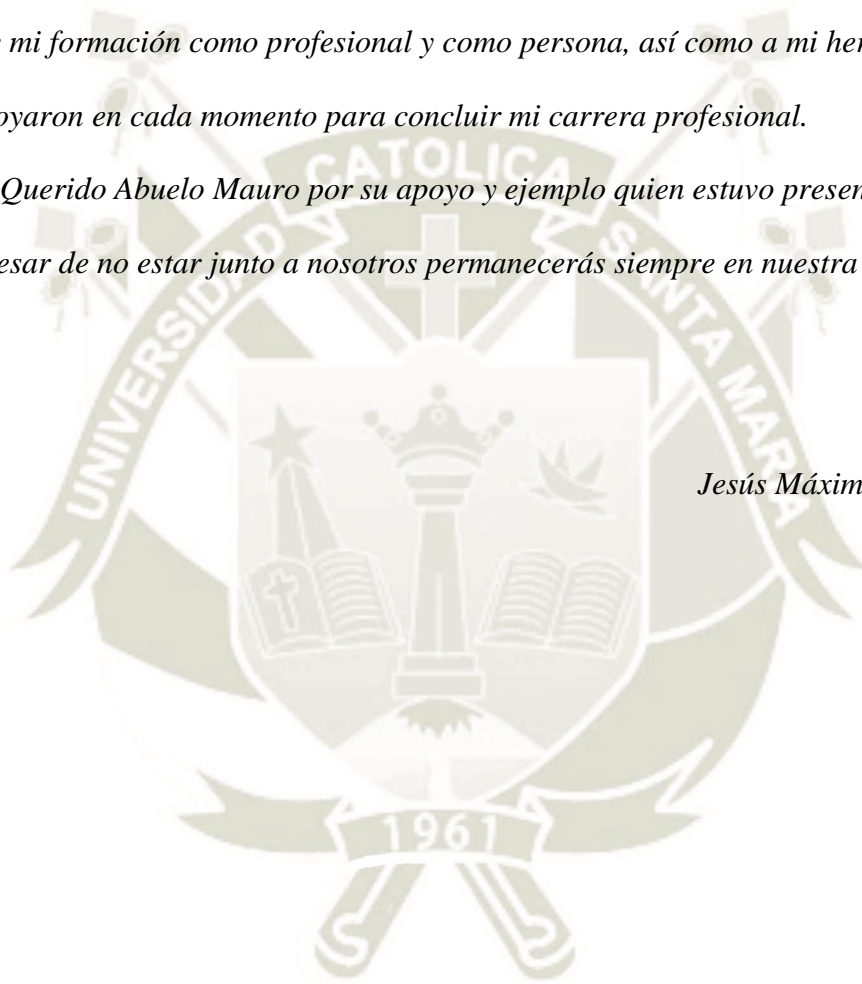


AGRADECIMIENTO

A Dios Padre Todopoderoso por la vida y salud, a mis padres Máximo Núñez Ramos y Mery Fuentes Sila quienes siempre me brindaron su amor, comprensión y su apoyo incondicional a lo largo de mi formación como profesional y como persona, así como a mi hermano Emmanuel quien me apoyaron en cada momento para concluir mi carrera profesional.

A mí Querido Abuelo Mauro por su apoyo y ejemplo quien estuvo presente cuando más lo necesite, a pesar de no estar junto a nosotros permanecerás siempre en nuestra mente y corazón.

Jesús Máximo Núñez Fuentes.



RESUMEN

La presente investigación desarrollo el estudio del uso del hidrógeno en el motor D13B2 de ciclo Otto como complemento del combustible, mediante la autogeneración propia por electrolisis en un vehículo de prueba logrando obtener una reducción al consumo de gasolina del 35% con la utilización del hidrógeno sin afectar su desempeño y eficiencia del motor y con ello un notable ahorro en los costos de adquisición de este combustible de base orgánica para cualquiera de las condiciones de operación del vehículo.

Para el desarrollo de la investigación se brindó los alcances para el diseño y construir de un generador de hidrógeno por electrolisis del tipo Celda Seca (Dry Cell) que pueda producir hidrogeno en tiempo real y ser aprovechado en el sistema de alimentación de aire del motor como fuente de energía limpia y renovable con su respectivo montaje en el vehículo con pruebas que verifiquen su desempeño para un funcionamiento continuo.

Luego con la ayuda del microcontrolador Arduino Nano usando la modulación por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés) su lenguaje de programación pudo variar el ciclo de trabajo de los generadores al 95% estabilizando la producción de hidrógeno al mantener la misma corriente de operación para ambos generadores evitando pérdidas de energía eléctrica en calor.

Seguidamente se realizaron los cálculos termodinámicos para la utilización del hidrógeno como complemento de la gasolina en el motor de ciclo Otto, obtenido experimentalmente la aportación energética de cada elemento obteniendo una variación del 1% a la eficiencia efectiva del ciclo.

Por último, se realizó el cálculo para la reducción de emisiones contaminantes implementando el sistema propuesto obteniendo una reducción del 35% para el CO_2 , CO y HC, y del 40% para PM.

Palabras Claves: Hidrogeno, generador de hidrógeno, electrolisis, modulación por ancho de impulso, emisiones.

ABSTRACT

The present research developed the study of the use of hydrogen in the Otto cycle D13B2 engine as a complement to the fuel, through its own self-generation by electrolysis in a test vehicle, achieving a reduction in gasoline consumption of 35% with the use of hydrogen without affect the performance and efficiency of the engine and with it a notable saving in the acquisition costs of this organic-based fuel for any of the vehicle's operating conditions.

For the development of the research, the scope was provided for the design and construction of a hydrogen generator by electrolysis of the Dry Cell type (Dry Cell) that can produce hydrogen in real time and be used in the engine air supply system as clean and renewable energy source with its respective mounting in the vehicle with tests that verify its performance for continuous operation.

Then with the help of the Arduino Nano microcontroller using pulse width modulation (PWM for its acronym in English) his programming language was able to vary the duty cycle of the generators to 95% stabilizing the hydrogen production by maintaining the same current of operation for both generators avoiding losses of electrical energy in heat.

Subsequently, the thermodynamic calculations were carried out for the use of hydrogen as a complement to gasoline in the Otto cycle engine, the energy contribution of each element obtained experimentally, there was a variation of 1% to the effective efficiency of the cycle.

Finally, the calculation for the reduction of pollutant emissions was carried out by implementing the proposed system, obtaining a reduction of 35% for CO₂, CO y HC, and 40% for PM.

Key words: Hydrogen, hydrogen generator, electrolysis, pulse width modulation, emissions.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad es notable observar el incremento de la contaminación ambiental y en parte la contaminación del aire que principalmente radica por la quema de combustibles fósiles en la industria, y el incremento del parque automotor cuyos motores de combustión interna aceleran de forma exponencial el incremento de gases contaminantes responsables del calentamiento del planeta y cambio de los climas a escala global. El objetivo de la presente investigación es el uso del hidrógeno en el motor D13B2 de ciclo Otto como complemento del combustible mediante la autogeneración propia por electrolisis realizado en un vehículo de prueba. Para llevarlo a cabo la presente investigación se ha estructurado en 5 capítulos.

El capítulo 1 nos brinda los aspectos generales de la investigación tales como la descripción del problema, objetivos generales y específicos, justificación, alcances y limitaciones.

El capítulo 2 se describe el marco teórico que nos da los alcances para el desarrollo de la investigación, tales como conceptos energías renovables, explicación del ciclo Otto y nuevas tecnologías que utilizan el hidrógeno para el funcionamiento de los motores modernos.

El capítulo 3 se describe las técnicas para el diseño y construcción de las etapas de generación de hidrógeno, etapa potencia y control como sus respectivos cálculos.

El capítulo 4 describe la secuencia para el montaje de las líneas de agua y gas, así como los accesorios y sistema eléctrico en el vehículo de prueba para la producción de hidrógeno.

El capítulo 5 se desarrolla la ingeniería del proyecto donde se realiza los cálculos termodinámicos del ciclo Otto con uso de la gasolina y con el hidrógeno como complemento de este combustible para luego compararlos, seguido del cálculo para la reducción de emisiones contaminantes

ÍNDICE

DICTAMEN APROBATORIO DE BORRADOR DE TESIS	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
INTRODUCCIÓN	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
CAPÍTULO I	1
1. MARCO METODOLÓGICO.....	1
1.1. Descripción del Problema	1
1.2. Objetivos de la Investigación.....	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Justificación	2
1.4. Alcance	3
1.5. Limitaciones.....	3
CAPÍTULO II.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	4

2.1. Antecedentes de la Investigación.....	4
2.2. El Hidrógeno.....	6
2.2.1. El Hidrógeno como Vector Energético.....	7
2.2.2. Métodos de Producción.....	8
2.2.3. Participación del hidrógeno en la industria.....	27
2.3. Motores de combustión interna alternativo.....	30
2.3.1. Criterios de clasificación.....	31
CAPÍTULO III.....	39
3. DISEÑO PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	39
3.1. Generalidades.....	39
3.2. Análisis y experimentación de datos.....	39
3.3. Distribución de los componentes del sistema de generación de hidrógeno.....	40
3.3.1. Etapa de Generación de Hidrogeno.....	41
3.3.2. Etapa de Potencia.....	63
3.3.3. Etapa de Control.....	67
CAPÍTULO IV.....	73
4. MONTAJE EN EL VEHICULO DE PRUEBA.....	73
4.1. Sistema de Agua y Gas.....	73
4.1.1. Accesorios.....	74
4.2. Sistema de Eléctrico.....	78

4.2.1. Conexión del microprocesador.	81
4.2.2. Accesorios.	84
4.3. Montaje.	87
4.3.1. Montaje de Sistema de línea de Agua, Gas y Eléctrico.	87
CAPÍTULO V.....	95
5. INGENIERÍA DEL PROYECTO.....	95
5.1. Calculo Térmico del Motor Encendido por Chispa.	96
5.1.1. Cantidad de aire teórico para la combustión de 1 kg de combustible.	96
5.1.2. Cantidad de aire real para la combustión de 1 kg de combustible.	96
5.1.3. Cantidad total de mezcla fresca.	97
5.1.4. Proceso de Admisión.	97
5.1.5. Proceso de Compresión.....	101
5.1.6. Proceso de Combustión.....	102
5.1.7. Proceso de Expansión.	110
5.1.8. Índices del Ciclo de Trabajo.	111
5.1.9. Resultados.	115
5.2. Cálculo Térmico del Motor Encendido por Chispa usando hidrógeno como complemento del combustible.	116
5.2.1. Índices del Ciclo de Trabajo para la Prueba N°1 utilizando Gasolina.	119

5.2.2. Índices del Ciclo de Trabajo para la Prueba N°2 utilizando el hidrógeno como complemento del combustible.	126
5.3. Ensayos utilizando el hidrógeno como complemento.....	136
5.4. Comparación de resultados.	140
5.5. Costo beneficio de la implementación del sistema de hidrógeno.	143
5.5.1. Consumo de agua.	146
5.6. Reducción de emisiones contaminantes.....	147
5.6.1. Emisiones contaminantes del motor encendido por chispa.	148
5.6.2. Reducción de emisiones contaminantes utilizando el sistema de hidrógeno.....	149
CONCLUSIONES	155
RECOMENDACIONES.....	157
BIBLIOGRAFÍA	158
ANEXOS	164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Potencia instalada en energías renovables periodo 2009 – 2020.....	13
Tabla 2. Incremento potencia instalada de la energía solar periodo 2010 – 2020.	16
Tabla 3. Incremento potencia instalada de la energía eólica periodo 2010 – 2020.	20
Tabla 4. Parámetros de trabajo de la Electrolisis Alcalina.	25
Tabla 5. Parámetros de trabajo de la electrolisis de membrana polimérica protónica.	26
Tabla 6. Cuadro comparativo para los procesos de los ciclos Otto y Diesel.	38
Tabla 7. Ensayos del generador de hidrogeno.	58
Tabla 8. Porcentaje ideal de electrolito para la producción de hidrogeno.	62
Tabla 9. Valores del transistor 2N3055 NPN.	65
Tabla 10. Principales valores del Arduino Nano.	68
Tabla 11. Componentes del Arresta llamas.	75
Tabla 12. Componentes del Sistema de Agua y Gas.	76
Tabla 13. Componentes del Sistema de Eléctrico.....	85
Tabla 14. Especificaciones técnicas del automóvil.....	95
Tabla 15. Calor específico molar medio de los gases a volumen constante (kJ kmol. °C).	104
Tabla 16. Resultados obtenidos de la interpolación.....	106
Tabla 17. Energía interna de los productos de combustión U_z'' (MJ Kmol).....	108
Tabla 18. Resultados del motor a gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa.	116
Tabla 19. Valores obtenidos en las prueba N°1.....	119
Tabla 20. Resultados de los parámetros de operación del motor a gasolina prueba N°1.	126
Tabla 21. Valores obtenidos en la prueba N°1 y 2.....	127
Tabla 22. Resultados de los parámetros de operación del motor a gasolina prueba N°2.	136

Tabla 23. Valores obtenidos en las pruebas de gasolina vs. hidrógeno.	137
Tabla 24. Porcentaje de participación de ambos combustibles.....	138
Tabla 25. Resultados de los cálculos utilizando solo gasolina.	139
Tabla 26. Resultados de los cálculos, gasolina vs. sistema de hidrógeno.....	139
Tabla 27. Rendimiento del combustible utilizando el sistema de hidrógeno.....	140
Tabla 28. Consumo y ahorro del combustible utilizando el sistema de hidrógeno.	144
Tabla 29. Costos del consumo de combustible, gasolina vs. sistema de hidrógeno.	144
Tabla 30. Consumo de agua durante la utilización del sistema de hidrógeno.	146
Tabla 31. Rendimiento del tanque de agua durante la utilización del sistema de hidrógeno. ...	147
Tabla 32. Emisiones de gases contenidos utilizando gasolina.	150
Tabla 33. Consumo de gasolina vs. sistema de hidrógeno.....	151
Tabla 34. Emisión de gases contaminantes gasolina vs. sistema de hidrógeno.....	151
Tabla 35. Reducción de gases contaminantes gasolina vs. sistema de hidrógeno.	152
Tabla 36. Porcentaje de reducción de emisiones con el sistema de hidrógeno.....	152
Tabla 37. Reducción de gases contaminantes en un año.	154

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de energías a nivel mundial.....	8
Figura 2. Incremento de las energías renovables, periodo 2009 – 2020.....	13
Figura 3. Generación de energía solar.	15
Figura 4. Generación de energía solar en el periodo 2010 – 2020.	16
Figura 5. Precio de la electricidad para diferentes fuentes de energía.....	17
Figura 6. Generación de energía eólica.	19
Figura 7. Generación de energía eólica en el periodo 2010 – 2020.....	20
Figura 8. Generación de energía eólica en el periodo 2010 – 2019.....	21
Figura 9. Diagrama básico de un sistema de electrólisis de agua.....	23
Figura 10. Proceso para obtención de hidrógeno por electrolisis alcalina.....	24
Figura 11. Electrolisis por membrana polimérica protónica.....	25
Figura 12. Proceso para obtención de hidrógeno por electrolisis de membrana polimérica protónica.	26
Figura 13. Comparación de costes de producción por tipo de hidrógeno (€/kg).....	27
Figura 14. Tipología de vehículos de hidrógeno.	30
Figura 15. Procesos del motor de cuatro tiempos (4T).....	33
Figura 16. Ciclo termodinámico teórico del ciclo Otto.	34
Figura 17. Ciclo termodinámico real del ciclo Otto.	35
Figura 18. Diagrama de distribución del motor de cuatro tiempos.	36
Figura 19. Ciclo termodinámico teórico del ciclo Diesel.	37
Figura 20. Honda Civic Ferio de 1992.	40
Figura 21. Celda húmeda.	42

Figura 22. Celda seca.....	43
Figura 23. Simulación del generador de hidrogeno.....	46
Figura 24. Tapas del Generador de Hidrogeno.....	47
Figura 25. Electrodo de carga y neutro.....	48
Figura 26. Junta oring de goma.....	50
Figura 27. Proceso de ensamblaje del generador de hidrogeno.....	52
Figura 28. Uso de Silicona para el ensamble del generador de hidrógeno.....	53
Figura 29. Generador de hidrógeno concluido.....	54
Figura 30. Ensayos del generador de hidrogeno.....	59
Figura 31. Concentraciones solidas del Electrolito.....	60
Figura 32. Cambio coloración de los electrodos.....	61
Figura 33. Configuración final de los generadores de hidrogeno.....	63
Figura 34. Transistor 2N3055.....	64
Figura 35. Configuración de los transistores 2N3055.....	66
Figura 36. Arduino NANO.....	67
Figura 37. Señal de modulación por ancho de pulso.....	68
Figura 38. Señal de modulación por ancho de pulso de diseño.....	71
Figura 39. Código de programación Arduino Nano.....	72
Figura 40. Arresta llamas.....	76
Figura 41. Interruptor de marcha para la producción de hidrógeno.....	78
Figura 42. Electroválvula de la línea de Gas.....	79
Figura 43. Reloj Amperímetro.....	80
Figura 44. Corriente Eléctrica de trabajo.....	80

Figura 45. Descripción de los principales pines del Arduino Nano.	81
Figura 46. Regulador de voltaje XL4015-1.	82
Figura 47. Módulo 2 relé.	83
Figura 48. Distribución del circuito de control.	84
Figura 49. Montura de los generadores de hidrógenos.	88
Figura 50. Montaje de los generadores de hidrógenos puesto en el motor.	89
Figura 51. Montaje de los generadores de hidrógenos en el motor, vista posterior.	89
Figura 52. Montaje de los generadores de hidrógenos en el motor, vista inferior.	90
Figura 53. Válvula tipo bola para drenado del agua.	90
Figura 54. Conexión eléctrica de los generadores.	91
Figura 55. Ubicación de la etapa de potencia.	92
Figura 56. Etapa de Potencia en el vehículo, vista superior.	92
Figura 57. Línea de Gas suministro de hidrógeno.	93
Figura 58. Componentes de la Línea de Gas.	93
Figura 59. Ingreso del hidrógeno al motor.	94
Figura 60. Diseño producción de hidrógeno.	94
Figura 61. Carretera panamericana sur Asociación Progreso 48 Zona 2 Arequipa.	117
Figura 62. Pruebas realizadas en el grifo Petro América, Asociación Progreso 48 Zona 2.	118
Figura 63. Distancia de recorrido 100km.	118
Figura 64. Consumo de gasolina vs sistema de hidrogeno.	141
Figura 65. Consumo de especifico efectivo, gasolina vs. sistema de hidrógeno.	141
Figura 66. Consumo horario de combustible, gasolina vs. sistema de hidrógeno.	142
Figura 67. Eficiencia efectiva del ciclo, gasolina vs. sistema de hidrógeno.	142

Figura 68. Rendimiento del combustible, gasolina vs. sistema de hidrógeno. 143

Figura 69. Diferencias de costo al consumo de combustible, gasolina vs. sistema de hidrógeno.
..... 145

Figura 70. Reducción de gases contaminantes. 152



CAPÍTULO I

1. MARCO METODOLÓGICO

1.1. Descripción del Problema

La mayor parte de la energía empleada actualmente en el mundo proviene de la quema de combustibles de origen orgánico, ya que se utilizan en el sector de transporte, el cual es de vital importancia para las actividades económicas del País. Según la publicación del Reporte Mundial de Calidad del Aire (2019), el Perú se encuentra en el puesto 21 de 50 países a nivel mundial con peores índices en contaminación del aire.

De acuerdo a la publicación del INEI (2020) la contaminación por agentes tóxicos, tales como partículas finas en suspensión expulsadas por la combustión en los vehículos, son los principales causantes del cambio climatológico en nuestro País, como por ejemplo: óxidos de nitrógeno (NO_x), que se forma como subproducto en los procesos de combustión a altas temperaturas, y el monóxido de Carbono (CO), gas incoloro y altamente tóxico que puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados.

Según la OMS (2019), considera que la contaminación del aire es el mayor riesgo ambiental para la salud, los contaminantes microscópicos en el aire pueden penetrar los sistemas respiratorios y circulatorios, produciendo enfermedades como el cáncer y los accidentes cerebrovasculares, dando como causante principal a la quema de combustibles fósiles que también contribuye de manera importante al cambio climático, lo que repercute en la salud de las personas.

Es por eso, que, por lo expuesto anteriormente, se propone la siguiente investigación que, a través del uso del hidrógeno, como fuente de energía limpia y renovable en motores de combustión interna, se pueda reducir la contaminación del aire producida por el parque automotor, aplicado al transporte liviano.

1.2. Objetivos de la Investigación

1.2.1. Objetivo General

Uso del hidrógeno en el motor D13B2 de Ciclo Otto como complemento del combustible, mediante la autogeneración propia de hidrógeno por electrolisis de tal forma que no afecte el rendimiento y funcionamiento del ciclo actual del motor, demostrando la reducción al consumo de combustible, así como también demostrar la reducción de agentes contaminantes haciendo uso del sistema propuesto.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el funcionamiento del ciclo del motor actual, para luego comparar con el sistema propuesto.
- Realizar el diseño, construcción y montaje de dispositivos y sistemas capaces de usar el hidrógeno como combustible alternativo en un vehículo de prueba para el motor D13B2 elaborando los protocolos de pruebas para el uso del hidrógeno como complemento del combustible.
- Demostrar el ahorro al consumo del combustible y reducción de agentes contaminantes haciendo uso del sistema propuesto.

1.3. Justificación

En la actualidad se tienen problemas de gran magnitud como resultado del parque automotor, que afectan la calidad de vida como la conocemos, debido a la emisión de agentes contaminantes tales como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x) responsables del cambio climático.

Por ello en la presente investigación se propone un diseño que contribuirá a mitigar la emisión de agentes contaminantes en relación de causa – efecto en beneficio al medio ambiente

haciendo uso del hidrogeno, ya que el proceso de transición para la reducción y fin al consumo energético de combustibles fósiles se proyecta de forma progresiva hasta finales de siglo. De la misma forma esta investigación tendría un impacto económico de alto índice ya que al establecerse como un combustible alternativo se conformarían economías de escala, lo que propiciará la generación de una industria de hidrógeno con fines energéticos.

1.4. Alcance

La presente investigación tiene como alcance el estudio y diseño de dispositivos y sistemas capaces de producir y aprovechar el hidrógeno para el funcionamiento del motor D13B2 de combustión interna encendido por chispa, así como demostrar que el uso del sistema propuesto no afectaría el rendimiento del ciclo actual del motor, comprobado por cálculos termodinámicos justificados con la utilización del hidrógeno como complemento del combustible. Así mismo demostrar el ahorro al consumo de combustible con pruebas que lo evidencien, sumado a esto demostrar la reducción de agentes contaminantes.

1.5. Limitaciones

En la presente investigación mencionaremos algunas limitaciones para tener en cuenta en el desarrollo de esta, las cuales son las siguientes:

- La presente tesis no contempla el uso del hidrogeno para motores de ciclo Diésel, tampoco para motores gasolineras superiores a 1500cm³ de cilindrada.
- La presente tesis no contemplara un diseño capaz de reemplazar en su totalidad el combustible al cual fue diseñado el motor.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación.

A continuación, se enumera investigaciones que han incursionado en la utilización del hidrógeno y cómo influye este combustible alternativo en motores de combustión interna.

En la investigación titulada “Adaptación de un motor de combustión interna alternativo de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno como combustible. Aplicaciones energéticas y de automoción” de Sáinz (2014), quien realizó la conversión de un motor de gasolina experimental para su funcionamiento con hidrógeno. Para llevarlo a cabo en el prototipo se efectuaron modificaciones significativas a la configuración del motor tales así como el reemplazo del colector de inyección de gasolina por una rampa de inyección de hidrógeno en el colector de admisión, la instalación de un intercambiador aceite por uno de agua para evitar posibles sobrecalentamientos, y la instalación de una unidad electrónica programable que permite el control del motor en conjunto con la marcha del hidrógeno utilizando un contenedor externo que suministres dicho gas a la línea de modificada de admisión, demostrando de esta manera la viabilidad de la conversión de este tipo de motores de encendido provocado de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno.

En la investigación titulada “Motor de combustión interna adaptado para funcionar con hidrógeno autogenerado mediante electrólisis” de Chávez (2018), desarrolló un prototipo que utiliza hidrógeno gaseoso obtenido mediante la electrólisis del agua, utilizando dos tipos de generadores de hidrogeno que permita el funcionamiento del motor combustión interna a gasolina de 110cm³ con una autonomía de 8s, recomendando para un uso continuo el almacenamiento del hidrógeno en un tanque que permita suministrar la demanda del motor.

La investigación titulada “Diseño de un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen 1.5 L en la ciudad de Huancayo” de Baltazar (2020), utiliza un generador de hidrógeno prototipo por electrólisis de funcionamiento intermitente para el uso del motor, de esta manera se espera que al utilizar el hidrógeno mejore la mezcla para el proceso de combustión y obtener una posible reducción de los gases contaminantes.

En la investigación titulada “Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna” de Diaz (2017), utiliza el hidrógeno como aditivo para el combustible producido a partir de un generador de dimensiones reducidas a partir de la electrólisis del agua esto según al consumo del motor, y poder ser utilizado en un motor de combustión interna de motocicleta de 4 tiempos de cilindrada 110cm^3 a gasolina, de esta manera se consigue la disminución de gases nocivos al medio ambiente y dañinos a la salud, se espera en la experimentación reducir el consumo de combustible.

La investigación titulada “Diseño de un sistema de control para inyección de hidrógeno en la cámara de combustión de un motor de combustión interna de cuatro tiempos” realizó por Gonzáles (2005), desarrollo con componentes electrónicos un circuito montado en el volante del cigüeñal capaz de activar la inyección de hidrógeno en relación de los grados de giro del cigüeñal y las aperturas de las válvulas de admisión y teniendo esta función bien definida se permite tener saber la velocidad a la cual está girando del motor y permitir la inyección de hidrógeno, la finalidad de la investigación es poder mejorar de manera periódica los tiempos de inyección de hidrógeno según la demanda a la cual este sometida el motor, para las pruebas se utilizó tanques de almacenamiento de hidrógeno para el suministrar continuo del motor y efectuar los ensayos.

2.2. El Hidrógeno.

Según Suarez (2019) en su publicación “Un poco de todo sobre el Hidrógeno”, el hidrógeno es el elemento más simple y el elemento que forma más compuestos, forma parte de toda la materia orgánica y está distribuido no sólo en la tierra sino en el universo, principalmente está presente en el agua compuesto principal para la vida. En condiciones normales se encuentra en estado gaseoso, es insípido, incoloro e inodoro y altamente inflamable.

A diferencia de los combustibles convencionales tales como el carbón, petróleo y el gas (no renovables), el hidrógeno no es un recurso natural que se encuentre libre en el planeta, por tanto, no es un combustible que pueda extraerse directamente de la naturaleza, sino que es un vector energético y por ello se tiene que producir.

El hidrógeno puede estar en diferentes estados ya sea líquido o gaseoso siendo este último el más frecuente, el hidrógeno es un portador de energía, considerado un combustible ligero de combustión limpia y libre de emisiones de carbono, por consiguiente, su combustión no afecta al medio ambiente, en la actualidad es utilizado en pilas de combustible dando como subproductos calor y agua.

Además nos redacta sobre lo acontecido sobre el hidrógeno a los largo de la historia, historia que se remonta por los años 1500 donde el alquimista T. Von Hohenheim (conocido como Paracelso) fue el primero en observar en mezclas de metales con ácidos fuertes un desprendimiento de un gas en la reacción, no fue consciente del descubrimiento de un nuevo elemento, no fue hasta 1766 que Henry Cavendish describió a este gas como un elemento químico que al arder con el oxígeno formara agua y en 1783 Antoine Lavoisier lo bautizó como “hidrógeno”, o “generador de agua”.

2.2.1. El Hidrógeno como Vector Energético.

El hidrógeno es el elemento más simple de toda la tabla periódica, en la atmósfera terrestre no se encuentra como un elemento libre, esto no significa que la fuente primaria que lo contiene este limitado, el agua es portadora por excelencia de este elemento y se encuentra contenida en los océanos del planeta ocupando las dos terceras partes del globo. Esto genera un desafío, ya que para obtener hidrógeno es necesario producirlo al igual que la electricidad con la ventaja adicional que este gas puede ser almacenado y utilizado posteriormente para ciertas aplicaciones lo que lo hace un vector energético muy apreciado.

Según Fúnez, C.; Almansa, E.; Fuentes, D. (2010), nos da los alcances sobre el hidrógeno como vector energético, quien es un nexo entre las fuentes de energía primaria y los diferentes sectores de consumo. El incremento energético cada año es mayor, la electricidad es uno de los principales portadores energéticos utilizados en la industria puesto que puede producirse a partir de cualquier fuente de energía (renovable o no renovable) y puede ser transportada hasta los centros de consumo, siendo su principal desventaja su almacenamiento, por esto el hidrógeno es un vector energético que complementa a la electricidad por tener las características de fácil almacenaje, transportable, no contaminante y renovable.

De igual manera en la publicación “Un poco de todo sobre el Hidrógeno” hecha por Suárez (2019), también nos da alcances sobre el hidrógeno como vector energético, enfocada a una combinación adecuada de recursos naturales por regiones, por tanto, donde exista exceso de irradiación solar o disposición de la energía del viento es posible producir hidrógeno, tenerlo que producir es inevitable ya que en el planeta no se cuenta con yacimientos de hidrógeno como si los tiene el petróleo. Por lo tanto, se propone usar agua y una fuente de energía renovable que genere

electricidad para su producción, y por ser renovables utilizarlo de forma eficiente cuando se requiera hidrógeno en ciertas aplicaciones en la industria.

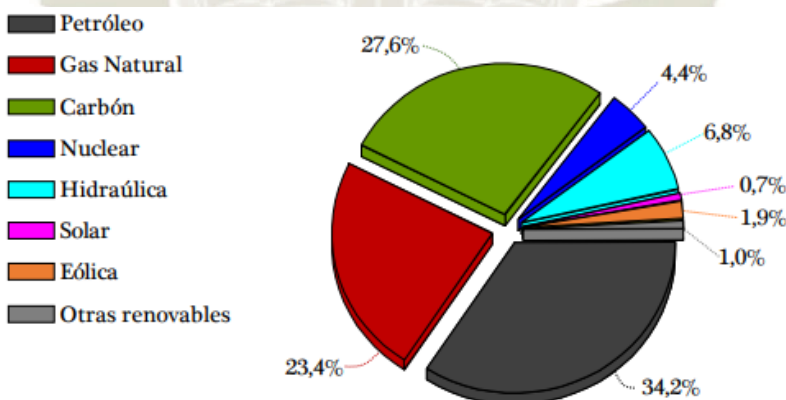
2.2.2. Métodos de Producción.

En la publicación hecha por Valencia & Cardona (2013). “Análisis del ciclo de vida para la producción de hidrógeno”, resalta que el modelo energético actual está basado en la utilización de combustibles fósiles, el cual representa el 85% de la energía que se consume a nivel mundial actualmente, esta dependencia representa serios problemas de sostenibilidad en un futuro cercano, así como también problemas que afectan los ecosistemas y un notable daño a la salud de la población.

A continuación, en la figura 1 se representa el consumo de energías a nivel mundial encabezando el petróleo y carbono como fuente primaria.

Figura 1.

Consumo de energías a nivel mundial.



Fuente: Gil (2018).

Es evidente la necesidad de buscar nuevas alternativas energéticas que limiten las emisiones de gases de efecto invernadero y que conlleve a mejorar las condiciones de vida sin frenar el desarrollo económico, social e industrial, hacen del hidrógeno una alternativa energética del futuro bastante ideal, abundante, renovable y de combustión limpia.

Por lo expuesto anteriormente el hidrógeno es un portador de energía al igual que la electricidad, según la publicación realizada por Fernández (2021) “Hidrógeno verde: el combustible eterno que alumbra una nueva era” en el periódico El País, la producción actual de hidrógeno es de 120 millones de toneladas cada año una cifra que se ha triplicado desde 1975, de los cuales el 95% son obtenidas a partir de combustibles fósiles (comúnmente a partir del gas natural), dando como resultado la producción de CO₂ entre 9 y 11 toneladas por cada kilogramo obtenido de hidrógeno alcanzando la cifra entre 70 y 100 millones de toneladas de CO₂ solo en la Unión Europea en el mismo 2020.

A sí mismo en dicha publicada nos da un panorama de la producción del hidrógeno a partir de energías renovables “hidrógeno verde” y la producida por fuentes no renovables denominadas como “hidrógeno gris y azul”, se procede a su desarrollo de esta clasificación ambiental.

2.2.2.1. De Fuentes no Renovables.

La producción de hidrógeno a partir de fuentes no renovables (llamadas también convencionales) son aquellos donde la materia prima son los combustibles fósiles, ciertamente es una materia finita y que su producción genera gases contaminantes que alteran los ecosistemas y la calidad del aire, pero gracias a los avances tecnológicos es posible reducir significativamente la emisión de estos gases, pero no en su totalidad. A continuación, daremos los puntos más resaltantes en la producción de hidrógeno a escala industrial.

- **Gasificación del carbón:** La producción de hidrógeno a partir de este proceso es llamada “hidrogeno gris” a partir del carbón, se podría pensar que la utilización del carbón es sinónimo de contaminación, pero en la actualidad la utilización de este recurso ocupa el tercer lugar en el consumo de energía primaria a nivel mundial con

una participación del 27,6% y el 40% aproximadamente de la electricidad generada (Gil, 2018).

La gasificación del carbón consiste en una combustión con defecto de oxígeno donde se obtiene productos secundarios (gas de síntesis) tales como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂) y metano (CH₄), en proporciones diversas según la composición del carbón (carbón pardo más comúnmente usado) y las condiciones del proceso. El proceso es endotérmico por ende necesitando aportes de energía en forma de calor que oscila entre 700°C y 1500°C, y debido a que el oxígeno se limita entre un 10 y un 50% (oxidación parcial) lo que genera calor y dióxido de carbono (CO₂) como productos de la semirreacción, puesto que no se agrega lo suficiente para quemar completamente el carbón, solo para generar calor para la reacción de gasificación.

Ahora el dióxido de carbono (CO₂) reacciona con el resto de carbón para formar monóxido de carbono (CO) y este último reacciona más con vapor de agua (reacción de desplazamiento), generando hidrógeno (H₂) y dióxido de carbono (CO₂). Luego el hidrógeno es purificado para presurizar y almacenarlo o generar electricidad a través de una celda de combustible.

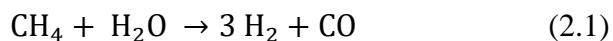
El proceso de gasificación del carbón para la producción de hidrógeno no es ecológico, según la publicación realizada por Richard Anderson (2014) “Gasificación del carbón: ¿la energía limpia del futuro?” en la BBC expone dos graves problemas utilizando este proceso, el primero dando sentado que la gasificación de carbón produce más dióxido de carbono (CO₂) que las centrales de carbón ya existentes y el segundo es el uso de agua puesto que es uno de los

sistemas de generación de energía que emplea grandes cantidades de este recurso para ejecutar la reacción de desplazamiento por consiguiente viable desde el punto de vista económico y energético pero no desde el punto de vista ecológico por incrementar el cambio climático.

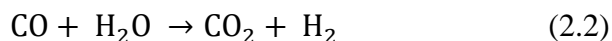
Actualmente se investiga para liberarse de los gases contaminantes los cuales son posibles ser inyectados y almacenados en depósitos subterráneos considerando no hacerlo cerca de posibles acuíferos por presencia de fuga.

- **Reformado:** La producción de hidrógeno a partir de este proceso es llamada “hidrogeno azul” a partir del gas natural (hidrocarburo ligero). Este método es el más usado y de mayor importancia a nivel mundial por sus costos, el proceso es una reacción endotérmica (aporte de energía en forma de calor) en el cual mediante un catalizador (compuesto de níquel o óxidos de hierro) y vapor de agua a alta temperatura entre 700°C a 900 °C y presiones de 3 a 25 bar que al reaccionarlo con el gas natural que tiene altas concentraciones de metano (CH₄) se obtiene producto de la reacción hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO).

Para el proceso del reformado del gas natural se producen dos reacciones, la ecuación 2.1 nos muestra la primera reacción del reformado un proceso endotérmico en donde el calor suministrado para la reacción se obtiene de quemar parte o exceso del metano, el cual genera pérdidas tanto en los reactivos como en los productos que en este caso en el hidrógeno.



Y una segunda reacción exotérmica de desplazamiento con vapor de agua donde la reacción de intercambio “gas – agua” se lleva a cabo para formar hidrógeno, según la reacción:



Este proceso se purifica en membranas donde se obtienen purzas de obtención de hidrógeno que alcanzan el 99.99%, el resto de los gases constituyen los llamados gases de cola los cuales se recirculan hacia los quemadores por ser gases de síntesis. A su vez este proceso tiene el inconveniente de generar como producto final dióxido de carbono (CO₂) gas de efecto invernadero, pero al igual que el proceso de gasificación del carbón se investiga para inyectar este gas y almacenarlo en depósitos subterráneos sin perjudicar los ecosistemas.

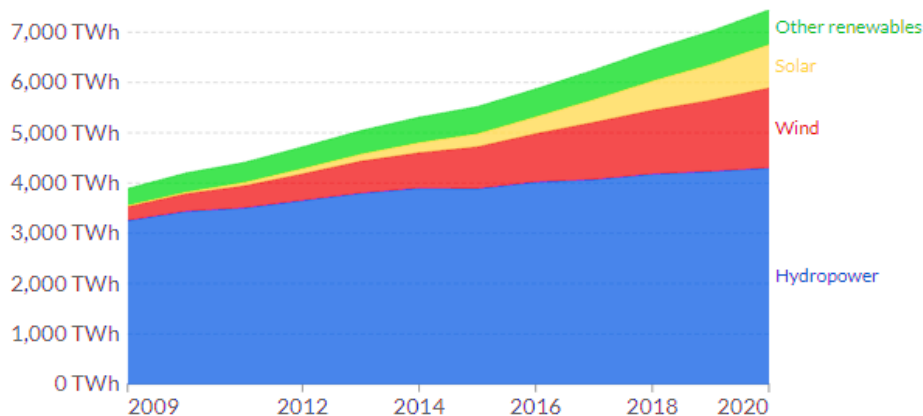
2.2.2.2. De Fuentes Renovables.

Las fuentes renovables son aquellos donde la materia prima no proviene de combustibles fósiles sino de fuentes limpias e inagotables en la naturaleza, los cuales por procesos naturales se regeneran constantemente tales como el agua, viento y la luz solar.

A continuación, en la figura 2 se muestran el incremento de las energías hidroeléctrica, solar y eólica en la última década, el desglose en áreas apiladas para estas energías nos da una clara evidencia del avance tecnológico en el tiempo.

Figura 2.

Incremento de las energías renovables, periodo 2009 – 2020.



Fuente: Our World in Data (2021).

Como se puede observar en la figura 2 la energía hidroeléctrica predomina frente a la eólica y solar como fuente renovable a nivel mundial, a su vez en la tabla 1 precisamos los valores la producción.

Tabla 1.

Potencia instalada en energías renovables periodo 2009 – 2020.

Fuente de Energía	2009	2020	Incremento
	TWh	TWh	
Solar	21	856	23%
Viento	276	1591	37%
Hidroeléctrica	3252	4297	29%
Otros	339	700	10%
Total	3888	7444	48%

Fuente: Elaboración propia.

El aprovechamiento de estos recursos se ve reflejado en el uso de las tecnologías eólica y solar (por citar las de mayor impacto a nivel mundial) los cuales se destinan para una transición a la producción de energía eléctrica con bajas emisiones de carbono, para ello ambas tecnologías deben ser competitivas con sus costos de producción en comparación a la generación eléctrica procedente de combustibles fósiles.

Su potencial es posible aprovecharlo para la producción de hidrógeno a partir de ambas fuentes renovables, este tipo de hidrógeno producido a partir de energía renovables recibe el nombre “hidrogeno verde”.

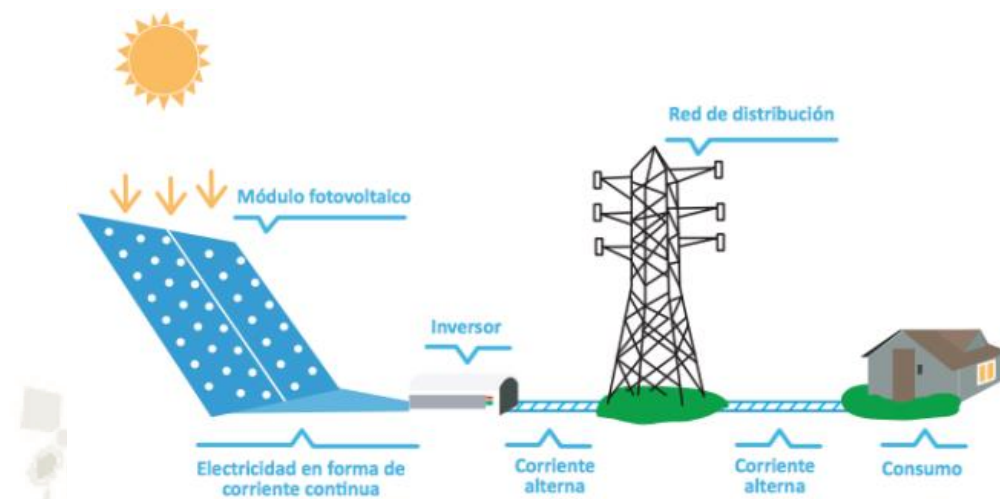
A continuación, daremos los puntos más resaltantes de ambas fuentes renovables a escala industrial y su posible uso para la producción del hidrógeno.

- **Solar:** Este tipo de energía renovable proviene de la radiación solar, fuente de energía limpia e inagotable, actualmente es posible transformar su radiación en energía térmica y eléctrica, el primer término aprovecha en calentar agua para obtener vapor y mover una turbina que genere electricidad a través de un generador, y el segundo utiliza paneles fotovoltaicos que transforman directamente la radiación solar en electricidad.

La captura de la radiación solar puede darse en cualquier lugar del planeta y el aumento de su eficiencia de forma progresiva lo hace competitivo teniendo un crecimiento acelerado en la última década en lo que respecta a su potencia instalada y una baja de forma sostenida en sus costos de producción en comparación a la energía que brindan los combustibles convencionales dejando de producir gases de efecto invernadero responsables del cambio climático del planeta (IRENA, 2020), a continuación en la figura 3 mostramos un esquema de la generación solar.

Figura 3.

Generación de energía solar.



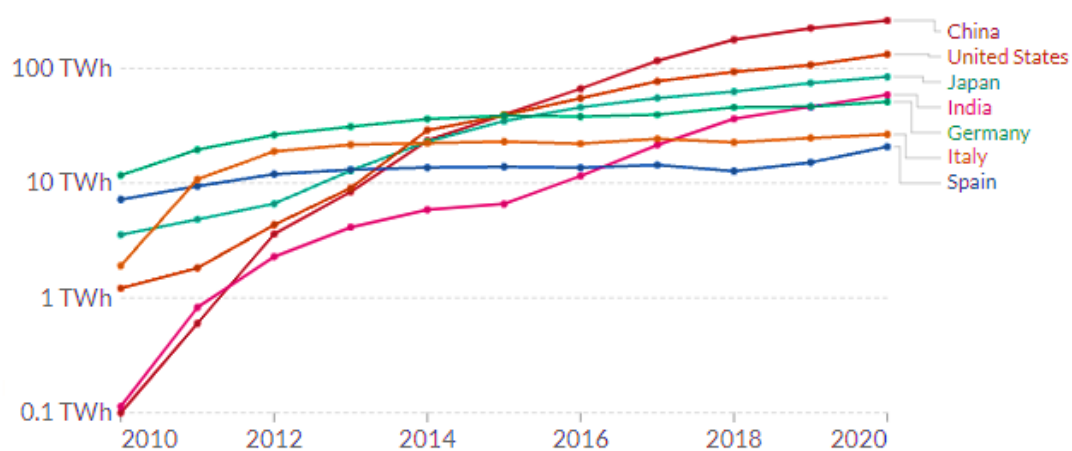
Fuente: Reporte de análisis económico sectorial (2020).

A continuación, en la figura 4 se muestra el incremento de la potencia instalada para la generación eléctrica a partir de la energía solar en el periodo 2010 al 2020, para potencias superiores a los 20TWh expresando los países de mayor desarrollo para recurso energético renovable.

Este recurso energético renovable representa el 1% de la energía eléctrica suministrada a nivel mundial (Our World in Data, 2021).

Figura 4.

Generación de energía solar en el periodo 2010 – 2020.



Fuente: Our World in Data (2021).

En la tabla 2 se muestra las cifras de producción de la figura 4 para los países que presentan una potencia instalada superior a los 20TWh, dando un incremento de producción del 95% (aproximadamente) para el periodo 2010 al 2020.

Tabla 2.

Incremento potencia instalada de la energía solar periodo 2010 – 2020.

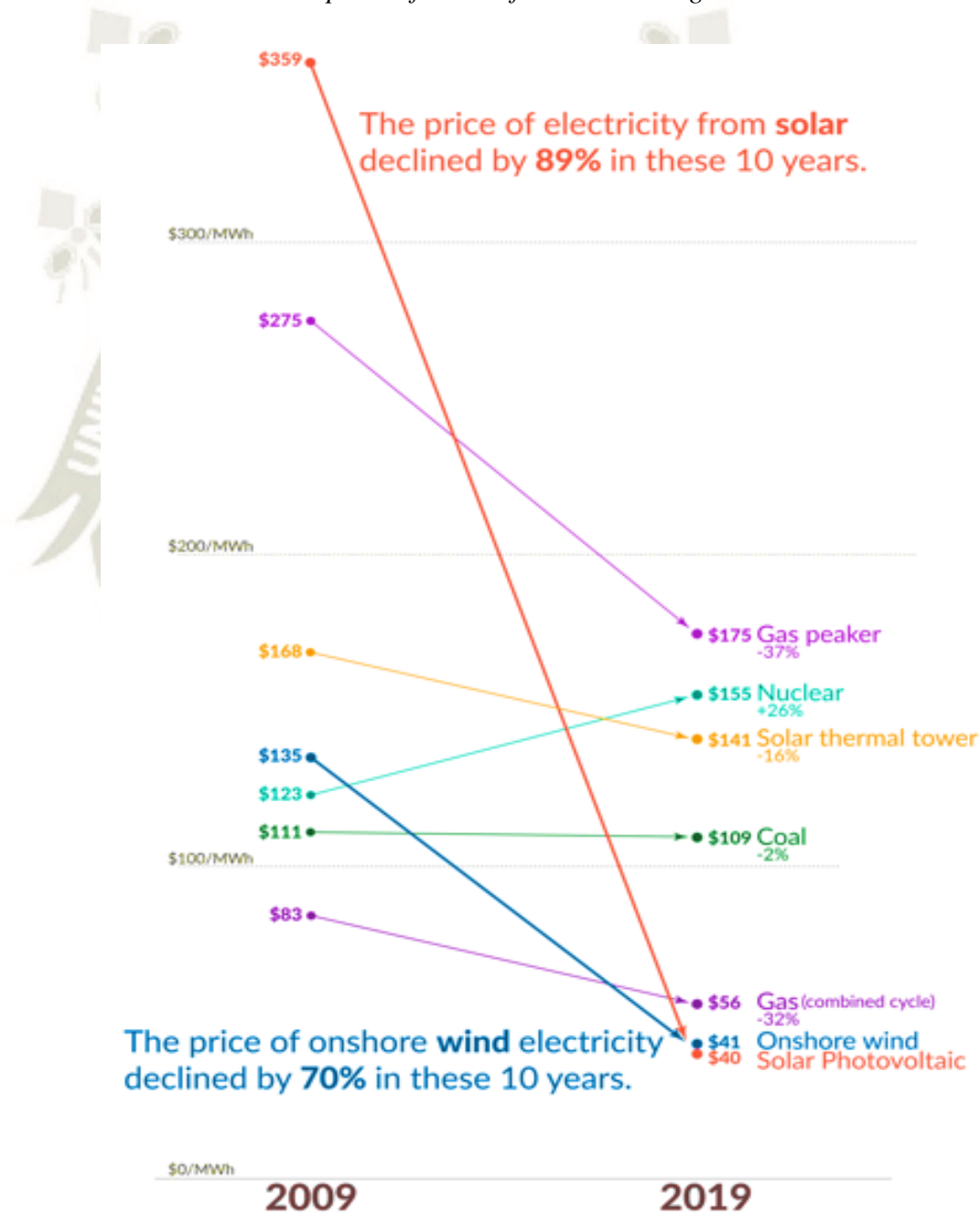
Fuente de Energía Solar	2010 TWh	2020 TWh	Incremento
China	0.10	261.1	43%
Estados Unidos	1.21	132.63	22%
Japón	3.54	84.45	13%
India	0.11	58.73	10%
Alemania	11.70	51.00	6%
Italia	1.91	26.60	4%
España	7.19	20.76	2%
Total	25.76	635.27	95.9%

Fuente: Elaboración propia.

Actualmente los combustibles fósiles predominan en el consumo y suministro de energía a nivel mundial, a continuación, en la figura 5 se muestra los precios de la electricidad para diferentes fuentes de energía.

Figura 5.

Precio de la electricidad para diferentes fuentes de energía.



Fuente: Our World in Data (2021).

La energía eléctrica producida a partir de este recurso no renovable era de bajo costo en comparación a la energía producida por fuentes renovables, esta percepción va cambiando con el avance tecnológico para la obtención de energía a partir de fuentes renovables.

En la última década esta tecnología ha evolucionado gracias a lo llamado “curva de aprendizaje” Roser (2020), lo que significa que al duplicar la capacidad instalada de una fuente renovable el costo de producción disminuye en la misma fracción, lo que no ocurre con el costo de la energía proveniente de combustibles fósiles que no sigue esta tendencia ya que el costo de la energía está sujeta a la alza o escasez de este recurso lo que hace que la diferencia de costos entre ambos sea aún mayor.

Esto se muestra en la figura 5 para el caso de la energía solar fotovoltaica, donde el precio de producción de energía eléctrica en un lapso de 10 años ha disminuido a gran escala, de costar \$359/MWh de potencia instalada en el 2009 a \$40/MWh para el 2019, representando una tasa de aprendizaje del 89%, aquí se cumple la “curva de aprendizaje” en donde al duplicar la capacidad solar instalada el costo de la electricidad se reduce al 36% y al 20% de los módulos solares Ritchie & Roser (2021).

Dentro de esta energía la producción del hidrógeno se lleva a cabo a partir de la electrolisis del agua, donde convertimos en energía química la energía del sol para producir este gas.

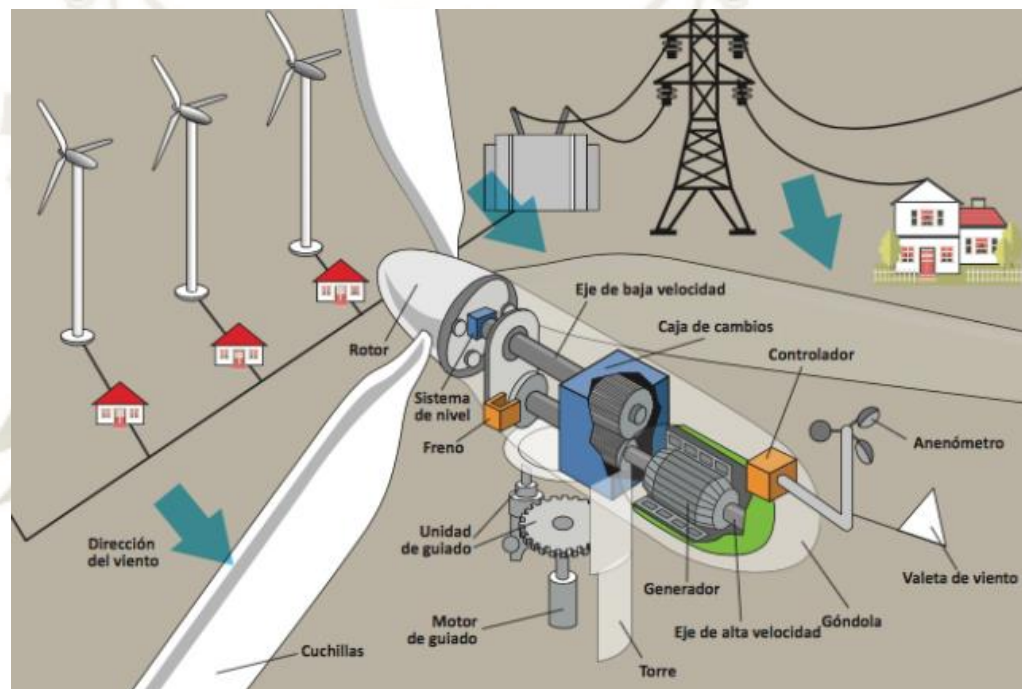
- **Eólica:** Próximos a un desarrollo sostenible en base a energías renovables la fuente de energía de mayor impacto a nivel mundial es la que se extrae a partir de la energía

cinética de las masas de aire que circulan y hacen mover las aspas de una turbina eólica y poder generar electricidad libre de emisiones contaminantes.

A continuación, se muestra en la figura 6 los componentes para la generación eléctrica a partir de este recurso energético renovable.

Figura 6.

Generación de energía eólica.

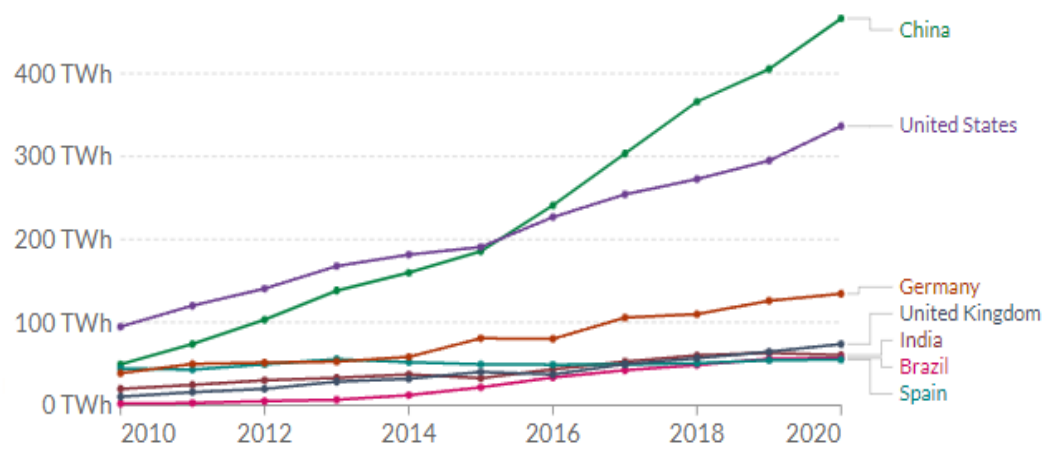


Fuente: Reporte de análisis económico sectorial (2020).

A continuación, en la figura 7 se muestra el incremento de la potencia instalada para la generación eléctrica a partir de la energía eólica en el periodo 2010 al 2020, para potencias superiores a los 50TWh expresando los países de mayor desarrollo para recurso energético renovable el cual representa el 2% de la energía a nivel mundial (Our World in Data, 2020) representando la fuente de generación energética de mayor impacto contribuyendo así a frenar al calentamiento global.

Figura 7.

Generación de energía eólica en el periodo 2010 – 2020.



Fuente: Our World in Data (2021).

En la tabla 3 se muestra las cifras de producción de la figura 7 para los países que presentan una potencia instalada superior a los 50TWh, dando un incremento de producción del 78% (aproximadamente) para el periodo 2010 al 2020.

Tabla 3.

Incremento potencia instalada de la energía eólica periodo 2010 – 2020.

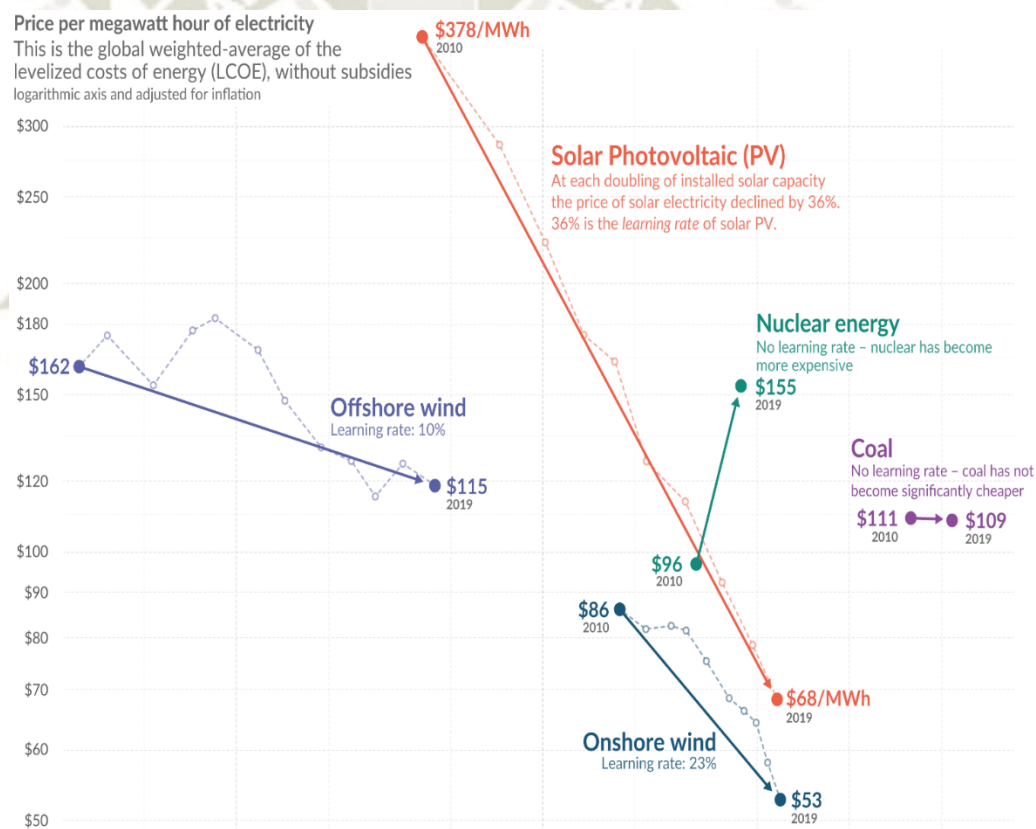
Fuente de Energía Eólica	2010 TWh	2020 TWh	Incremento
China	49.40	466.5	68%
Estados Unidos	94.65	336.53	40%
Alemania	38.6	134.5	16%
Reino Unido	10.29	73.78	10%
India	19.66	60.41	7%
Brasil	2.18	56.68	9%
España	44.27	55.15	2%
Total	259.05	1183.55	78.1%

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente la base energía mundial está sujeta a la utilización de los combustibles fósiles, las distintas fuentes que utilizan los recursos energías renovables en especial la solar y eólica siguen la llamada “curva de aprendizaje” es decir, ambas industrias están sujetas a la baja de costos de producción energética en raíz del avance tecnológico. A continuación, en la figura 8 mostramos este descenso para la energía eólica en el periodo 2010 al 2019.

Figura 8.

Generación de energía eólica en el periodo 2010 – 2019.



Fuente: Our World in Data (2021).

Como se puede observar en la figura 8 la industria eólica en tierra alcanzó una tasa de aprendizaje del 23% en el periodo del 2010 al 2019 dando un valor de producción a la potencia instalada de \$86/MWh en el 2010 a \$53/MWh para el

2019, así como también la industria eólica de mar alcanzó una tasa de aprendizaje del 10% en el mismo periodo, disminuyendo de \$162/MWh a \$115/MWh para el mismo periodo (Ritchie & Roser, 2021), este último sigue alto su precio de producción de energía solo por debajo de la energía nuclear pero encima de la energía que nos brinda el carbón.

Dentro de esta energía la producción del hidrógeno al igual que la solar se lleva a cabo a partir de la electrolisis del agua desalada, donde convertimos en energía química la energía del viento para producir este gas, de esta manera la energía que transporta el viento aprovechado por un aerogenerador es compatible con el medio ambiente libre de la huella del carbono.

- **Electrolisis:** Este método para la obtención de hidrógeno como portador energético en la industria se debe su masificación a raíz de la incertidumbre que genera los combustibles fósiles en un futuro agotamiento de las reservas conocidas, así como el impacto medio ambiental que generan los gases tóxicos productos de su combustión, esto según Diogo Santos (2013).

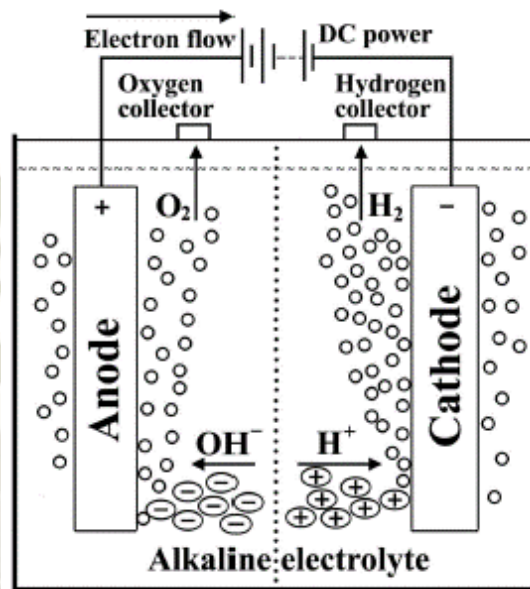
Este proceso consiste en fraccionar la molécula del agua en sus componentes básicos de hidrógeno y oxígeno a partir de una corriente eléctrica que circule a través de electrodos cargados sumergidos en una mezcla para obtener ambos gases, su producción a partir de fuentes renovables (eólica y solar) lo convierte en una fuente de energía sostenible.

En la figura 9 se muestra el proceso de electrolisis, en el cual utilizando una fuente de poder (batería) que suministra un voltaje de 1.23 voltios como mínimo para fraccionar la molécula de agua, conectando los bornes de la fuente de poder con a

los electrodos Ánodo (borne positivo) y Cátodo (borne negativo) sumergidos en el agua circulando la corriente eléctrica cerrando el circuito. (Santos et al., 2013).

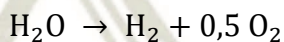
Figura 9.

Diagrama básico de un sistema de electrólisis de agua.



Fuente: Producción de hidrógeno por mediante electrólisis de agua alcalina (2013).

Se cumple que, en el ánodo se produce oxígeno cuyo volumen es la mitad del volumen de hidrógeno generado en el cátodo, a continuación, se muestra el balance energético realizado a la molécula de agua:



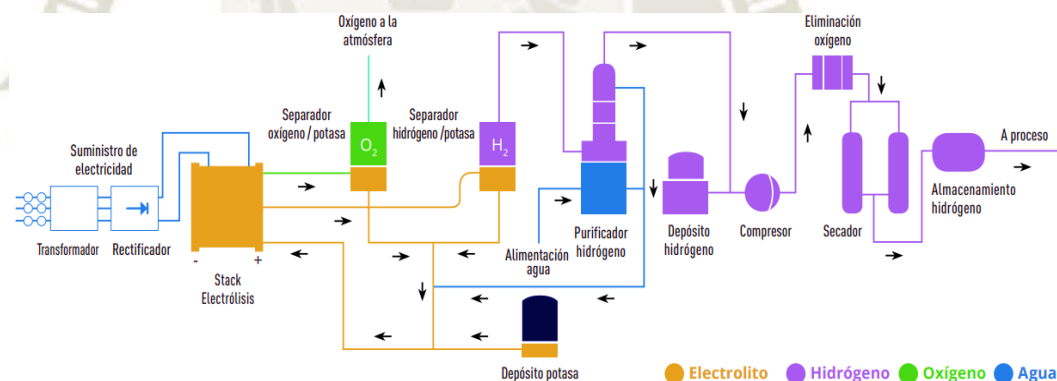
Considerando la temperatura como factor para el proceso de la electrólisis, se puede llevar a cabo este proceso a bajas temperaturas en lo denominado electrólisis alcalina y de membrana de intercambio protónico (PEM), y a altas temperaturas denominado electrólisis óxido sólido (Fúnez & Reyes, 2019), de los cuales el de mayor importancia es la electrólisis alcalina.

La electrólisis alcalina es la de mayor desarrollo y es utilizada a escala industrial, tal como se mostró en la figura 9 los dos electrodos se encuentran sumergidos en el agua cuya mezcla presenta un electrolito alcalino que conduce aniones OH^- donde los electrodos están separados por un diafragma. Las limitaciones en este proceso se dan en los electrodos los cuales sufren corrosión a lo largo de su vida útil, resultando una caída de la eficiencia ya que el tiempo de respuesta para la producción de hidrógeno es elevado.

A continuación, en la figura 10 se muestra el proceso de producción de hidrógeno a nivel industrial este apoyado por una fuente de energía renovable.

Figura 10.

Proceso para obtención de hidrógeno por electrólisis alcalina.



Fuente: El hidrógeno como vector energético (2019).

A continuación, en la tabla 4 se muestra los valores principales de trabajo de esta tecnología.

Tabla 4.

Parámetros de trabajo de la Electrolisis Alcalina.

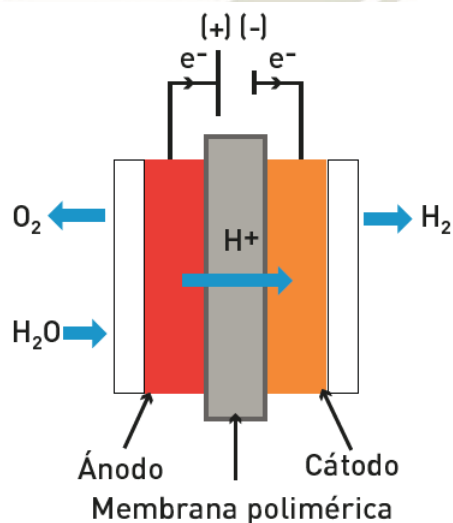
	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Consumo Energético (kWh/kg de H ₂)	Costo (€/kW)	Eficiencia Global (%)	Vida útil (hr)
Electrólisis Alcalina	< 30	60 - 85	4.3 - 5.0	1000 - 1500	60 - 70	> 10000

Fuente: El hidrógeno como vector energético (2019).

El siguiente tipo de electrolizador es del tipo membrana polimérica protónica (PEM), esta tecnología está en continuo desarrollo donde el proceso de electrólisis tiene similitud a la electrolisis alcalina con la diferencia que el electrolito es una membrana polimérica sólida que conduce H⁺, así como se puede observar en la figura 11, el hidrógeno que se produce en este proceso tiene una pureza del 99% siendo presurizado directamente al sistema.

Figura 11.

Electrolisis por membrana polimérica protónica.

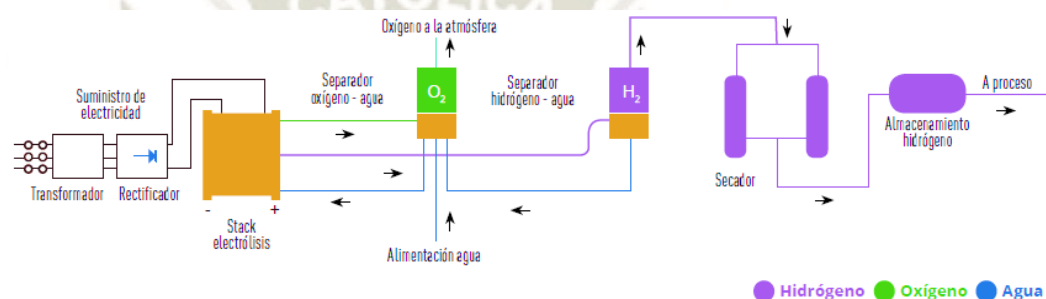


Fuente: El hidrógeno como vector energético (2019).

En la figura 12 observamos el proceso de obtención de hidrógeno utilizando la tecnología por electrolisis de membrana polimérica protónica donde a diferencia de la electrolisis alcalina presenta menos pasos para el proceso de purificación del hidrógeno.

Figura 12.

Proceso para obtención de hidrógeno por electrolisis de membrana polimérica protónica.



Fuente: El hidrógeno como vector energético (2019).

A continuación, en la tabla 5 se muestra los valores principales de trabajo de esta tecnología.

Tabla 5.

Parámetros de trabajo de la electrolisis de membrana polimérica protónica.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Consumo Energético (kWh/kg de H ₂)	Costo (€/kW)	Eficiencia Global (%)	Vida útil (hr)
Electrólisis Alcalina	< 35	40 – 80	4.2 - 4.7	1500 - 2000	78 - 80	< 50000

Fuente: El hidrógeno como vector energético (2019).

Su principal inconveniente hoy en día son los costos de los materiales que se utilizan para los electrodos los cuales están hechos de metales nobles tales como el titanio en las placas bipolares (por citar algunos), pero al igual que las tecnologías

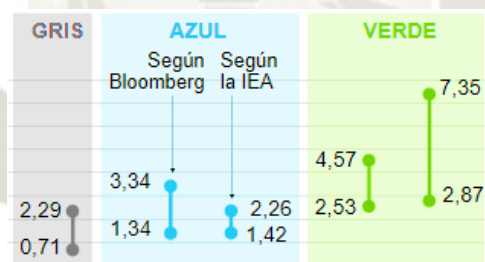
de los recursos energéticos renovables están en constante desarrollo, esta tecnología permite acumular los excedentes de generación eléctrica de las energías renovables.

2.2.3. Participación del hidrógeno en la industria.

En la actualidad es de importancia cambiar el modelo energético de forma progresiva para la reducción de los gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático dando un impacto negativo a los ecosistemas, así como a la salud de las personas. Como se mencionó anteriormente las fuentes de energía renovables están en un constante desarrollo para su reducción de costos como tecnología siendo reflejado en la producción de energía eléctrica y este valor afectado a la producción de hidrógeno, esta variación de costos se puede visualizar en la figura 13.

Figura 13.

Comparación de costes de producción por tipo de hidrógeno (€/kg).



Fuente: Hidrógeno verde: el combustible eterno que alumbrará una nueva era (2021).

Según la publicación realizada por María Fernández (2021) “Hidrógeno verde: el combustible eterno que alumbrará una nueva era” en el periódico El País, el precio para la obtención del hidrógeno a partir de energías renovables sigue siendo de un costo superior en comparación a los demás métodos de producción, pero según los alcances tecnológicos este valor podría acercarse para el año 2025 haciéndolo competitivo, esto permitiría una masificación en la industria, su aprovechamiento para la obtención de hidrógeno cuando exista o no excedente de producción eléctrica lo vuelven en una alternativa para la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles.

Es necesario que el hidrógeno forme parte de la industria, en caso concreto de la industria automovilística que es una de las fuentes de producción de estos gases tóxicos que se emiten al aire producidos en sus motores de combustión interna, es aquí donde el hidrógeno tiene un mayor potencial para el uso en estos motores o para generar energía eléctrica en las llamadas pilas de combustible “PEMFC” (las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones), de provenir este combustible alternativo de energías o procesos renovables los convierte en un combustible de cero emisiones.

El hidrógeno al ser utilizado en vehículos se considera la función al tipo de transporte y su autonomía, en la actualidad se tienen vehículos eléctricos a batería y vehículos eléctricos con pila de combustible donde se relaciona que cuanto más grande es el vehículo y se requiere mayor autonomía el vehículo utilizando hidrógeno tiene mayores prestaciones. Según la publicación realizada por Guerra & Reyes -Bozo (2019) “El hidrógeno como vector energético” estos vehículos pueden clasificarse según se detalla a continuación.

- Vehículos de combustión interna de hidrógeno (HICEV – hydrogen internal combustion engine vehicle): Estos vehículos utilizan como combustible el hidrógeno al suministrarlo al motor de combustión o una mezcla de ambos combustibles (hidrógeno con combustible convencional). Estos motores en su mayoría son modificados o adaptados para la utilización de este combustible alternativo y permitir la combustión del hidrógeno dentro de la cámara de combustión. El tren de fuerza sigue siendo el convencional. Su principal desventaja es que al ser un motor de combustión interna la combustión del hidrógeno solo o en combinación con el combustible fósil genera gases contaminantes.
- Vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV – fuel cell electric vehicle): Estos vehículos utilizan como fuente de energía eléctrica la que proviene de la transformación

electroquímica del hidrógeno y del oxígeno producida en una pila de combustible de cero emisiones, esto si el hidrógeno consumido proviene de energías renovables dando como subproductos de esta reacción vapor de agua. El tren de fuerza de estos vehículos que utilizan esta tecnología es de tracción eléctrica.

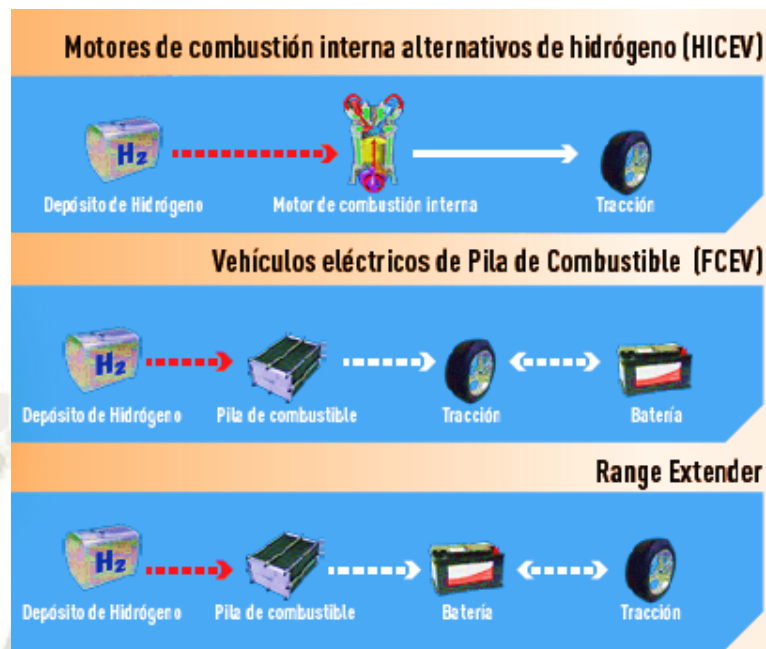
- Extensores de autonomía: Estos vehículos presentan la suma de dos tecnologías, un acumulador y una pila de combustible. El acumulador o batería cumple la función de almacenar la energía eléctrica proveniente pila de combustible y sumista energía a los motores eléctricos para el movimiento de vehículo. En estos se instala un sistema de almacenamiento de hidrógeno que permitiendo una mayor densidad energética disponible para el vehículo y la energía eléctrica que genera la pila de combustible suministrada a la batería permitiendo la carga de esta en cuanto lo necesite. Esta disposición permite el incremento de la autonomía del vehículo y reducir el tiempo de recarga en comparación a uno netamente eléctrico.

A continuación, en la figura 14 se muestra la disposición de los tipos de vehículos que utilizan estas tecnologías.

Figura

14.

Tipología de vehículos de hidrógeno.



Fuente: El hidrógeno como vector energético (2019).

2.3. Motores de combustión interna alternativo.

Según Payri & Muñoz (2011) en el libro Motores de combustión interna alternativos se define a los motores térmicos como máquinas donde se dan reacciones endotérmicas que transforman la energía calorífica producto de una combustión en energía mecánica aprovechable.

La energía calorífica se puede obtener de recursos energéticos no renovables de base orgánica, estos combustibles fósiles son utilizados en estado líquido o gaseoso los cuales al combustionar dentro de la cámara de combustión producen la energía necesaria para el movimiento interno de los mecanismos pistón, biela, manivela y cigüeñal transformando el movimiento lineal en rotativo.

El funcionamiento de estos motores endotérmicos alternativos se efectúa a partir de la reacción química del fluido de trabajo, que es una mezcla de combustible fósil y aire, según las

investigaciones dadas por Jójvaj (1982) en el libro Motores de automóvil para el correcto funcionamiento del motor se debe tener una relación estequiométrica de 14.9:1 (valor teórico) es decir 14.9 partes de aire por 1 parte de combustible.

2.3.1. Criterios de clasificación.

Los motores de combustión interna alternativos pueden clasificarse de varias maneras, ya que existen diversas alternativas para su diseño, así como para los mecanismos auxiliares los cuales pueden ser: el ciclo de trabajo, el ingreso del aire en el cilindro, el proceso de combustión, tipo de combustible a utilizar, tipo de refrigeración, número y disposición de cilindros, etc.

Toda clasificación depende de las especificaciones o el criterio que asuma el autor, éstas pueden partir desde criterios sencillos hasta un tanto complejos, por tanto, para una clasificación existirían tantas categorías como combinaciones y características se pudieran dar (Payri & Muñoz, 2011).

Tomaremos un criterio de clasificación acorde a nuestro proyecto de investigación, de esta manera los criterios de mayor relevancia se exponen a continuación.

2.3.1.1. Por su proceso de combustión.

Se clasifican en motores de encendido provocado y motores de encendido por compresión.

- **Motores de encendido provocado:** La característica principal para el funcionamiento de este motor es para realizar el proceso de combustión, el cual requiere un aporte de energía externa al ciclo termodinámico, el cual se consigue con el salto de chispa entre los electrodos de una bujía. Este salto de chispa debe estar sincronizado para conseguir que el proceso de combustión sea lo más eficiente posible.

Es importante saber la formación de la mezcla “aire – combustible”, para estos motores se pueden dar en mezcla homogénea y heterogéneas, el primero la formación de la mezcla se realizarse fuera del cilindro el tiempo del proceso de admisión, y el segundo se introduce el aire durante el tiempo de admisión y el combustible se inyecta durante el tiempo de compresión directamente al cilindro, para ambos criterios de formación de la mezcla se da la relación estequiométrica de 14.9:1.

Este motor de encendido provocado recibe también los nombres de: motor de encendido por chispa, motor de explosión o motor Otto. (Payri & Muñoz, 2011).

- **Motores de encendido por compresión:** La característica principal para el funcionamiento de este motor es para realizar el proceso de combustión, el cual se da mediante un proceso de autoencendido de la mezcla “aire – combustible”, sin aporte de energía externa esto al alcanzar presiones y temperaturas altas en la cámara de combustión durante el tiempo de compresión.

De esta manera durante el tiempo de admisión se introduce solo aire en el cilindro y el combustible se inyecta al final del tiempo de compresión, este tipo de motores no guardan una relación estequiométrica de 14.9:1 como en los motores de encendido provocado, ya que para un correcto funcionamiento de este tipo de motores se requiere el ingreso del aire en exceso. Este motor de encendido por compresión recibe también los nombres de: motor Diesel.

2.3.1.2. Por su ciclo de trabajo.

Se clasifican en motores que cumplen los ciclos termodinámicos Otto y Diesel, y dentro de esta clasificación se agrupan los motores de cuatro tiempos (4T) y motores de dos

tiempos (2T), dando una clara diferencia entre ambos por su proceso de renovación de carga durante los tiempos de admisión y escape, desarrollaremos los motores de cuatro tiempos (4T) para ambos ciclos termodinámicos esto para nuestro proyecto de investigación como se indicó anteriormente.

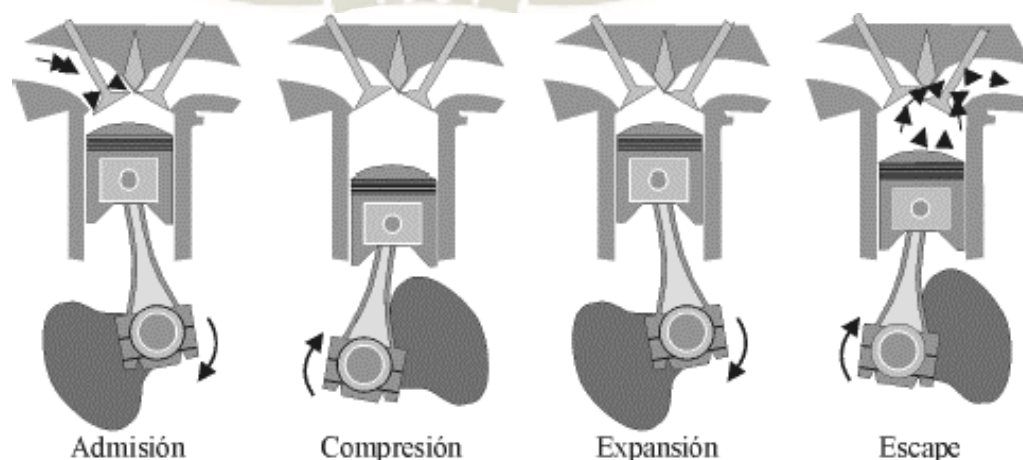
- **Ciclo Otto:** Los motores de encendido por chispa, motor de explosión o motor de ciclo Otto, en este motor la combustión se debe por el salto de chispa de origen eléctrico que enciende la mezcla “aire – combustible” el cual se encuentra a volumen constante.

Para estos motores de cuatro tiempos el ciclo de trabajo se concluye en dos vueltas de cigüeñal y uno del árbol de levas (relación de 2:1), así como cuatro carreras del pistón, de esta manera se completa los cuatro tiempos.

Como se muestran en la figura 15 para los motores de cuatro tiempos, las fases para desarrollar el ciclo de trabajo esta definidas por los tiempos o procesos de admisión, compresión, expansión y escape, como se muestra a continuación.

Figura 15.

Procesos del motor de cuatro tiempos (4T).

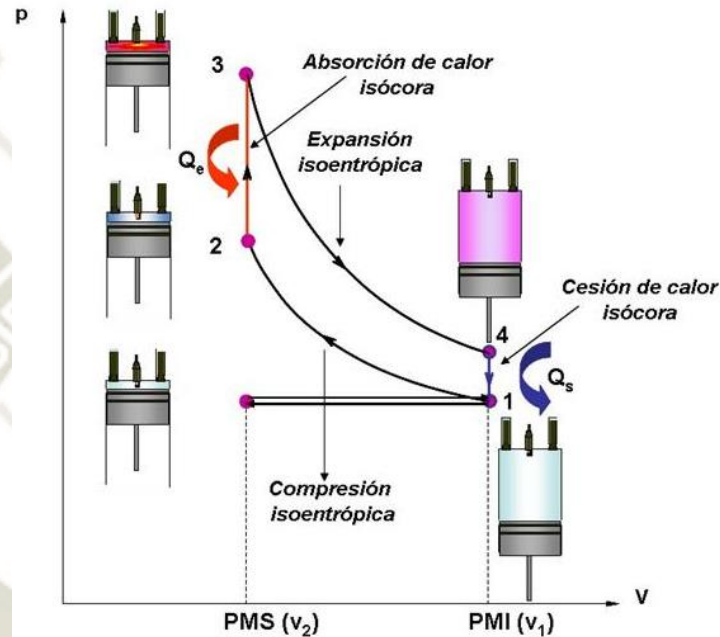


Fuente: Motores de combustión interna alternativos (2011).

Así como también se muestra en la figura 16 el ciclo termodinámico teórico del ciclo Otto.

Figura 16.

Ciclo termodinámico teórico del ciclo Otto.



Fuente: DeMotor (2017)

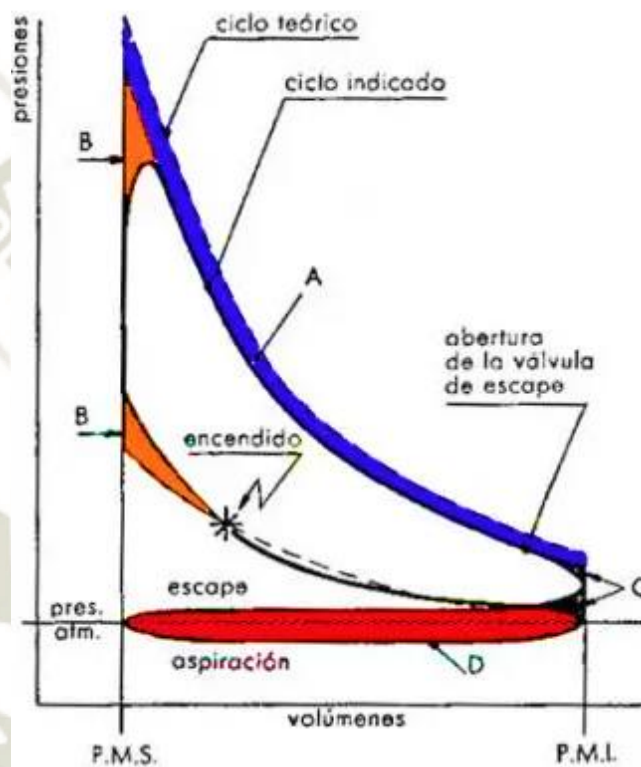
Estas etapas o procesos se definen a continuación según ciclo termodinámico teórico del ciclo Otto de la figura 16:

- En el punto 0 al 1: Admisión a presión constante de la mezcla.
- En el punto 1 al 2: Compresión adiabática de la mezcla.
- En el punto 2: Salto de chispa.
- En el punto 2 al 3: Combustión de la mezcla.
- En el punto 3 al 4: Expansión adiabática, carrera de trabajo.
- En el punto 4 al 0: Escape de los gases de combustión.

Los procesos citados anteriormente son teóricos, por ello para el funcionamiento real motor se realizaron modificaciones y se da un nuevo diagrama del ciclo termodinámico real del ciclo Otto, como se muestra en la figura 17.

Figura 17.

Ciclo termodinámico real del ciclo Otto.

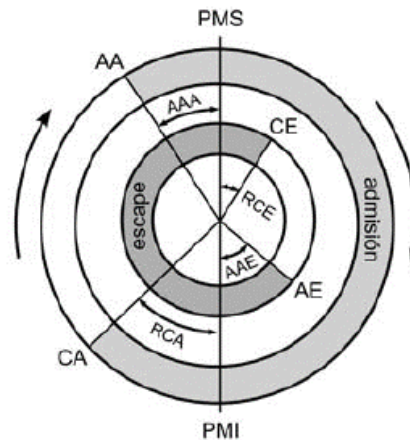


Fuente: DeMotor (2017)

Estas modificaciones se dan en los tiempos de apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape, los que se conocen como adelanto y retraso de apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape, según Payri & Muñoz (2011) en el libro Motores de combustión interna alternativos los define de la siguiente manera según la figura 18.

Figura 18.

Diagrama de distribución del motor de cuatro tiempos.



Fuente: Motores de combustión interna alternativos (2011).

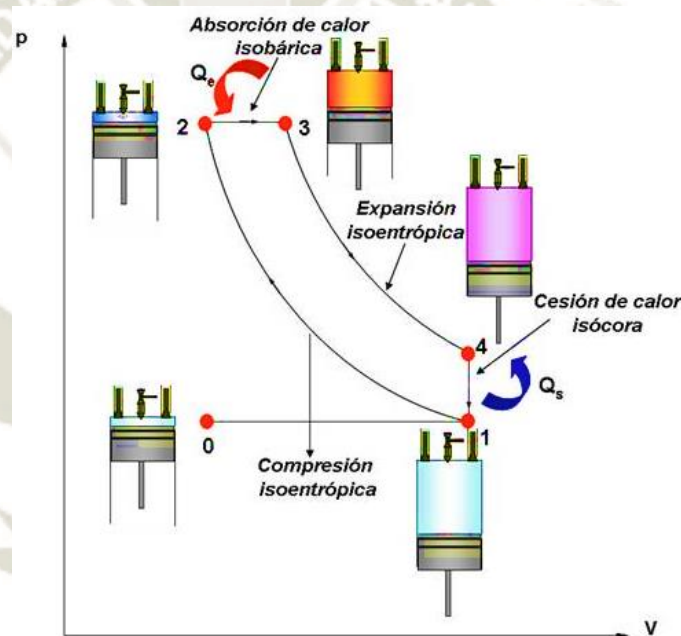
- Avance en la apertura de admisión (AAA), se adelanta la apertura de la válvula de admisión cuando el pistón está en el proceso de escape.
- Retraso en el cierre de admisión (RCA), se retrasa el cierre de la válvula de admisión durante el proceso de compresión.
- Avance en la apertura de escape (AAE), se adelanta la apertura de la válvula de escape cuando el pistón está en el proceso de expansión.
- Retraso en el cierre de escape (RCE), se retrasa el cierre de la válvula de escape durante el proceso de admisión.

La conveniencia de los ángulos de avance y cierre de válvulas está ligado a las eficiencias mecánicas y térmicas y las condiciones de operación del motor, ya que no es posible abrir o cerrar las válvulas de forma instantánea como se indica en el diagrama teórico, es preciso anticipar la apertura y prolongar el cierre de válvulas sin afectar la estanqueidad y la compresión del flujo de trabajo.

- Ciclo Diesel:** Los motores de encendido por compresión o también llamados motores de ciclo Diesel, su combustión se lleva a cabo inyectando el combustible grados antes de que el pistón culmine su proceso de compresión, el incremento de la presión y temperatura favorecen el proceso de la combustión, una característica bien definida del funcionamiento de estos motores es que el proceso de combustión se realiza a presión constante como se muestra en la figura 19.

Figura 19.

Ciclo termodinámico teórico del ciclo Diesel.



Fuente: DeMotor (2018)

Como se muestra en la figura 15 para los motores de cuatro tiempos, los procesos de admisión, compresión, expansión y escape tienen la misma configuración para ambos ciclos Otto y Diesel, entonces enumeraremos un cuadro comparativo de ambos ciclos para todos los procesos como se indica en la tabla

6.

Tabla 6.

Cuadro comparativo para los procesos de los ciclos Otto y Diesel.

	Ciclo Otto	Ciclo Diesel
Admisión	En este proceso el motor succiona mezcla de aire-combustible cuando el pistón se encuentra en el PMI.	En este proceso el motor succiona de aire cuando el pistón se encuentra en el PMI.
Compresión	En este proceso el pistón comprime la mezcla cuando el pistón se encuentra en su carrera al PMS.	En este proceso el pistón comprime el aire de esta manera se incrementa la presión y temperatura cuando el pistón se encuentra en su carrera al PMS.
Combustión	En este proceso el salto de chispa dado por la bujía eléctrica enciende la mezcla comprimida aire-combustible	El combustible al mezclarse con el aire caliente se enciende debido al calor causado por la alta presión.
Expansión	La expansión de los gases empuja el pistón hacia el PMI, aprovechando la liberación de energía química produciéndose la carrera de trabajo.	La expansión de los gases empuja el pistón hacia el PMI, aprovechando la liberación de energía química produciéndose la carrera de trabajo.
Escape	En este proceso el pistón expulsa los gases producto de la combustión hacia el exterior.	En este proceso el pistón expulsa los gases producto de la combustión hacia el exterior.

Fuente: Motores de combustión interna alternativos (2011).

CAPÍTULO III

3. DISEÑO PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

3.1. Generalidades.

En este capítulo se desarrolla el diseño para la producción de hidrógeno al igual que la utilización de equipos electrónicos programables que puedan aprovechar el hidrógeno como fuente de energía limpia y renovable, la finalidad es de acondicionar un generador de hidrógeno que a partir de la electrolisis del agua se ajuste a las condiciones que solicite el motor.

Este diseño es analítico y exploratorio, debido a que la investigación acerca de la utilización del hidrógeno en motores de ciclo Otto tiene limitada información, por tal motivo a través de la obtención y comparación de resultados bajo ensayos obtendremos un diseño adecuado que se ajuste a la demanda de consumo del motor utilizando el hidrogeno como complemento de la gasolina.

3.2. Análisis y experimentación de datos.

Para el diseño del sistema de alimentación de hidrógeno en una primera etapa la investigación tendrá un enfoque estadístico, el cual contempla la recolección, análisis e interpretación de datos de fuentes secundarias que usen el hidrógeno en motores de combustión interna, cabe indicar que esta recopilación de datos cuenta con información limitada y que los resultados son poco fiables por no tener un adecuado manejo de la variable de interés, por consiguiente, para la segunda etapa no se utilizará ninguna diseño estándar, se busca estudiar las tendencias para obtener el control de la variable “hidrógeno”, por medio de la experimentación en tiempo real con el fin de adaptar un generador de hidrógeno a motores de ciclo Otto con ayuda de la programación de un microcontrolador para una eficiente producción de hidrógeno por electrolisis.

Por lo tanto, el análisis de esta experimentación se llevará a la vida real en un vehículo de transporte liviano, contrastando en una prueba en carretera donde comprobaremos el consumo de ambos combustibles gasolina e hidrógeno. Para tal fin se utilizará un vehículo de prueba de marca Honda Civic de 1992 como se muestra en la figura 20 a continuación:

Figura 20.

Honda Civic Ferio de 1992.



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Distribución de los componentes del sistema de generación de hidrógeno.

El diseño propuesto busca aprovechar el hidrógeno como fuente de energía limpia y renovable que al ser suministrado en el motor reduzca el consumo de gasolina, la producción de hidrógeno será a partir de la electrolisis el cual por medio de un proceso electroquímico se fracciona la molécula de agua en sus componentes básicos de hidrógeno y oxígeno, este diseño no involucra variaciones o modificaciones al diseño original del motor, por este motivo fue necesario realizar una serie de pasos que nos permita obtener el mejor diseño para las condiciones y exigencia del motor los cuales se describen a continuación.

3.3.1. Etapa de Generación de Hidrogeno.

En esta etapa se procede al diseño, construcción y adaptación de un generador de hidrógeno por electrolisis, que permita utilizar el hidrógeno como combustible para el complemento de la mezcla aire-combustible a partir del suministro de corriente eléctrica proporcionada por la batería del vehículo.

Como se indicó anteriormente la electrolisis del agua no es el método más rentable de obtener hidrogeno, pero para nuestro caso experimental es la forma más viable para producir hidrógeno en tiempo real y ser utilizado en motores de combustión interna a partir de la electrolisis del agua que a diferencia de la ya citada celda de combustibles que utiliza un proceso inverso de mayor rendimiento donde químicamente utiliza el hidrógeno y oxígeno para la producción de electricidad, para esta investigación el producto final de la electrolisis del agua “hidrógeno” será utiliza para ser quemado dentro de la cámara de combustión del motor. A continuación, se describe los siguientes componentes:

3.3.1.1. Generadores de Hidrogeno.

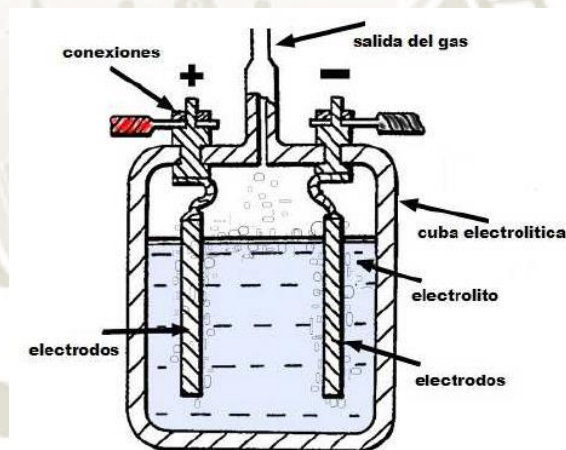
Citado el criterio de obtención de hidrógeno se debe indicar que tipo de generador será utilizado para nuestro proyecto de investigación, este proceso de descomposición de la molécula de agua es posible llevar a cabo en dos tipos de generador de hidrogeno los cuales son: Celdas Húmedas (Wet Cell) y Celdas Secas (Dry Cell), ambos diseños son capaces de generar hidrógeno a partir de una fuente de poder eléctrica y el uso de uno u otro depende de las necesidades del experimentador, así mismo como la disposición del espacio donde se instale. Cabe indicar que existen diseños más complejos, pero nos quedaremos para su análisis y elección los ya citados por ser asequible en su manufactura, dimensiones e instalación. A continuación, describiremos cada uno.

- **Celdas Húmedas (Wet Cell).**

Este tipo de generador de hidrógeno utiliza la energía eléctrica para la descomposición de la molécula de agua, para ello cuenta con dos electrodos hechos de un metal inerte (acero inoxidable), su diseño es básicamente una cuba electrolítica donde contiene el agua en su interior. Para su conexión eléctrica utiliza un electrodo como cátodo de carga negativa donde aparece el hidrógeno y otro electrodo de carga positiva llamado ánodo donde aparece el oxígeno, a continuación, en la figura 21 mostramos se muestra el esquema de esta celda.

Figura 21.

Celda húmeda.



Fuente: HHO experiencias (2021).

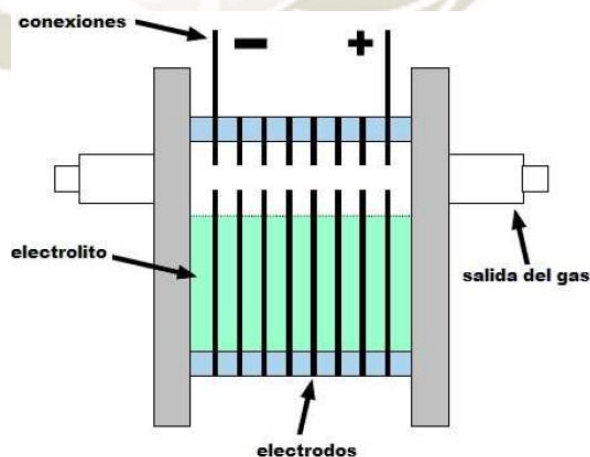
La principal ventaja de este tipo de generador es que los electrodos se encuentran el mayor tiempo posible sumergidos en el agua que a su vez los refrigera, de esta manera se aprovecha el consumo de corriente eléctrica en su totalidad en proporción a las dimensiones de los electrodos por estar rodeada por agua contenidas por la cuba.

Su principal desventaja es que conforme se produce hidrogeno la cantidad de agua va disminuyendo en la cuba, por consiguiente, los electrodos no se refrigeran y al ser incapaces de disipar el calor generado por la corriente eléctrica que circula en ellos perjudican la producción de hidrogeno. Por otro lado, este diseño se ve limitado por el uso de corriente que no deben superar los 10A.

- **Celdas Seca (Dry Cell).**

Este tipo de generador tiene las mismas características de la ya citada celda húmeda, tanto para el tipo de material (acero inoxidable) como el tipo de conexión eléctrica para los electrodos (cátodo de carga negativa y ánodo de carga positiva), la diferencia para este generador radica en el suministro de agua, cuyo flujo se renueva de forma continua en el interior de la cuba, para ello es que presentan orificios de ingreso y salida de agua e hidrógeno respectivamente, a continuación, en la figura 22 mostramos un esquema de esta celda.

Figura 22.
Celda seca.



Fuente: HHO experencies (2021).

La principal ventaja de este diseño es que puede soportar una mayor cantidad de corriente eléctrica superior a los 20A esto según a la investigación y desarrollo de un electrolizador de hidrogeno por Rhodes William (2012). Al tener un diseño más compacto con dimensiones reducidas es capaz de disipar el calor de los electrodos por circular el agua de forma continua en su interior y por estar en contacto con el medio ambiente, de esta manera la producción de hidrogeno supera a las celdas húmedas por la capacidad de corriente que circula por los electrodos.

La desventaja de este tipo de generador es la presencia de corrientes fuga en los electrodos, esto porque el área del electrodo en su totalidad no está en contacto con el agua ocasionando una pérdida de corriente, de esta manera la capacidad de disipación el calor es reducida perjudicando la producción de hidrógeno.

Por tal motivo para nuestro diseño y configuración del generador de hidrógeno tomaremos como modelo al generador del tipo celda seca (Dry Cell) por las ventajas descritas con anterioridad con respecto al tipo celdas húmedas (Wet Cell).

3.3.1.2. Técnicas para la Construcción del Generador de Hidrogeno.

Citado la elección del tipo de generador de hidrogeno “celda seca” para la descomposición de la molécula de agua y dado la investigación realizada por Rhodes William en su “Electrolizador de Hidrógeno” se debe tener ciertas consideraciones para el diseño de un nuevo generador de hidrógeno, de los cuales enumeraremos los más importantes:

- El material más idóneo para ser utilizado en los electrodos (cátodo de carga negativa y ánodo de carga positiva) es el metal níquel (Ni), pero utilizar este metal es muy costoso, así como también para su mecanizado, por tanto, se nos da la opción de

fabricar los electrodos con material de acero inoxidable, ello para evitar la corrosión de los mismo.

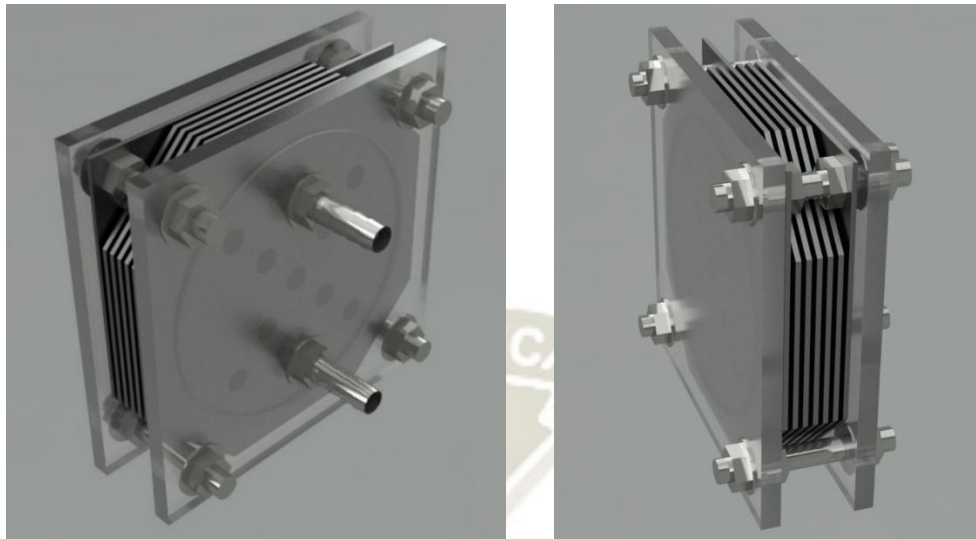
- Para una adecuada eficiencia del manejo de la densidad de corriente los electrodos deben tener un área de 170 cm^2 para tener una densidad de corriente alrededor de 0.1 A/cm^2 para producir hidrógeno gaseoso, por tanto, existe una correlación con el manejo de la corriente y el área del electrodo. Con esta área teórica el electrolizador puede operar con corriente alrededor de los 20A.
- El electrolizador tiene una distribución de placas neutras que se colocan en la parte central de los electrodos con carga, la distancia mínima entre placas es de 3 mm para permitir que circule 10A.
- Para acelerar la reacción de electrolisis se requiere un electrolito, para este caso el que presta mejor rendimiento es el hidróxido de sodio NaOH, los porcentajes de concentración pueden variar según a la necesidad del experimentador.

3.3.1.3. Diseño del Generador de Hidrogeno.

El diseño de nuestro generador de hidrógeno se desarrolló en el software AutoCAD 3D-2020, este diseño es semejante a la estructura base del generador de hidrógeno teórico con modificaciones que nos permita utilizar de manera eficiente la energía eléctrica y obtener la mayor cantidad de hidrógeno posible del agua como se puede observar en la figura 23 donde nos muestra el modelado en 3D de nuestro generador de hidrógeno.

Figura 23.

Simulación del generador de hidrogeno.



Fuente: Elaboración propia.

Citadas las recomendaciones para el diseño del generador es que procederemos a su manufactura el cual se realizará de modo no industrial.

El generador de hidrógeno está compuesto de varios elementos, primeramente, dos tapas colocadas en sus extremos, dentro de estas se encuentran ubicadas chapas metálicas que harán de electrodos de carga (positivo y negativo), en medio de estas se ubicaran las chapas de carga neutra (sin carga) y en cada uno de estos elementos se colocaran juntas de goma para separarlos y evitar el contacto entre sí generando hermeticidad a nuestro generador al momento de ensamblarlo.

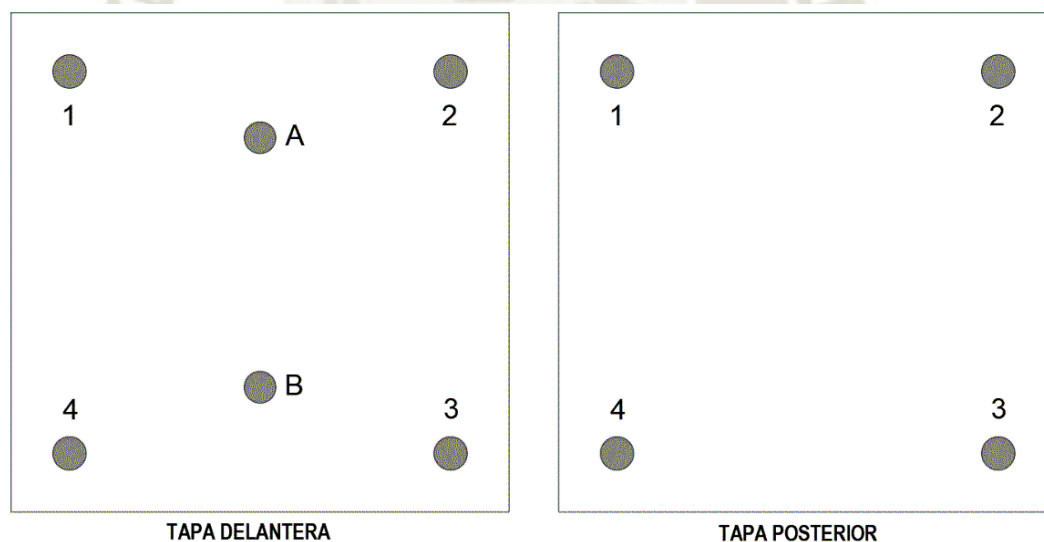
El material elegido para las tapas del generador será de metacrilato, un tipo de plástico resistente, transparente y de fácil mecanizado, de tal manera que nos permita observar en su interior el comportamiento y disociación de la molécula de agua y siendo este un material no metálico nos brindará el aislamiento necesario para evitar corrientes de fuga.

Las dimensiones seleccionadas para estas dos tapas son de 120 x 120 mm y un espesor de 6 mm, en estas tapas se realizarán preformaciones de 8 mm de diámetro en las esquinas, donde pasaremos tornillos espárragos en la secuencia 1,2,3 y 4 como se muestra en la figura 5 para cerrar el generador al momento de ensamblarlo.

A su vez se realizó dos perforaciones en la tapa delantera ambos de 10 mm de diámetro donde se atornillaron dos conectores roscados espiga para acople de manguera que permita el ingreso del agua en la parte inferior (orificio B) y la salida del hidrógeno en la parte superior en forma de burbujeo (orificio A), a continuación, en la figura 24 mostramos el esquema de las tapas para el generador de hidrógeno.

Figura 24.

Tapas del Generador de Hidrogeno.



Fuente: Elaboración propia.

Siguiente con nuestro diseño tenemos los electrodos de carga, los cuales tienen la siguiente configuración eléctrica, un electrodo de carga positiva denominado ánodo donde aparece el oxígeno y otro de carga negativa denominado cátodo donde aparece el hidrógeno,

debido a la reacción de oxidación y reducción del agua al circular una cantidad corriente eléctrica dentro del generador mientras durante el proceso de electrolisis.

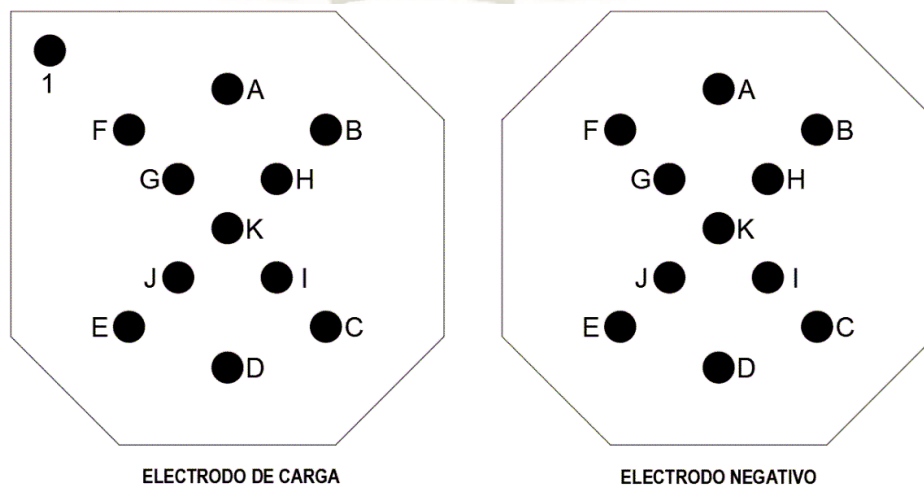
El material seleccionado para estos electrodos es de acero inoxidable de calidad 316, este material conductor es resistente a la corrosión, ya que estará de forma continua en contacto con el agua y a la reacción electroquímica producto de la electrolisis realizada en su superficie de contacto de cada electrodo.

Este tipo de acero inoxidable de calidad 316, contiene 10.5% níquel en su composición además que es comercial, por tal motivo cumple con las expectativas para la fabricación de nuestro generador. Por otro lado, no se recomienda usar otro tipo de material tales como el aluminio o el cobre por no presentar las propiedades citadas anteriormente, de utilizarlos se tendría que efectuar cambios en periodos cortos para reemplazar los electrodos.

A continuación, se muestra en la figura 25 el diseño de los electrodos de carga y neutros, los electrodos de carga adoptarán la polaridad que se le designe por los polos de la batería.

Figura 25.

Electrodos de carga y neutro.



Fuente: Elaboración propia.

Las dimensiones seleccionadas para estos componentes son de 112 x 112 mm con un espesor de 1.5 mm, se realizaron preformaciones en común tal como se muestra en la figura 6, los orificios que van en la secuencia A, B, C, ... y K de 8 mm de diámetro nos permite comunicar el agua en el interior al igual que el gas producido dentro del generador, los electrodos de carga presentan una variación en el diseño al terminar en una de sus esquinas en 90° con su respectiva perforación, un orificio en el extremo superior izquierdo (vista frontal) de 8 mm de diámetro que servirá para pasar el tornillo espárrago y conectar las placas de forma mecánica y eléctrica al momento de ensamblar el generador.

La configuración de los electrodos será: dos electrodos de carga negativa “cátodo” ubicados en la parte externa y un electrodo de carga positiva “ánodo” ubicado en la parte central, en medio de cada tipo de electrodo se colocan dos electrodos neutros, de esta manera tenemos la siguiente configuración:



La finalidad de colocar dos electrodos negativos es para obtener mayor cantidad de hidrógeno al momento de efectuarse la electrolisis del agua, por otro lado, el uso de electrodos neutros en el generador es para dividir la diferencia de potencial que existe entre los electrodos positivos y negativos al ser colocados en medio de estos, de no tenerlos la diferencia de potencial que existiría entre los polos será el total de la fuente de poder perjudicando la producción de hidrógeno. Por tanto, al colocar electrodos neutros la diferencia de potencial se divide en la cantidad de estos, de esta forma se deduce que a mayor número de electrodos neutros los saltos de tensión serán menor hasta alcanzar el valor mínimo de 2V según los datos experimentales dados por Rhodes William.

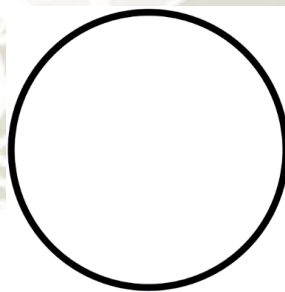
Para nuestro diseño experimental la fuente de poder “batería” nos da una tensión de 12V, por tanto, al distribuir los electrodos neutros entre los electrodos carga tendremos una diferencia de potencial de 4 V.

Por último, un componente indispensable para el selle de generador son las juntas de goma, estos son de vital importancia al generar un aislamiento entre los electrodos de carga evitando que entren en contacto eléctrico entre sí. El tipo de material debe ser resistente a la corrosión y a la fatiga mecánica al momento de generar el apriete para ensamblar el generador, así como generar estanqueidad parar evitar fugas de agua y de hidrógeno.

Para nuestro diseño y por la geometría del generador, tomaremos la forma circular de la junta, por ello utilizaremos un oring de goma de 104mm de diámetro y 6mm de espesor que nos dará un área efectiva de contacto de 85cm^2 , el objetivo es ocupar la mayor área posible en los electrodos de carga y de esta manera contener mayor cantidad de agua dentro del generador, a continuación, en la figura 26 mostramos el esquema de la junta.

Figura 26.

Junta oring de goma.



Fuente: Elaboración propia.

Como elementos auxiliares están los tornillos espárragos de longitud de 100 mm y diámetro 8 mm de grado métrico n°8, así como tuercas y arandelas de la misma medida y grado todos de acero inoxidable.

3.3.1.4. Ensamblaje del Generador de Hidrogeno Prototipo.

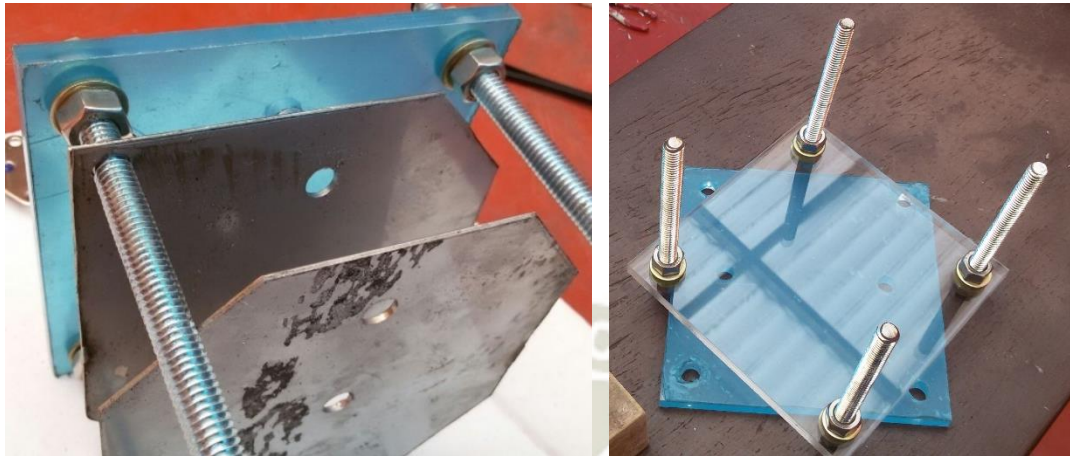
Concluido el proceso de mecanizado realizados en un torno se dieron las dimensiones y forma deseadas según diseño tanto para tapas que sellarán el generador en su parte externa al igual para las chapas de acero inoxidable que servirán como electrodos de carga y electrodos neutros. Terminado el proceso de mecanizado tomaremos las siguientes consideraciones antes del ensamblaje del generador los cuales se dan a continuación:

- Para las chapas en general lijaremos las superficies para generar una superficie rugosa en ambas caras, esta acción ayudara en la producción de hidrógeno incrementando el rendimiento del generador, a su vez quitaremos la rebaba que sobresalga en las bordes de las chapas para evitar cortes al momento del montaje, finalizado pasaremos una capa de thinner para limpiar todas las superficies y evitar impurezas.
- De igual manera las tapas de metacrilato se retirarán las rebabas que puedan aparecer y limpiaremos su superficie con thinner para quitar impurezas que puedan ingresar dentro del generador.

Tomado en cuenta las consideraciones citadas procederemos al ensamblaje de nuestro generador de hidrógeno. Empezaremos desde la tapa posterior que será nuestra base instalando los tornillos espárragos de 8 mm de diámetros en los orificios externos de la tapa en la secuencia 1,2,3 y 4 como se indicó anteriormente, fijados por turcas con sus respectivas arandelas para generar mayor área de ajuste, así como podemos observar en la figura 27.

Figura 27.

Proceso de ensamblaje del generador de hidrogeno.



Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente colocaremos una junta de goma que permita la separación de 6 mm de la tapa con el electrodo de carga, para obtener el sellado hermético se utilizó silicona de sello de juntas para motor de esta manera evitaremos fugas de agua y de gas durante el proceso de la electrolisis. El electrodo designado será el de carga negativa denominado cátodo donde aparecerá el hidrógeno, dicho electrodo en su esquina de 90° pasaremos el tornillo espárrago de 8 mm de diámetro que servirá de conexión eléctrica al suministrar la energía eléctrica del borne negativo de la fuente de poder “batería”, en la figura 28 se muestra el ensamblaje explicado.

Figura 28.

Uso de Silicona para el ensamble del generador de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

Colocado el electrodo de carga negativa seguida de su respectiva junta de separación, colocaremos dos electrodos neutros alternando las juntas de separación en medio, sellando en cada componente con silicona para su respectiva hermeticidad, de esta manera llegaremos al siguiente electrodo denominado “ánodo” de carga positiva donde aparecerá el oxígeno, este electrodo se instala de manera opuesto al electrodo negativo instalado anteriormente, en su esquina de 90° pasaremos el tornillo espárrago de 8 mm de diámetro que servirá de conexión eléctrica al suministrar la energía eléctrica del borne positivo de la batería.

Siguiendo esta secuencia, llegaremos al otro electrodo de carga denominado “cátodo” de carga negativa instalado en la misma posición de su semejante instalado anteriormente, de esta manera al realizar la electrolisis del agua tendremos una producción de hidrógeno y oxígeno en relación de 2:1 respectivamente. Finalmente cerraremos el generador con su tapa delantera donde se encuentran instalados los conectores roscado espiga de 10 mm de diámetro en la secuencia A y B, en dicha tapa deberá encajar los 4 tornillos espárragos de 8 mm de diámetros en la secuencia 1,2,3 y 4 fijados con sus turcas y arandelas, de esta manera

generaremos el ajuste correspondiente en diagonal de forma homogénea procurando no deformar la posición de las junta de goma y las tapas de metacrilato, de esta manera se concluye con el ensamblaje del generador como se puede observar en la Figura 29 dando un volumen 500 cm^3 .

Figura 29.

Generador de hidrógeno concluido.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.5. Producción de Hidrogeno.

Para saber la cantidad de hidrogeno producido por el generador de hidrogeno en el proceso de electrolisis es necesario tener en cuenta las leyes de Faraday, donde se demuestra que, al circular una corriente eléctrica en una solución se transforma la materia en otros productos donde la corriente es la fuerza motriz necesaria para la reacción de “reducción y oxidación” del proceso. Al electrolizar el agua, se requiere volverla conductora a través de la adición de iones, estos se obtienen al disolver en el agua un electrolito que acelere la reacción de electrolisis y obtener hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo.

Para tal caso enunciaremos las leyes de Faraday:

- La primera ley de Faraday establece que, durante el proceso de electrólisis, la masa que se desprende de una sustancia es proporcional a la carga eléctrica que circula por los electrodos dentro de la solución.
- La segunda ley de Faraday es una extensión de la primera ley donde establece que, la masa depositada en un electrolito es proporcional a su peso equivalente.

Para tal caso se tiene la siguiente expresión:

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

Donde:

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

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

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

Z : Número de electrones transferidos en la sustancia.

F : Constante de Faraday 96485 C/mol.

Según las leyes de Faraday citadas anteriormente existe una relación entre la corriente eléctrica que circula a través de un electrodo puesto en una cuba electrolítica y la cantidad de masa depositada en la superficie de dicho electrodo de una sustancia alterada. Para nuestra investigación las sustancias que serán desprendidas por los electrodos de carga serán hidrógeno y oxígeno en forma diatómica. Por consiguiente, se replantea la fórmula citada para cada elemento.

Para el Hidrógeno:

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

Para el Oxígeno:

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

El estado de los productos de la sustancia alterada se encuentra en estado gaseoso por tal motivo aplicaremos la ecuación de estado de los gases ideales:

$$P \cdot V = R \cdot n \cdot T$$

Donde:

P: Presión atmosférica (MPa).

V: Volumen (m³).

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

n: Número de Moles (mol).

T: Temperatura (K).

Damos forma a la ecuación de estado de los gases ideales, dejando el número de moles:

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

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

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

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

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

De igual manera para el Oxígeno:

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

De esta manera tenemos dos ecuaciones que nos servirán de comprobación para la producción de hidrógeno y oxígeno durante los ensayos realizados en el motor.

La corriente eléctrica necesaria para la disociación de la molécula de agua en la reacción electroquímica requiere añadir un electrolito que aporte iones para acelerar la electrolisis, por tal motivo usaremos el hidróxido de sodio (NaOH) o comúnmente llamada Sosa Cáustica recomendado anteriormente.

Para la producción de ambos elementos utilizaremos agua destilada, al no tener una buena conductividad eléctrica disolveremos la sosa cáustica (NaOH) en porcentajes de masa que nos permitan obtener una producción de hidrógeno que se aproxime o sea superior a la cilindrada del motor el cual es de 1343 cc. Por lo tanto, disolveremos porcentajes de 3, 4, 5, 6% en peso de sosa cáustica para nuestros ensayos.

Es necesario saber la cantidad de masa del soluto (NaOH) disuelta en la solución, por tanto, utilizaremos la fórmula de concentración de una solución en 1L de agua, siendo esta agua destilada de densidad igual a 1 g/cm^3 , la masa de 1L será equivalente a 1000g, según la siguiente ecuación.

$$\% \text{ masa} = \frac{m_{\text{soluta}}}{m_{\text{solución}}} \cdot 100\%$$

Donde:

$\% \text{ masa}$: Porcentaje de la solución.

m_{soluta} : Masa del soluto (NaOH).

$m_{\text{solución}}$: Masa de la solución.

De obtener la cantidad adecuada para la masa del soluto (NaOH) en la solución, esto se verá reflejado en la cantidad de corriente eléctrica que circulará en nuestro generador en el

proceso de electrolisis. De esta manera disolveremos la sosa caustica partiendo de una concentración del 3% hasta llegar al 6%.

A continuación, se muestra la tabla 7 los resultados obtenidos en los ensayos durante el proceso de electrolisis, para esto se utilizó como fuente de poder la batería de ácido de 12V con 770Ah del vehículo con las concentraciones citadas.

Tabla 7.

Ensayos del generador de hidrogeno.

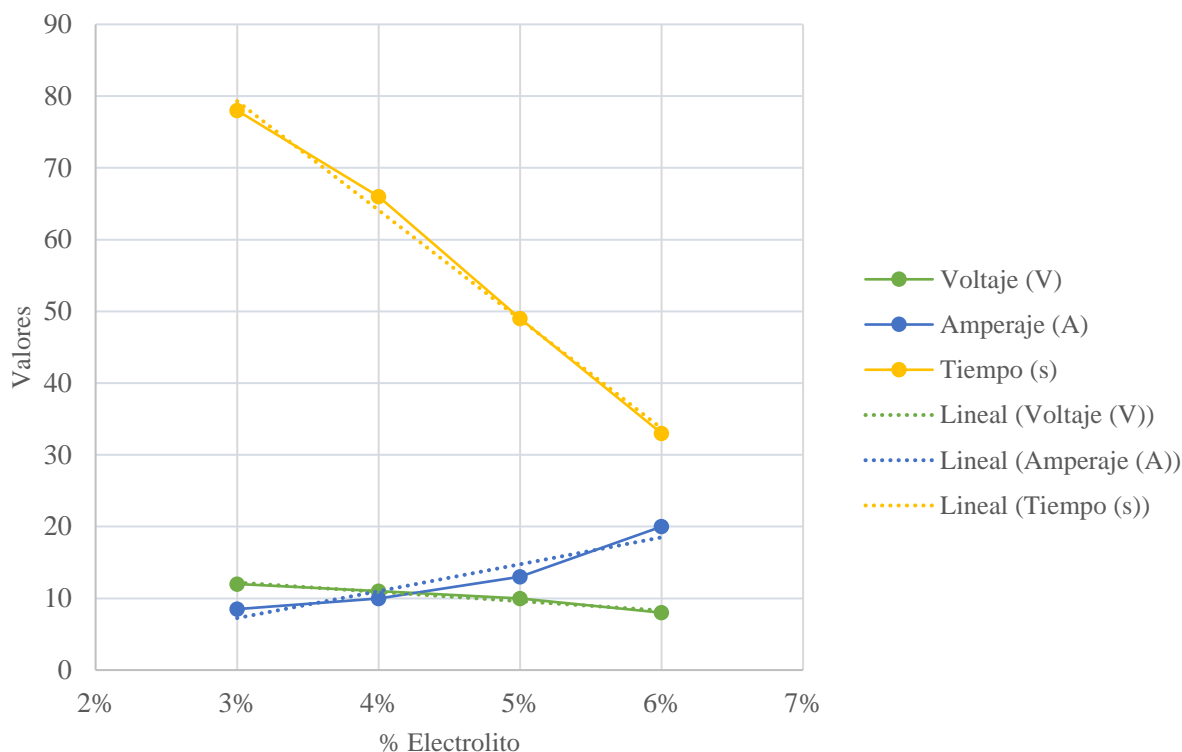
Electrolito NaOH (%)	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Tiempo (s)	Producción (L)
3%	12	8.5	78	0.5045
4%	11	10	66	0.5091
5%	10.5	13	49	0.5000
6%	8	20	33	0.5045

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 30 podemos graficar y comparar los valores obtenidos de la tabla 7 para cada concentración del electrolito.

Figura 30.

Ensayos del generador de hidrogeno.



Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar que tanto para la tabla 7 y la figura 30 el grado de concentración del electrolito determina la cantidad de producción de hidrógeno y oxígeno en un tiempo determinado, cabe resaltar que el tiempo de producción es una variable de vital importancia ya que estos valores determinarán a futuro el desplazamiento del combustible primario del motor según al caudal de producción de hidrógeno al ser utilizado como complemento.

Para todos los ensayos en el generador se tuvo como meta la producción de medio litro, por tanto, para una concentración del 3% el tiempo de producción es desfavorables por ser muy extenso, este valor no podría reflejar un ahorro de gasolina al ser utilizados en el motor. La concentración del 6% presenta valores de tiempo y consumos de corriente inversamente proporcional a una concentración del 3%, pero en el momento del ensayo se

pudo observar la existencia de espuma y del electrolito que se depositaba de forma solida en la parte inferior del generador, así como también el cambio de coloración del agua, como se puede observar en la figura 31.

Figura 31.

Concentraciones solidas del Electrolito.



Fuente: Elaboración propia.

A su vez se pudo observar el cambio de coloración de los electrodos como se puede observar en la figura 32, esto por la alta corriente que circula por el generador, este valor de corriente es desfavorable para la fuente de poder ya que su descarga se realiza de forma instantánea y para la producción de hidrogeno, ya que se corre el riesgo que el agua cambie de estado y tener una mezcla de hidrógeno, oxígeno y vapor de agua.

Figura 32.

Cambio coloración de los electrodos.



Fuente: Elaboración propia.

El valor de concentración favorable que se pudo obtener y se observa en la figura 30 son para la concentración del 5% en peso de sosa caustica, los valores de tiempo y corriente eléctrica incrementan de forma progresiva para la producción de hidrógeno y oxígeno sin presentar los inconvenientes citados anteriormente para concentraciones del 3% y 6%.

Por lo tanto, la cantidad de masa de “soluto” necesario para nuestros ensayos es:

$$\% \text{ masa} = \frac{m_{\text{soluto}}}{m_{\text{soluto}} + m_{\text{solvente}}} \cdot 100\%$$

$$5\% = \frac{m_{\text{soluto}}}{m_{\text{soluto}} + 1000} \cdot 100\%$$

$$m_{\text{soluto}} = 52\text{g NaOH}$$

A continuación, comprobaremos la producción total con las ecuaciones citadas anteriormente reemplazando los valores de la tabla 7 para una concentración del 5% y considerando los valores de temperatura atmosférica (T_0) = 25°C (298 K) y presión atmosférica (P_0) = 0.1015 MPa, obtenemos lo siguiente:

Producción de hidrógeno:

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

$$V_{H_2} = \frac{13 \text{ A} \cdot 49 \text{ s} \cdot 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \cdot 298 \text{ K}}{1 \cdot 96485 \text{ C/mol} \cdot 0.1015 \cdot 10^6 \text{ Pa}} \cdot 10^3$$

$$V_{H_2} = 0.1644 \text{ L}$$

Producción de Oxígeno:

$$V_{O_2} = \frac{13 \text{ A} \cdot 49 \text{ s} \cdot 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \cdot 298 \text{ K}}{2 \cdot 96485 \text{ C/mol} \cdot 0.1015 \cdot 10^6 \text{ Pa}} \cdot 10^3$$

$$V_{O_2} = 0.0822 \text{ L}$$

Volumen total:

$$V_T = (V_{H_2} + V_{O_2}) \cdot 2$$

$$V_T = (0.1644 \text{ L} + 0.0822 \text{ L}) \cdot 2$$

$$V_T = 0.4933 \text{ L}$$

Recopilamos los datos de mayor desempeño obtenidos en la tabla 8 y tenemos lo siguiente:

Tabla 8.

Porcentaje ideal de electrolito para la producción de hidrogeno.

Electrolito NaOH (%)	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Tiempo (s)	Producción teórica (L)	Producción práctica (L)	% de Variación
5%	10.5	13	49	0.4933	0.5000	1.3

Fuente: Elaboración propia.

El valor teórico obtenido difiere por 1.3% al valor experimental, por tanto, tomaremos el valor experimental para los cálculos posteriores, cabe resaltar que este valor de producción es insuficiente para nuestra experimentación, por lo tanto, duplicaremos la producción al

añadir un generador más con las mismas dimensiones y características del generador ya fabricado, para tal caso expresaremos la producción de ambos generadores en un minuto, obtenemos:

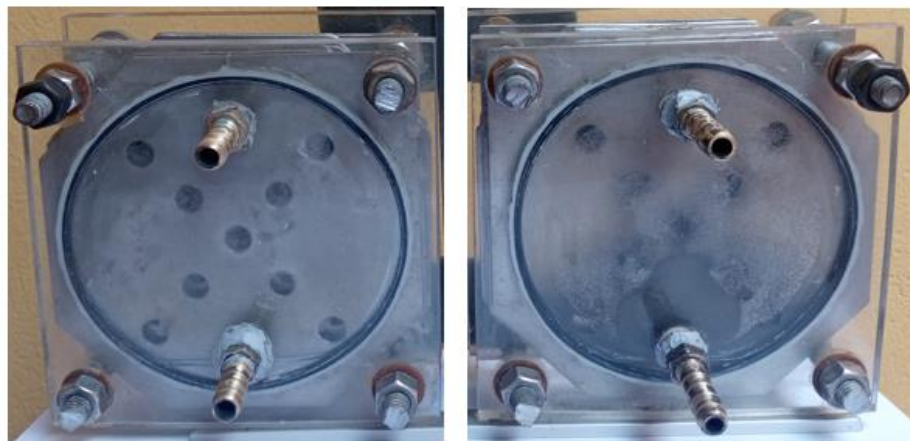
$$V_T = 2 \cdot V_{\text{generador } n^{\circ}1}$$

$$V_T = 1.23 \text{ L}$$

A continuación, en la figura 33 se muestra la configuración final de los generadores de hidrógeno para la etapa de producción.

Figura 33.

Configuración final de los generadores de hidrogeno.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. *Etapas de Potencia.*

En esta etapa uniremos la electricidad y la electrónica, utilizaremos semiconductores para el manejo de corrientes elevadas, de esta manera la electrónica nos permitirá adaptar la corriente eléctrica para ser utilizado en el proceso de electrolisis mediante los dispositivos electrónicos.

El principal objetivo de esta etapa es controlar la corriente eléctrica y de ser posible limitarla, de esta manera reduciremos el efecto Joule que genera la corriente eléctrica al circular

por los electrodos de carga elevando la temperatura del agua y reduciendo la eficiencia del proceso de electrolisis.

El principal dispositivo que utilizaremos serán los transistores de potencia, en específico el transistor bipolar BJT del tipo NPN trabajando en modo saturación y corte “on/off” (encendido y apagado), la principal ventaja de utilizar este tipo de transistor es por su manejo de corrientes y que pueden ser controlado por un microcontrolador que para nuestro diseño será un Arduino.

La conexión eléctrica para ambos generadores será en un circuito en paralelo, dado que el consumo de corriente para su funcionamiento es de 26A (obtenido en los ensayos), es que se opta por utilizar los transistores 2N3055 de activación lógica positiva para nuestro diseño el cual cumple con las prestaciones antes mencionadas, a continuación, en la figura 34 mostramos la figura del transistor 2N3055.

Figura 34.

Transistor 2N3055.



Fuente: Descubre Arduino (2021).

Seleccionado el transistor, debemos calcular si la corriente que es suministrada a la carga podrá estar dentro del rango de funcionamiento es estado de saturación para el transistor. Para ello debemos saber la ganancia de corriente “hfe” el cual será obtenido por su datasheet del transistor, así como otros valores que están puestos en la tabla 9 a continuación.

Tabla 9.

Valores del transistor 2N3055 NPN.

Ratio	Símbolo	Descripción	Capacidad
Voltaje	V_{cb}	Tensión de colector a base	100 V
	V_{ce}	Tensión de colector a emisor	60 V
	V_{eb}	Tensión de emisor a base	0.7 V
Corriente	I_c	Corriente máxima de colector	$I_c = 4.0 \text{ Adc}, I_b = 400 \text{ mAdc}$
		Corriente máxima de colector	$I_c = 10 \text{ Adc}, I_b = 3.3 \text{ mAdc}$
		Corriente máxima de colector	$I_c = 15 \text{ Adc}, I_b = 7.0 \text{ mAdc}$
Ganancia	h_{fe}, β	Ganancia de corriente	40
Potencia	P	Máxima disipación de potencia en colector	180 W

Fuente: All Data Sheet 2N3055 (2021).

La polarización del transistor será “Polarización por realimentación del emisor”, por prestar las mejores condiciones de ganancia de corriente, de tal forma que la alimentación de cada generador (carga) será desde el emisor del transistor. Según la tabla 9 aproximaremos el consumo de corriente de colector a 4A, dado que la demanda de corriente por generador es de 13A se requieren 4 transistores, pero por razones de seguridad no podemos trabajar al límite de corriente máxima del transistor ya que se busca que el funcionamiento para la producción de hidrógeno sea continuo, por tanto, usaremos 5 transistores conectados en casada por generador.

Para comprobar lo indicado calcularemos la corriente de activación de control de base, esta corriente será quien active a los generadores para su funcionamiento.

$$I_e = I_b + I_c$$

$$\beta = \frac{I_c}{I_b}$$

Donde:

I_e : Corriente de emisor.

I_e : Corriente de base.

I_e : Corriente de colector.

β : Ganancia de corriente

De ambas ecuaciones obtenemos:

$$I_b = \frac{I_e}{\beta + 1}$$

Reemplazamos:

$$I_b = \frac{2.6A}{40 + 1}$$

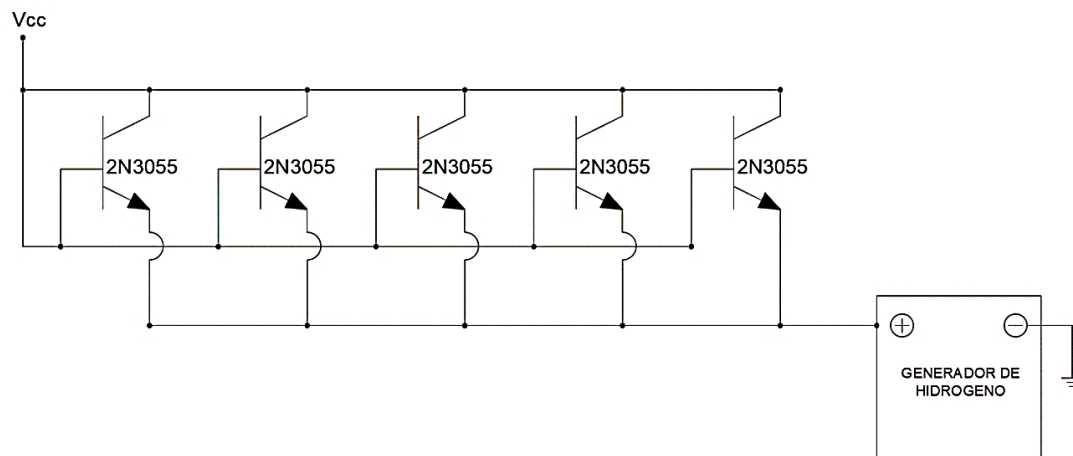
$$I_b = 63 \frac{\text{mA}}{\text{transistor}} \cdot 5 \text{ transistores}$$

$$I_b = 315 \text{ mA}$$

El valor obtenido está por debajo de la corriente máxima de base $I_b = 400\text{mA}$ según la tabla 9, por consiguiente, la configuración citada anteriormente de colocar los transistores en cascada es correcta, a continuación, se muestra el diseño final en la figura 35.

Figura 35.

Configuración de los transistores 2N3055.



Fuente: Elaboración propia.

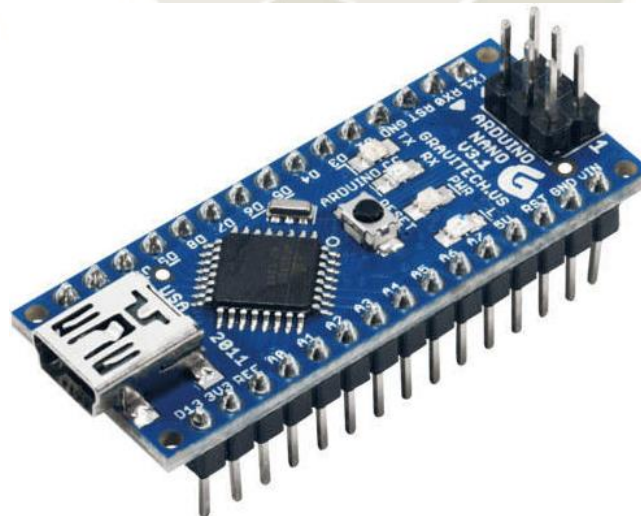
3.3.3. *Etapa de Control.*

Como se mencionó en la etapa de potencia una de las características del uso de los transistores BJT es que pueden ser controlados por un microcontrolador, teniendo en cuenta el consumo de corriente y evitar el efecto Joule es que se opta por un funcionamiento “on/off” (prendido y apagado) para ambos generadores de forma simultánea para un mismo intervalo de tiempo de trabajo, de esta forma controlaremos el disparo y corte de la corriente eléctrica de ambos generadores en un periodo determinado.

Para lograr el estado de funcionamiento “on/off” utilizaremos el microcontrolador Arduino NANO, su selección fue por las prestaciones de su uso, dimensiones para un ahorro de espacio, fácil adaptación en el circuito de control y contar con un lenguaje de programación multipropósito que permite actuar acuerde a lo que tenga programado en su memoria, a continuación, en la figura 36 mostramos el esquema del Arduino Nano.

Figura 36.

Arduino NANO.



Fuente: Programar fácil (2021).

A continuación, en la tabla 10 sus principales características:

Tabla 10.

Principales valores del Arduino Nano.

Descripción	Capacidad
Tensión de Operación nivel lógico	5 V
Tensión de Entrada límites	6-20 V
Consumo de energía	19 mA
Pines Digitales, con corriente máx 40 mA	14
Pines Digitales proveen de salida PWM	6
Entradas Analógicas con corriente máx 40 mA	8
Dimensiones	18.5 x 43.2 mm

Fuente: All Data Sheet Arduino Nano (2021).

Este tipo de Arduino usa la modulación por ancho de pulso “PWM” (pulse width modulation por sus siglas en inglés), donde utiliza una señal digital y la convierte en una señal analógica variando el tiempo que permanece encendido o apagado el ciclo. Aquí se designa el término “ciclo de trabajo” (Duty Cycle) que describe el porcentaje de tiempo que permanece activa la señal en modo “on” en comparación al tiempo que permanece desactivada la señal en modo “off” en la señal periódica.

Figura 37.

Señal de modulación por ancho de pulso.



Fuente: MecanicAPP (2021).

El ciclo de trabajo (Duty Cycle) es definido por el diseñador para sus condiciones de trabajo, donde se busque el porcentaje que mejor eficiencia brinde al diseño en una amplia gama de rangos que varía de 0% al 100%. En la figura 37 expresa una señal de pulso digital cuadrada de amplitud 5V, equivalente al valor digital “1” en modo “on” seguida de la señal de desactivación de código “0” a 0V modo “off”, donde el periodo es la suma de los tiempos de duración de ambas señales.

El ciclo de trabajo se obtiene según la expresión.

$$DC = \frac{t_{on}}{T} \cdot 100\%$$

Donde:

DC : Duty Cycle

t_{on} : Tiempo de activación.

T : Periodo del ciclo.

Donde podemos citar algunos valores:

- Duty Cycle = 0%, este valor nos indica que la señal se encuentra inactiva, es decir estado bajo donde no existe tiempo de suministro de energía.
- Duty Cycle = 50%, este valor nos indica que la mitad del periodo la señal se encuentra en estado activo.
- Duty Cycle = 100%, este valor nos indica que la señal se encuentra activa en estado alto en todo momento donde se entrega la totalidad de energía.

Para nuestro diseño el ciclo de trabajo es de vital importancia para la producción de hidrógeno y oxígeno en los generadores, ya que el tiempo de duración del ancho de pulso en modo “on” debe ser mayor que la señal en modo “off”, este porcentaje nos garantiza un mayor tiempo producción y de suministrando de electricidad para ambos generadores.

El ciclo de trabajo para nuestro diseño se obtuvo de forma experimental, para tal caso, se tomó la cantidad de tiempo mínima medible, es decir un segundo en modo “on” y un segundo en modo “off” como valores iniciales, donde se tiene un valor del DC=50%, lo que significa que el tiempo que la señal esta activado para suministrar de corriente eléctrica para ambos generadores es de un segundo y que el tiempo que la señal esta inactivado para el corte de corriente es de un segundo.

A partir de aquí es donde se incrementa de forma progresiva el tiempo de duración del ancho de pulso hasta obtener el valor óptimo de producción, usando la energía necesaria para la activación y evitar pérdidas de potencia por calor, los valores obtenidos se muestran a continuación:

$$t_{on}: 1.9 \text{ s.}$$

$$T: 2 \text{ s}$$

Reemplazamos y obtenemos:

$$DC = \frac{t_{on}}{T} \cdot 100\%$$

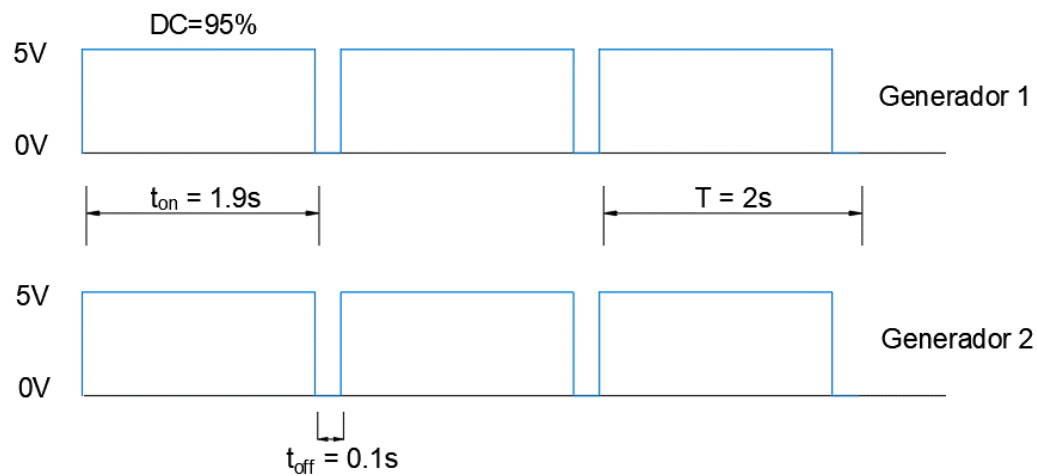
$$DC = \frac{1.9 \text{ s}}{2 \text{ s}} \cdot 100\%$$

$$DC = 95\%$$

Este valor del 95% del ciclo de trabajo nos muestra una señal de activado con tiempo de duración de 1.9 s para el suministro de corriente eléctrica para ambos generadores y 0.1 s de señal inactivado para el corte de corriente de forma simultánea dando un periodo de 2 segundos de funcionamiento del ciclo, a continuación, en la figura 38 mostramos de la señal de modulación por ancho de pulso para nuestro diseño.

Figura 38.

Señal de modulación por ancho de pulso de diseño.



Fuente: Elaboración propia.

Tomando el valor calculado de producción de hidrógeno y oxígeno de ambos generadores se obtuvo:

$$V_T = 1.23 \text{ L}$$

Este valor de producción será afectado por el ciclo de trabajo obtenido, tendremos:

$$V_{Real} = V_T \cdot DC$$

$$V_{Real} = 1.23 \text{ L} \cdot 95\%$$

$$V_{Real} = 1.18 \text{ L}$$

3.3.3.1. Código de programación.

Para lograr la producción citada anteriormente y obtener el ciclo de trabajo del 95%, se utilizó el lenguaje de programación del Arduino para el uso de placa Arduino Nano, a continuación, se muestra la programación.

Figura 39.

Código de programación Arduino Nano.

```
int value;      //variable que almacena la lectura analógica raw
int position;  //posicion del potenciometro en tanto por ciento
int gen1Pin = 9;    // Pin de salida para generador 1
int gen2Pin = 10;  // Pin de salida para generador 2

void setup() {
  pinMode(gen1Pin, OUTPUT); // Declara el pin del generador 1 como de salida
  pinMode(gen2Pin, OUTPUT); // Declara el pin del generador 2 como de salida
}

void loop() {
  value = analogRead(A0); // lee la entrada analógica desde el pin 0
  position = map(value, 0, 1023);

  Serial.println(position); // muestra el valor leído
  digitalWrite(gen1Pin, HIGH); // Enciende el generador 1
  digitalWrite(gen2Pin, HIGH); // Enciende el generador 2
  delay(1900),
  digitalWrite(gen1Pin, LOW); // Enciende el generador 1
  digitalWrite(gen2Pin, LOW); // Enciende el generador 2
  delay(100);
}
```

Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO IV

4. MONTAJE EN EL VEHICULO DE PRUEBA.

Para el aprovechamiento del hidrógeno y del oxígeno se requiere de componentes que nos permitan activar las etapas descritas anteriormente y transportar ambos gases desde el punto de generación al punto final que es el motor de combustión interna de forma segura y sin pérdidas que puedan provocar accidentes en perjuicio del conductor y/o del motor. Por tanto, para tener un mejor manejo y control de dichas etapas es que los enlazaremos en dos sistemas que nos permitan funcionar de forma dinámica el diseño en conjunto, los cuales son “Sistemas de Agua y Gas” y “Sistema Eléctrico”, de los cuales pasaremos a su desarrollo.

4.1. Sistema de Agua y Gas.

El componente principal de este sistema son los generadores de hidrógeno, los cuales cuando estén en funcionamiento la solución “agua - electrolito” contenido en su interior se irán consumiendo mientras dure el proceso de electrolisis, por ello se requiere un depósito o tanque que contenga la mezcla y alimente de forma continua a ambos generadores. Dicho depósito debe ubicarse a una altura superior a los generadores, de esta manera el desnivel aprovecha la fuerza de gravedad para empujar la solución y llenar al límite los generadores, al conectar en su parte inferior una línea de agua que comunique ambos elementos.

El depósito también desempeñará la función de burbujeador, esta función es de importancia para el filtrado de la reacción, ya que los gases producto de la electrolisis arrastran partículas de agua que no es recomendable su ingreso al motor, por tanto, al ingresar primero al depósito se excluirá el agua de los gases para su purificado. La siguiente función es de abastecer de hidrógeno y oxígenos al motor una vez purgado los gases son introducidos en la línea de gas y direccionados al motor para que participen en la reacción de combustión.

Este depósito de geometría rectangular tiene una capacidad de 1L el cual es adecuado para nuestro diseño por sus dimensiones para un ahorro de espacio y las prestaciones de su uso multipropósito para cumplir con las funciones descritas anteriormente, así mismo su conexión con los generadores de hidrógeno se realiza desde su base, los gases producto de la electrolisis ingresan por la cara frontal donde se filtran y salen por su cara lateral en dirección al ingreso del motor.

4.1.1. Accesorios.

Como se indicó anteriormente, el aprovechamiento del hidrógeno y del oxígeno requiere también de accesorios menores que permitan unir y transportar ambos gases desde el punto de generación al punto de consumo, por tanto, las conexiones deben cumplir con la función de estanqueidad para evitar posibles fugas ya que su efecto repercutirá en el ahorro de combustible y rendimiento del motor.

Un accesorio que es imprescindible de su uso y considerado como un elemento de seguridad importante para la línea de gas es el “arresta llama” o también conocido “flashback”, el cual es un componente pasivo, ya que en su interior no existe elementos móviles para su funcionamiento. Su función es de impedir una propagación de llama que pueda provenir de una fuente de calor que para nuestro caso sería desde el motor. Si la mezcla llegara a activarse y se tuviera la presencia de una ignición este elemento evitara que la flama se propague y retroceda al punto de generación evitando una posible detonación del generador de hidrógeno.

Este componente de geometría cilíndrica permite el paso libre de los gases provenientes de los generadores en su interior, el cual presenta tres compartimentos divididos por mallas metálicas, dos de vidrio triturado ubicado en los extremos y una de piedras de construcción en su parte central ambos de una granulometría de 5mm. De esta manera de existir una ignición los compartimentos del arresta llama neutralizaran su propagación ya que el vidrio triturado fracciona

la flama y la piedra adsorbe su energía impidiendo que este pueda salir hacia los generadores donde la acumulación de hidrógeno en mayor.

A continuación, en la tabla 11 se muestra los elementos que componen el “arresta llama” o “flashback”, el cual para su fabricación se realizó de modo no industrial, pero para nuestro diseño presta las garantías de seguridad y confiabilidad a nuestro sistema de producción de hidrogeno.

Tabla 11.

Componentes del Arresta llamas.

Características	Cantidad	Ilustración
Tubo de PVC L= 150 mm, D= 1 pulg	1	
Tapón hembra PVC D= 1 pulg	2	
Conectores roscado espiga para acople de manguera D= 10 mm	2	
Malla metálica circular D= 1 pulg	4	
Cinta Teflón D= 1/2 pulg	1	
Vidrio triturado D= 1/8 pulg	60 g	
Piedra de construcción D= 1/8 pulg	30 g	

Fuente: Elaboración propia.

Diseño final del arresta llama, como se puede observar en la figura 40 a continuación.

Figura 40.

Arresta llamas.









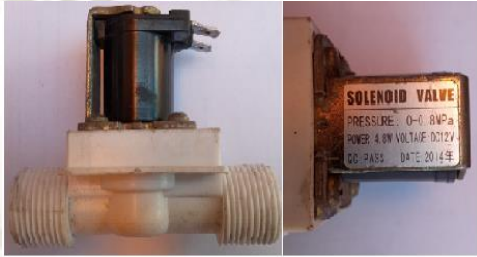




Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la tabla 12 se muestra los elementos que componen el “Sistema de Agua y Gas”.

Tabla 12.

Componentes del Sistema de Agua y Gas.

Características	Dimensiones	Cantidad	Ilustración
Tanque de alimentación de PVC	V= 1L	1	
Conectores roscado espiga para acople de manguera	D= 10 mm	3	
Unión en codo conector para manguera.	D= 3/4 in	7	
Unión en T conector para manguera.	D= 3/4 in	3	

Unión en Y conector para manguera.	D= 3/4 in	2	
Abrazaderas metálicas	D= 3/4 in	40	
Llave de bola bronce	D= 3/4 in	2	
Electroválvula	D= 3/4 in, 12V, Potencia= 4 – 8W	1	
Arresta llamas	L= 150 mm, D= 1 in	1	
Silicona de sello de juntas	Contenido= 85 g	1	
Cinta teflón	D= 1/2 in	1	
Manguera de lona	D= 10 mm L= 4 m	1	

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Sistema de Eléctrico.

De igual forma el componente principal de este sistema sigue siendo los generadores de hidrógeno, para un correcto funcionamiento es necesario sumar las etapas de potencia y control y demás componentes eléctricos que permitan el desarrollo del proceso de electrolisis de forma continua, eficiente y segura. Este circuito constará compuesto por componentes eléctricos de activación, conexión, indicadores, protección y corte ya que la fuente de suministro eléctrico será la batería propia del vehículo, y este al estar en continua carga dado por el alternador es que tendremos valores de corriente y voltaje estables para realizar los ensayos correspondientes al motor.

Para el control del circuito eléctrico de encendido y/o apagado de los generadores es necesario instalar interruptores para la activación y corte de corriente, para ello se tendrá dos puntos de energizado, siendo el primer punto desde la chapa de contacto, el cual al dar arranque al motor energizará un relé que servirá de pase a un segundo interruptor activado manualmente para dar marcha a la producción de hidrógeno en su totalidad, como se muestra en la figura 41.

Figura 41.

Interruptor de marcha para la producción de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

Este interruptor se encuentra ubicado en la parte inferior derecha del conductor, las funciones de ambos interruptores nos brindan una mayor seguridad y confianza al momento de la conducción ya que en el instante que se desee apagar el motor, esta acción detendrá la producción de hidrogeno.

La función de este interruptor es de activar una electroválvula ubicado en la línea de gas, de esta manera se da pase al hidrógeno y oxígeno provenientes del tanque de agua hacia el motor, la finalidad de esta electroválvula es brindar continuidad y corte del suministro de ambos gases y evitar que la línea de gas este cargada por este combustible, , como se muestra en la figura 42.

Figura 42.

Electroválvula de la línea de Gas.



Fuente: Elaboración propia.

Al circuito eléctrico se suma un reloj amperimétrico de escala de 0A a 60A para censar el consumo de corriente ubicada al inicio del circuito, en una conexión próxima al borne positivo de la batería, el valor registrado de consumo de corriente para el funcionamiento de ambos generadores fue de 26A (obtenido en los ensayos), y un fusible térmicos general de 30A de tipo patas abiertas que nos permita limitar y/o cortar el flujo de corriente, cuando exista un sobre consumo producido por los generadores, como se muestra en la figura 43 y 44.

Figura 43.

Reloj Amperímetro.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 44.

Corriente Eléctrica de trabajo.



Fuente: Elaboración propia.

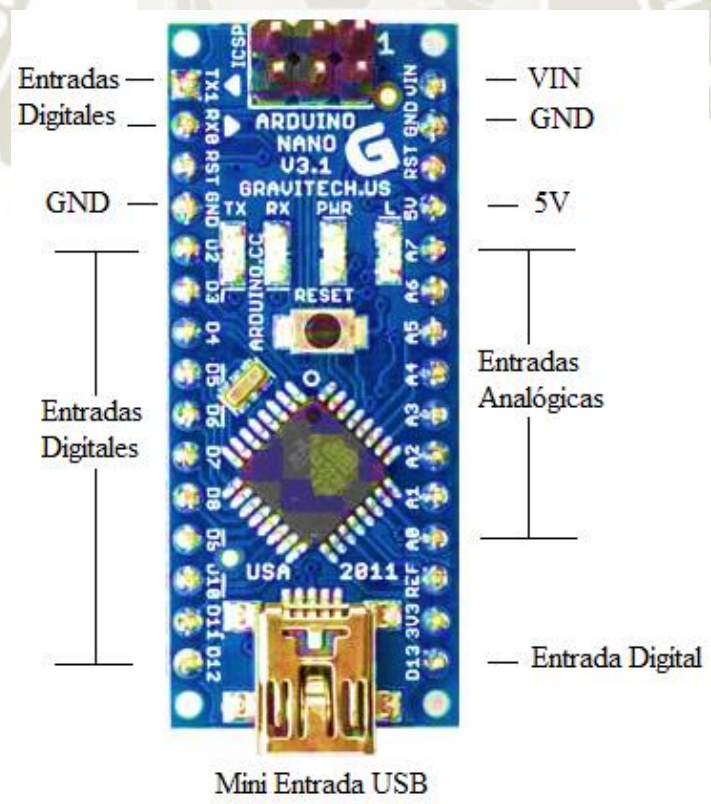
4.2.1. Conexión del microprocesador.

Para la conexión de esta placa de desarrollo se requiere saber la configuración y distribución de los pines de conexión propios del Arduino Nano, para tal caso procederemos a la descripción de las principales partes que nos servirán para las conexiones eléctricas con los demás componentes electrónicos necesarios para su funcionamiento.

La placa Arduino Nano se divide en dos regiones claramente definidas, una región Digital con un total de 14 pines, de los cuales 6 son salidas analógicas para la utilización de la señal PWM, y una región Analógica con un total de 8 pines de entradas analógicas, tal como se muestra en la figura 45.

Figura 45.

Descripción de los principales pines del Arduino Nano.



Fuente: Elaboración propia.

Para energizar la placa cuenta con pines de alimentación, el pin VIN permite alimentar la placa con un voltaje que oscila en un rango de 6V a 20V con su respectivo pin GND de tierra ubicados en la región analógicas, el pin 5V ubicado en la región analógica nos brinda la alimentación de energía para otros componentes electrónicos fuera de la placa dando cierre al circuito con el pin GND ubicados en la región digital.

El puerto Minientrada USB también nos brinda energizar la placa siendo su principal función de cargar el código de programación en su memoria. Debe indicarse que para el desarrollo del ciclo de trabajo y poder definir el óptimo porcentaje se instaló un potenciómetro de escala de 0Ω a $1K\Omega$ en el circuito eléctrico de control esto para fines prácticos en los ensayos realizados en los generadores de hidrógeno.

Es necesario resaltar que se maneja dos tensiones de trabajo, la primera para la etapa de potencia con tensiones que van de 12V a 14V y una segunda de 6V a 7V para la etapa de control, para esta última etapa se utilizara un regulador de voltaje que se energizara con la tensión nominal de la batería y entregara 6V para el funcionamiento del microprocesador, como se muestra en la figura 46.

Figura 46.

Regulador de voltaje XL4015-1.



Fuente: ElectroPeak (2021).

Así mismo también se utilizará un módulo de 2 relés que sirva como nexo de comunicación entre el microprocesador los relevadores de la etapa de potencia, este módulo de 2 relés estará controlado por el pulso del microprocesador dado por la etapa de control para su activación y corte, como se muestra en la figura 47.

Figura 47.

Módulo 2 relé.



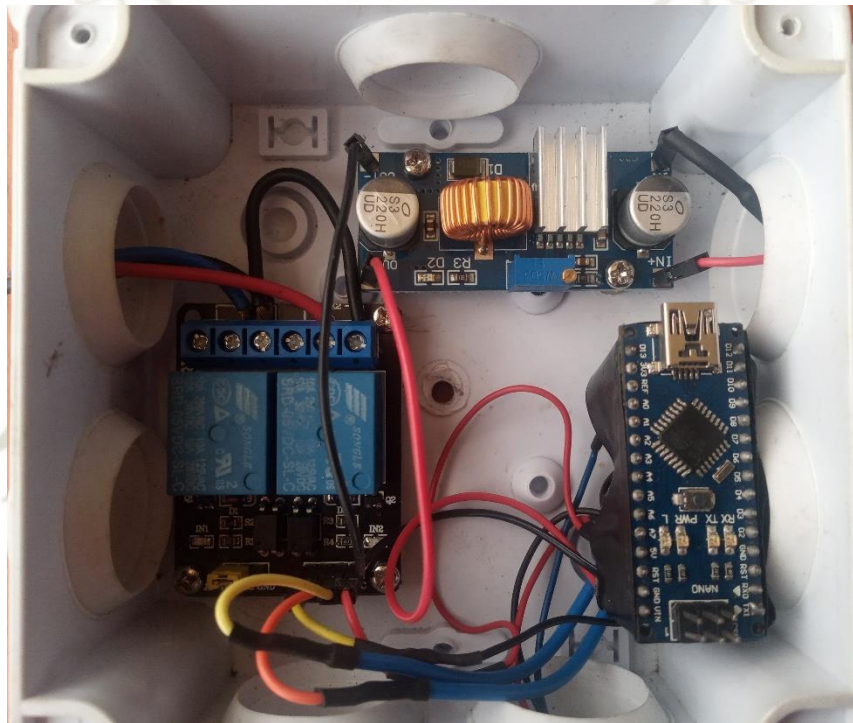
Fuente: Altronics (2021).

Reconocido los pines de conexión es que podemos nombrar cuales de estos serán utilizados para la conexión en el circuito eléctrico de control para nuestro diseño. Partimos desde el suministro de energía dado por la batería que energizará el Arduino no sin antes pasar por el regulador de voltaje que entregara un voltaje constante de 6V conectados en los pines VIN y GND (región analógicas), seguidamente suministraremos energía desde nuestra placa Arduino al módulo de 2 relé y potenciómetro desde el pin 5V, una conexión hacia el borne fuente de poder VCC de ambos relés y otra conexión al terminal de entrada del potenciómetro, dando cierre al circuito conectando los terminal de tierra de ambos componentes auxiliares con el pin GND (región digital).

Por último, conectaremos los pines 9 y 10 del Arduino (región digital) con el borne JD-VCC que es la alimentación de los electroimanes de ambos relés del módulo, estos pines serán para la utilización de la señal PWM, y otra conexión en el pin A0 (región analógica) con el terminal regulable del potenciómetro, en la figura 48 se muestra la distribución de la etapa de control.

Figura 48.

Distribución del circuito de control.







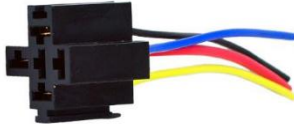


Fuente: Elaboración propia.










4.2.2. Accesorios.




Los accesorios para las conexiones eléctricas y enlazar las etapas de control, potencia y generación son los componentes básicos en circuitos eléctricos, tales como interruptores (general y auxiliar), fusibles, relés, caja de conexión eléctrica, etc. que cumplan las funciones de activación, protección y corte que nos permita tener el control del circuito, a continuación, se muestra los elementos que componen el “Sistema Eléctrico”.

Tabla 13.

Componentes del Sistema de Eléctrico.

Características	Dimensiones	Cantidad	Ilustración
Arduino Nano	D= 43 x 18 mm	1	
Regulador de voltaje XL4015-1	D= 54 x 23 mm	1	
Módulo de 2 Relé	D= 50 x 45 mm	1	
Relé Universal	I= 80A, 12V, 4 terminales	3	
Porta relé Universal	4 terminales	3	
Reloj Amperímetro Universal	-60 a 60 A	1	
Terminal eléctrico pre aislado tipo pala hembra	D= 3/4 in	22	

Interruptor selector	Iluminado color rojo, 2 posiciones	1	
Terminal eléctrico pre aislado tipo ojo	D= 3/8 in	4	
Cinta Aislante negra	L= 18 m	1	
Tubo corrugado para instalación eléctrica	L= 5 m, D= 3/4 in	1	
Tubo termo contraíble para uniones eléctricas	L= 1 m, D= 3 - 5 mm	1	
Cintillo de plástico negro	D= 100 x 2.5 mm	20	
Caja de conexión eléctrica de plástico de superficie	D= 100 x 100 mm	1	
Cable eléctrico solido AWG	Calibre= 12 (20 - 25 A), L= 5 m	1	
Cable eléctrico solido AWG	Calibre= 14 (15 A), L= 3 m	1	

Fusible térmicos patas abiertas	I= 30 A	1	
Porta fusible Universal	-	5	
Fusible tipo uña	I= 3 A	2	
	I= 5 A	1	
	I= 10 A	1	
	I= 20 A	1	

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Montaje.

El montaje de las etapas y accesorios descritos anteriormente estarán distribuidos en el área designado al motor del vehículo, de tal forma que el sistema propuesto no altere el funcionamiento del motor al momento de dar arranque, ya que el objetivo es utilizar el hidrógeno como complemento del combustible y de esta manera reflejar un ahorro al consumo de gasolina.

Debe indicarse que no se realizaran modificaciones al diseño original del motor e incluso del vehículo, ya que nuestro diseño es portátil, de esta forma, de no requerirlo en el vehículo su retiro se realice de forma rápida y segura sin tener que retornar elementos propios del motor. El montaje de las etapas y accesorios se describen a continuación.

4.3.1. Montaje de Sistema de línea de Agua, Gas y Eléctrico.

La posición del motor del vehículo es frontal de orientación transversal por ende la tracción es delantera, debido a esto el espacio para la distribución de las etapas y accesorios es limitada, pero se buscó al área necesaria para dar el mejor reparto y la disposición de estos componentes.

Dado que el componente principal de ambos sistemas son los generadores de hidrógeno, estos se ubicaron en la parte lateral izquierda (vista frontal) próximo al cilindro n°1 en el lado del conductor en medio del motor y el radiador, los generadores se encuentran sujetos al motor por dos puntos fijos a este, se tuvo que fabricar una montura que sostenga a los generadores y a su vez que este sujeto al motor, posterior al montaje se procedió a la instalación de las mangueras de la línea de agua y de gas, en las figuras adjuntas a continuación, se observar el final de ambos montajes, debe indicarse que para la instalación de todos los sistemas se procedió con la desconexión de la batería para evitar cortos circuitos.

Figura 49.

Montura de los generadores de hidrógenos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 50.

Montaje de los generadores de hidrógenos puesto en el motor.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 51.

Montaje de los generadores de hidrógenos en el motor, vista posterior.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 52.

Montaje de los generadores de hidrógenos en el motor, vista inferior.



Fuente: Elaboración propia.

En la línea de agua se instaló una válvula tipo bola de 1/4" entre el depósito y los generadores, para drenar el agua y proceder a futuro con la limpieza de los generadores.

Figura 53.

Válvula tipo bola para drenado del agua.

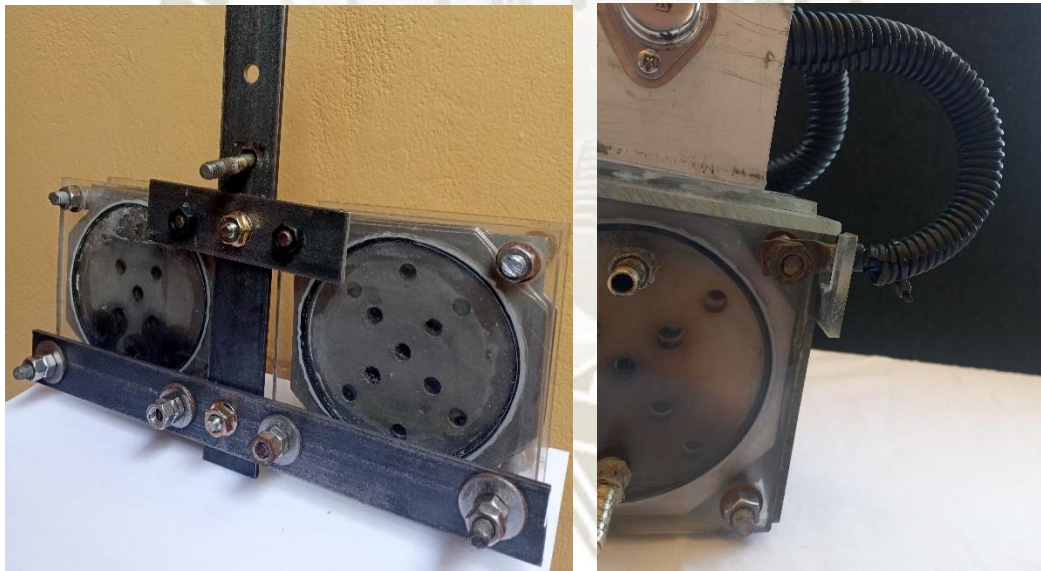


Fuente: Elaboración propia.

Como se detalló anteriormente en el capítulo III, para el proceso de ensamblaje del generador los electrodos de carga están en una relación de 2:1, donde los electrodos negativos son los de mayor número para obtener mayor producción de hidrógeno, al colocar ambos generadores (uno próximo del otro) estos electrodos deben apuntar a mirarse entre sí, a esta disposición es donde se sujeta a la montura fabricada que a su vez se sujeta al motor, el electrodo positivo de ambos generadores están en direcciones opuestas a los electrodos negativos, a esta disposición se conectan al emisor del conjunto de transistores dando el cierre al circuito, como se muestra en la figura 54.

Figura 54.

Conexión eléctrica de los generadores.

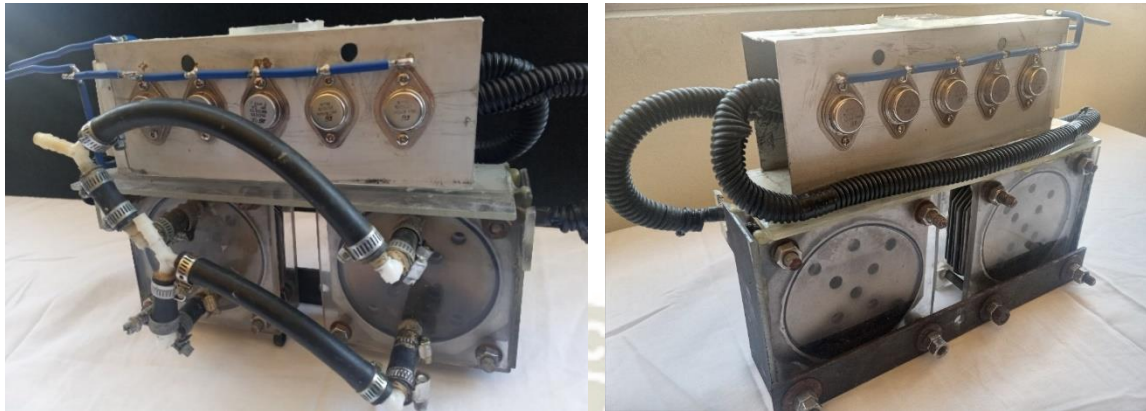


Fuente: Elaboración propia.

La ubicación de la etapa de potencia requiere estar próximo a los generadores de hidrógeno para evitar caídas de tensión, por lo que se consideró instalarlos encima de los generadores tal como se muestra en la figura 55 y su ubicación en el vehículo como se muestra en la figura 56.

Figura 55.

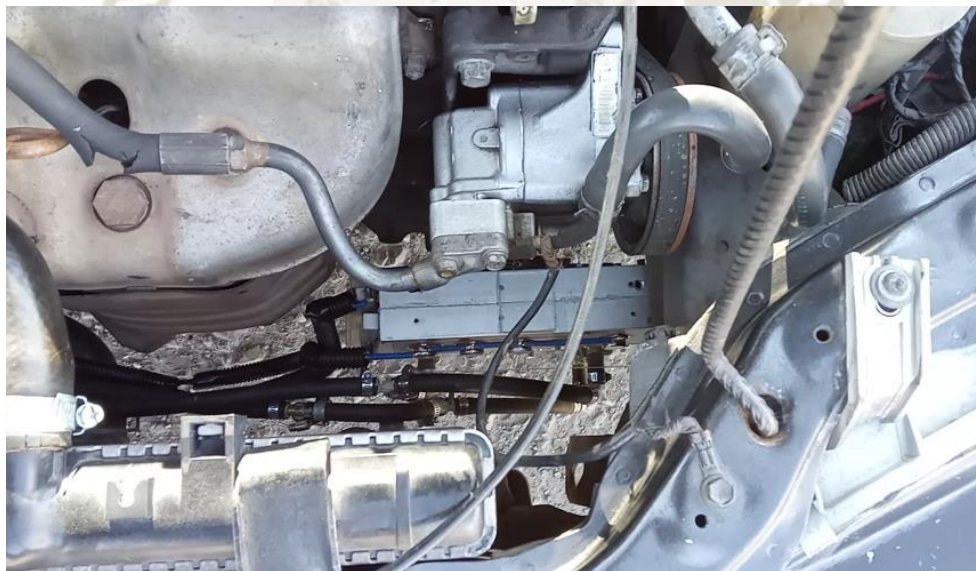
Ubicación de la etapa de potencia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 56.

Etapa de Potencia en el vehículo, vista superior.



Fuente: Elaboración propia.

La línea de agua y gas convergen en el depósito de agua de capacidad 1L, su ubicación a una altura superior a los generadores ayuda a que el agua los llené en su totalidad dando una capacidad de 500cm^3 cada uno. En su cara lateral derecha (vista frontal) se distribuye la línea de gas que se compone en un comienzo de una unión en “T” para conexión de manguera seguida en

línea horizontal de una válvula de bola de bronce que controla la dosificación de ingreso de hidrógeno y oxígeno hacia el motor. En línea vertical de la unión en “T” se conecta otra válvula de bola de bronce para comprobar la producción de ambos gases, como se muestra en la figura 57.

Figura 57.

Línea de Gas suministro de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la línea de gas se encuentra conectado la electroválvula seguida del arresta llama para impedir una propagación de llama que pueda provenir en ambas direcciones, como se muestra en la figura 58 de esta forma continua la línea de gas hasta llegar a la base del filtro de aire del motor donde se aprovechó un orificio por donde ingresa la línea de gas terminando en la garganta del carburador como se observa en la figura 59.

Figura 58.

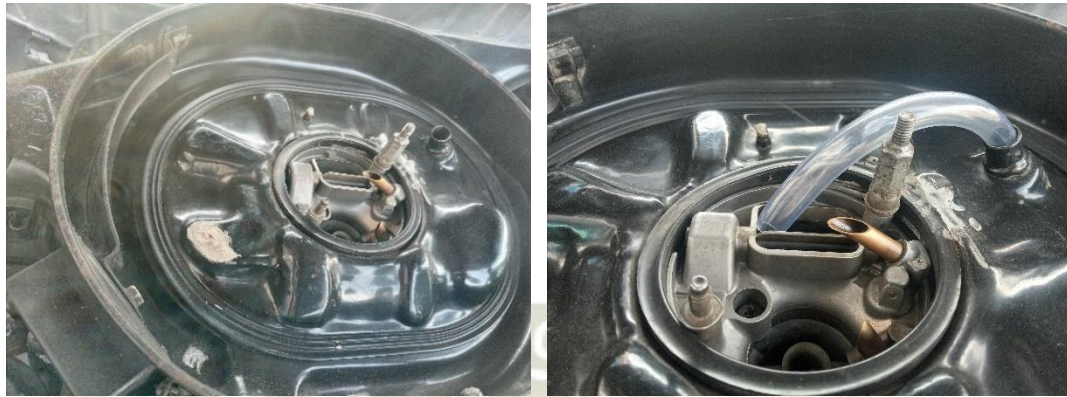
Componentes de la Línea de Gas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 59.

Ingreso del hidrógeno al motor.



Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se tiene puesto el sistema de producción de hidrógeno en su totalidad como se muestra en la figura 60 a continuación.

Figura 60.

Diseño producción de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

5. INGENIERÍA DEL PROYECTO

En este capítulo procederemos al desarrollo del cálculo térmico propio del motor y obtener los parámetros de eficiencia y consumo de combustible, de esta manera al suministrar el hidrógeno como complemento del combustible piloto y al conocer los aportes energéticos que realizan ambos combustibles y los porcentajes de participación que se obtendrán de forma experimental se busca reducir el consumo del combustible base sin afectar su desempeño y eficiencia.

Para tal fin se utilizará un vehículo de prueba de marca Honda Civic de 1992 cuyas especificaciones técnicas se detallan a continuación en la tabla 14:

Tabla 14.

Especificaciones técnicas del automóvil.

Marca	Honda
Modelo	Civic Ferio
Motor	En línea 4
Código del Motor	D13B
Principio de operación	Ciclo Otto de 4 tiempos
Alimentación	Carburado
Posición del motor	Delantero
Cilindrada	1343 cc
Cantidad de Cilindros	4
Diámetro x Carrera	75.0 x 76.0 mm
Válvulas	16
Índice de compresión	9.3:1
Potencia máxima	55kW / 6000 rpm
Combustible	Gasolina
Caja de velocidades	5 velocidades Manuales

Fuente: Carinf – Honda Civic (2021).

5.1. Cálculo Térmico del Motor Encendido por Chispa.

5.1.1. Cantidad de aire teórico para la combustión de 1 kg de combustible.

Se considera el contenido en masa de oxígeno en el aire aproximadamente del 23% el cual es la cantidad teórica para la combustión de 1kg de combustible. La composición química de la gasolina es $C = 0.855$ (Carbono), $H = 0.145$ (Hidrogeno), $O_c = 0$ (Oxígeno) (Jóvaj, 1982, pág. 62)

Cantidad de aire teórica “ I_0 ” en kg:

$$I_0 = \frac{1}{\% \text{ Masa de Oxígeno}} \cdot \left[\frac{8}{3} \cdot C + 8 \cdot H - O_c \right]$$

$$I_0 = \frac{1}{0.23} \cdot \left[\frac{8}{3} \cdot (0.855) + 8 \cdot (0.145) - 0 \right]$$

$$I_0 = 14.9565 \text{ kg de aire / kg de Combustible}$$

Cantidad de aire teórica “ L_0 ”, en kmol:

$$L_0 = \frac{I_0}{\mu_a}$$

La masa molecular aparente del aire es: $\mu_a = 28.96$:

$$L_0 = \frac{14.9565 \text{ kg de aire/kg de Combustible}}{28.96 \text{ kg de aire/kmol de aire}}$$

$$L_0 = 0.5165 \text{ kmol de aire / kg de Combustible}$$

5.1.2. Cantidad de aire real para la combustión de 1 kg de combustible.

La cantidad real de aire necesario para la combustión de 1kg de combustible considerando un coeficiente de exceso de aire $\alpha = 0.9$. (Jóvaj, 1982, pág. 50).

Cantidad de aire real “ I ” en kg:

$$I = (0.9) \cdot (14.9565)$$

$$I = 13.4609 \text{ kg de aire} / \text{kg de Combustible}$$

Cantidad de aire real “L”, en kmol:

$$L = \alpha \cdot L_0$$

$$L = (0.9) \cdot (0.5165)$$

$$L = 0.4648 \text{ kmol de aire} / \text{kg de Combustible}$$

5.1.3. Cantidad total de mezcla fresca.

La masa de la mezcla fresca “G₁” en kg:

$$G_1 = 1 + I$$

$$G_1 = 1 + 13.4609$$

$$G_1 = 14.4609 \text{ kg de aire} / \text{kg de Combustible}$$

La masa de la mezcla fresca “M₁” en kmol:

$$M_1 = L + \frac{1}{\mu_c}$$

Donde:

μ_c : Masa molecular media del combustible (C₈H₁₈)

Reemplazando los valores:

$$M_1 = 0.4648 + \frac{1}{114}$$

$$M_1 = 0.4736 \text{ kmol de aire} / \text{kg de Combustible}$$

5.1.4. Proceso de Admisión.

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) proporciona los siguientes valores para las propiedades del aire a una altura 2326 m.s.n.m (aproximadamente) de temperatura atmosférica (T₀) = 25°C (298 K) y presión atmosférica (P₀) = 0.1015 MPa.

Los parámetros de Presión y Temperatura en el Proceso de Admisión son:

5.1.4.1. Presión de Admisión.

$$P_a = P_0 - (\beta^2 + \xi_{ad}) \cdot \frac{\omega_{ad}^2}{2} \cdot \rho_0$$

Donde:

P_a : Presión al final de la Admisión (MPa).

P_0 : Presión Atmosférica (MPa).

β : Coeficiente de amortiguación de la velocidad de carga en la sección examinada del cilindro.

ξ_{ad} : Coeficiente de resistencia del sistema de admisión referida a su sección más estrecha.

ω_{ad} : Velocidad del aire en la entrada del sistema.

ρ_0 : Densidad del aire en la entrada del cilindro (kg/m^3).

Según los datos experimentales para los motores de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa, para la apertura completa de la válvula en el régimen nominal, la velocidad de movimiento de la carga en la sección de paso ω_{ad} oscila en valores que van de 50 a 130 m/s, así como la suma de $\beta^2 + \xi_{ad} = 2.5$ a 4 (Jóvaj, 1982, pág. 89).

Para los cálculos asumiremos los siguientes valores:

$$\omega_{ad} = 100 \text{ m/s} \quad \text{y} \quad \beta^2 + \xi_{ad} = 3.2$$

La densidad del aire en la entrada del cilindro se determina por la ecuación de estado de los gases ideales:

$$P \cdot V = R \cdot n \cdot T$$

Donde:

P: Presión atmosférica (MPa).

V: Volumen (m³).

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

n: Numero de Moles (mol).

T: Temperatura (K).

Por definición:

$$n = \frac{m}{M}$$

Donde:

n: Numero de Moles (mol).

m: Masa del aire (kg).

M: Masa molecular aparente del aire (kg de aire/kmol de aire).

Reemplazamos en la ecuación y obtenemos la siguiente expresión:

$$\rho_0 = \frac{P \cdot M}{R \cdot T_0}$$

Tenemos:

$$\rho_0 = \frac{(0.1015 \text{ MPa}) \cdot (28.96 \text{ kg de aire/kmol de aire})}{(8.314 \text{ J/mol. K}) \cdot (298 \text{ K})}$$

$$\rho_0 = 1.1864 \text{ kg/m}^3$$

Reemplazamos en la ecuación y obtenemos la siguiente expresión:

$$P_a = 0.1015 \text{ MPa} - (3.2) \cdot \frac{(100 \text{ m/s})^2}{2} \cdot (1.1864 \text{ kg/m}^3)$$

$$P_a = 0.0825 \text{ MPa}$$

5.1.4.2. Temperatura de Admisión (T_a).

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r}$$

Donde:

T_a : Temperatura al final de la Admisión (K).

T_0 : Temperatura de Atmosférica (K).

ΔT : Incremento de la temperatura de la carga fresca.

γ_r : Coeficiente de gases residuales.

T_r : Temperatura de los gases residuales (K).

Para el valor del coeficiente de los gases residuales tenemos:

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{P_r}{\varepsilon \cdot P_a - P_r}$$

Donde:

ε : Relación de compresión.

P_r : Presión de gases residuales (MPa).

Según los datos experimentales para los motores de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa, para el cálculo del coeficiente de gases residuales, la presión de los gases se da por la expresión $P_r = (1.1 \text{ a } 1.25) \cdot P_0$, la $T_r = 900$ a 1000K (Jóvaj, 1982, pág. 91) y el incremento de la temperatura de la carga fresca $\Delta T = 0$ a 20°C . (Jóvaj, 1982, pág. 92).

Para los cálculos asumiremos los siguientes valores:

$$P_r = (1.18) \cdot P_0 \text{ y } T_r = 950\text{K y } \Delta T = 18^\circ\text{C}$$

Reemplazamos en la ecuación y obtenemos la siguiente expresión:

$$\gamma_r = \frac{298K + 18}{950K} \cdot \frac{(1.18) \cdot (0.1015\text{MPa})}{(9.3) \cdot (0.0825 \text{MPa}) - (1.18) \cdot (0.1015\text{MPa})}$$

$$\gamma_r = 0.0615$$

Reemplazamos en la ecuación y obtenemos la siguiente expresión:

$$T_a = \frac{298K + 18 + (0.0615) \cdot 950K}{1 + 0.0615}$$

$$T_a = 353 \text{ K}$$

5.1.5. *Proceso de Compresión.*

Para determinar los parámetros de presión y temperatura en el proceso de compresión para los motores a gasolina se debe definir el exponente politrópico de compresión “ n_1 ” el cual varía entre 1.30 a 1.37 (Jóvaj, 1982, pág. 118). Para nuestro caso adoptaremos el valor de $n_1 = 1.35$, constante para todo el proceso.

5.1.5.1. **Presión de Compresión (P_c).**

$$P_c = P_a \cdot \varepsilon^{n_1}$$

Donde:

P_a : Presión al final de la admisión (MPa).

ε : Relación de compresión.

n_1 : Exponente politrópico de compresión.

Reemplazando:

$$P_c = 0.0825 \text{ MPa} \cdot (9.3^{1.35})$$

$$P_c = 1.6749 \text{ MPa}$$

5.1.5.2. **Temperatura de Compresión (T_c).**

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{n_1 - 1}$$

Donde:

T_a : Temperatura al final de la admisión (K).

ε : Relación de compresión.

n_1 : Exponente politrópico de compresión.

Reemplazando:

$$T_c = 353 \text{ K} \cdot (9.3^{1.35-1})$$

$$T_c = 770 \text{ K}$$

5.1.6. *Proceso de Combustión.*

La mezcla aire combustible dentro del cilindro del motor al saltar la chispa se produce la explosión de la mezcla, por ello se define la ecuación de la combustión a volumen constante.

$$\frac{\xi_z \cdot [H_u - (\Delta H_u)_{\text{quím}}]}{(1 + \gamma_r) \cdot M_1} + \frac{U_c + \gamma_r \cdot U_c''}{1 + \gamma_r} = \mu_r \cdot U_z''$$

Donde:

ξ_z : Coeficiente de aprovechamiento de calor.

H_u : Poder calorífico de la gasolina (kJ/kg).

$(\Delta H_u)_{\text{quím}}$: Poder calorífico inferior.

γ_r : Coeficiente de gases residuales.

M_1 : Cantidad total de aire real (kmol/kg).

U_c : Energía interna de carga fresca al final del proceso de compresión.

U_c'' : Energía interna de los productos de la combustión al final del proceso de compresión.

μ_r : Coeficiente real de variación molecular.

U_z'' : Energía interna de los productos de la combustión al final del proceso de combustión.

Para determinar los parámetros de presión y temperatura en el proceso de combustión debe calcularse la energía interna de los productos de la combustión al final del proceso de combustión “ U_z'' ”, para lo cual calcularemos cada término de la ecuación de la combustión.

- Cálculo del primer término de la ecuación de combustión, se obtiene:

$$\frac{\xi_z \cdot [H_u - (\Delta H_u)_{\text{quím}}]}{(1 + \gamma_r) \cdot M_1}$$

Definimos el valor del poder calorífico inferior:

$$(\Delta H_u)_{\text{quím}} = A \cdot (1 - \alpha) \cdot L_0$$

Donde:

$(\Delta H_u)_{\text{quím}}$: Poder calorífico inferior.

A: Valor adimensional que relaciona la composición química de la gasolina.

α : Coeficiente de exceso de aire.

L_0 : Cantidad de aire teórica (kmol).

Definimos el valor de A, en diferentes regímenes de funcionamiento del motor parte del carbono del combustible se oxida dando monóxido de carbono y parte del hidrogeno no reacciona con el oxígeno, este valor es constante y no depende del coeficiente de exceso de aire, se define como K el cual se obtiene:

$$\frac{M_{H_2}}{M_{CO}} = \frac{0.145}{0.855}$$

$$\frac{M_{H_2}}{M_{CO}} = 0.17$$

Según los datos experimentales para los motores de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa la relación H/C igual a 0.17 define a K igual a 0.5 (Jóvaj, 1982, pág. 54), entonces A es igual $114 \cdot 10^6$ J/kg (Jóvaj, 1982, pág. 63)

Reemplazando:

$$(\Delta H_u)_{\text{quím}} = 114 \cdot 10^6 \cdot (1 - 0.9) \cdot (0.5165)$$

$$(\Delta H_u)_{\text{quím}} = 5.8876 \text{ MJ/kg mol}$$

Según los datos experimentales para los motores de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa el coeficiente de aprovechamiento de calor (ξ_z) para este caso varía entre 0.85 a 0.90 (Jóvaj, 1982, pág. 157) tomaremos el valor de 0.87 y considerando el poder calorífico de la gasolina de 44.5 MJ/kg (Castillo Hernández & Mendoza Domínguez).

Reemplazamos en la ecuación y obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{\xi_z \cdot [H_u - (\Delta H_u)_{\text{quím}}]}{(1 + \gamma_r) \cdot M_1} = \frac{(0.87) \cdot (44.5 \text{ MJ/kg} - 5.8876 \text{ MJ/kg})}{(1 + 0.0615) \cdot (0.4736 \text{ kmol /kg})}$$

$$\frac{\xi_z \cdot [H_u - (\Delta H_u)_{\text{quím}}]}{(1 + \gamma_r) \cdot M_1} = 66.8230 \text{ MJ/kmol}$$

Cálculo del segundo término de la ecuación de combustión se obtiene:

$$\frac{U_c + \gamma_r \cdot U_c''}{1 + \gamma_r}$$

Se requiere encontrar el calor específico molar medio del aire (μC_v) a volumen constante, ingresando la temperatura $T_c = 770 \text{ K}$ (497°C), en la Tabla 15.

Tabla 15.

Calor específico molar medio de los gases a volumen constante ($\text{kJ /kmol. }^\circ\text{C}$).

T °C	Aire	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	CO	H ₂
0	20.758	20.959	20.704	27.545	25.184	20.808	20.302
100	20.838	21.223	20.733	29.797	25.426	20.863	20.62
200	20.984	21.616	20.8	31.744	25.803	20.988	20.758
300	21.206	22.085	20.972	33.44	26.26	21.202	20.808
400	21.474	22.563	21.185	34.935	26.775	21.474	20.871
500	21.78	23.019	21.449	36.258	27.315	21.784	20.934
600	22.09	23.446	21.729	37.438	27.88	22.11	21.001
700	22.408	23.834	22.027	38.498	28.474	22.437	21.093
800	22.718	24.187	22.32	39.448	29.077	22.755	21.202

900	23.006	24.51	22.609	40.302	29.693	23.061	21.332
1000	29.288	24.803	22.881	41.077	30.304	23.35	21.474

Fuente: Motores de automóvil de Jóvaj (1982, pág. 65)

De la tabla mostrada, realizamos interpolación dando el calor específico del aire (μC_V):

$$\mu C_V = 21.7705 \text{ kJ /kmol. } ^\circ\text{C}$$

Entonces la energía interna de carga fresca al final del proceso de compresión es:

$$U_c = \mu C_V \cdot T_c$$

$$U_c = (21.7705 \text{ kJ /kmol. } ^\circ\text{C}) \cdot (497^\circ\text{C})$$

$$U_c = 10.820 \text{ MJ/kmol}$$

Para el cálculo de la energía interna de los productos de la combustión al final del proceso de compresión resulta de sumar la multiplicación de los calores específicos de cada uno de los componentes de los productos de la combustión por sus fracciones volumétricas.

Composición de los productos de la combustión:

$$M_{CO} = (0.42) \cdot \frac{1 - \alpha}{1 + K} \cdot L_0 = (0.42) \cdot \frac{1 - 0.9}{1 + 0.5} \cdot (0.5165) = 0.0145 \text{ kmol}$$

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} - M_{CO} = \frac{0.855}{12} - 0.0145 = 0.0568 \text{ kmol}$$

$$M_{H_2} = K \cdot M_{CO} = (0.48) \cdot (0.0145) = 0.0072 \text{ kmol}$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} - M_{H_2} = \frac{0.145}{2} - 0.0072 = 0.0653 \text{ kmol}$$

$$M_{N_2} = (0.79) \cdot \alpha \cdot L_0 = (0.79) \cdot (0.9) \cdot (0.5165) = 0.3672 \text{ kmol}$$

Composición de los productos de la Combustión:

$$M_2 = M_{CO} + M_{O_2} + M_{H_2} + M_{H_2O} + M_{N_2}$$

$$M_2 = 0.0145 + 0.0568 + 0.0072 + 0.0653 + 0.3672$$

$$M_2 = 0.5109 \text{ kmol}$$

Fracción molar de los productos de la combustión:

$$r_{\text{MCO}} = \frac{0.0145}{0.5109} = 0.0283$$

$$r_{\text{MCO}_2} = \frac{0.0568}{0.5109} = 0.1111$$

$$r_{\text{MH}_2} = \frac{0.0072}{0.5109} = 0.0142$$

$$r_{\text{MH}_2\text{O}} = \frac{0.0653}{0.5109} = 0.1277$$

$$r_{\text{MN}_2} = \frac{0.3672}{0.5109} = 0.7187$$

Se requiere encontrar el calor específico molar medio de los productos de la combustión ($\mu C_v''$) ingresando con la temperatura la $T_c = 770 \text{ K}$ (497°C) en la tabla 15, lo cuales se expresan en la tabla 16 como se detalla:

Tabla 16.

Resultados obtenidos de la interpolación.

	N₂	CO₂	H₂O	CO	H₂
$\mu C_v''$	21.4407	35.2167	27.2982	21.7743	20.9320

Fuente: Elaboración Propia.

$$\mu C_{vT}'' = \sum r_n \cdot \mu C_{v_n}''$$

$$\mu C_{vT}'' = (r_{\text{MCO}} \cdot \mu C_{v\text{CO}}'') + (r_{\text{MCO}_2} \cdot \mu C_{v\text{CO}_2}'') + (r_{\text{MH}_2} \cdot \mu C_{v\text{H}_2}'') + (r_{\text{MH}_2\text{O}} \cdot \mu C_{v\text{H}_2\text{O}}'') + (r_{\text{MN}_2} \cdot \mu C_{v\text{N}_2}'')$$

$$\mu C_{vT}'' = (0.0283) \cdot (21.7743) + (0.1111) \cdot (35.2167) + (0.0142) \cdot (20.9320) + (0.1277) \cdot (27.2982) + (0.7187) \cdot (21.4407)$$

$$\mu C_{vT}'' = 23.8335 \text{ kJ/kmol. } ^\circ\text{C}$$

Entonces la energía interna de los productos de la combustión es:

$$U_c'' = \mu C_{vT}'' \cdot T_c$$

$$U_c'' = (23.8335 \text{ kJ/kmol} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (497^\circ\text{C})$$

$$U_c'' = 11.845 \text{ MJ/kmol}$$

Reemplazamos en el segundo término de la ecuación de combustión y se obtiene:

$$\frac{U_c + \gamma_r \cdot U_c''}{1 + \gamma_r} = \frac{10.820 \text{ MJ/kmol} + (0.0615) \cdot (11.845 \text{ MJ/kmol})}{1 + 0.0615}$$

$$\frac{U_c + \gamma_r \cdot U_c''}{1 + \gamma_r} = 10.8767 \text{ MJ/kmol}$$

- Cálculo del tercer término de la ecuación de combustión se obtiene:

$$\mu_r \cdot U_z''$$

La energía interna de los productos de la combustión al final del proceso de combustión (U_z'') es el valor por calcular, para ello se debe definir el coeficiente real de variación molecular dada la siguiente ecuación:

$$\mu_r = \frac{M_2 + \gamma_r \cdot M_1}{M_1 + (1 + \gamma_r)}$$

$$\mu_r = \frac{0.5109 + (0.0615) \cdot (0.4736)}{0.4736 + (1 + 0.0615)}$$

$$\mu_r = 1.0743$$

Reemplazamos en la ecuación de la combustión los valores calculados:

$$\frac{\xi_z \cdot [H_u - (\Delta H_u)_{\text{quím}}]}{(1 + \gamma_r) \cdot M_1} + \frac{U_c + \gamma_r \cdot U_c''}{1 + \gamma_r} = \mu_r \cdot U_z''$$

$$66.8230 \text{ MJ/kmol} + 10.8767 \text{ MJ/kmol} = (1.0743) \cdot U_z''$$

Despejamos:

$$U_z'' = 72.3237 \text{ MJ/kmol}$$

Se requiere encontrar la temperatura de la combustión a partir de la energía interna de los productos de la combustión, ingresando con el valor U_z'' en la tabla 17.

Tabla 17.

Energía interna de los productos de combustión U_z'' (MJ /Kmol).

T °C	Gasolina, siendo α igual a				Diesel $\alpha=1$
	1	0.9	0.8	0.7	
0	0	0	0	0	0
100	2.253	2.2045	2.1881	2.1685	2.252
200	4.5766	4.5352	4.4867	4.4285	4.58
300	6.3969	6.9165	6.8337	6.7344	6.992
400	9.4881	9.3842	9.2584	9.1123	9.483
500	12.074	11.9386	11.7688	11.5713	12.1
600	14.75	14.5759	14.359	14.1057	14.779
700	17.513	17.2989	17.0422	16.7202	17.585
800	20.309	20.0938	18.7753	19.4024	20.39
900	23.26	22.9688	22.587	22.151	23.237
1000	26.2262	25.88	25.4548	24.9534	26.293
1100	29.249	28.8569	28.3743	27.7968	29.308
1200	32.325	31.8871	31.3476	30.714	32.406
1300	35.443	34.9565	34.3598	33.6586	35.504
1400	38.601	38.0531	37.4129	36.6433	38.686
1500	41.676	41.1969	40.499	39.6603	41.868
1600	45.014	44.368	43.6125	42.7048	45.008
1700	48.268	47.5716	46.758	45.7802	48.358
1800	51.537	50.7924	49.9207	48.8732	51.498
1900	54.835	55.0398	53.1101	51.9929	54.931
2000	58.15	57.3052	56.3174	55.1298	58.197
2100	61.401	60.5947	59.5484	58.2851	61.546
2200	64.846	63.9001	62.7955	61.4671	64.979
2300	68.208	67.2127	66.0498	64.6528	68.287
2400	71.588	70.5432	69.3228	67.8557	71.594
2500	74.976	73.882	72.6038	71.0678	75.027

Fuente: Motores de automóvil de Jóvaj (1982, pág. 67).

De la tabla mostrada, ingresaremos con el valor calculado U_z'' y $\alpha = 0.9$ obtenemos el valor de la temperatura al final del proceso de combustión es $T_z = 2453^\circ\text{C}$, 2726 K.

Para los motores de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa, el proceso de la combustión se realiza a volumen constante, comenzando desde el final del proceso de compresión hasta el final del proceso de combustión, por tal motivo aplicaremos la Ley general de los gases ideales:

$$\frac{P_Z \cdot V_Z}{T_Z} = \frac{P_C \cdot V_C}{T_C}$$

Aplicamos la Ley de Gay Lussac, el proceso a volumen constante, multiplicamos la expresión por el factor de corrección coeficiente real de variación molecular “ μ_r ”, obtenemos:

$$P_Z = \mu_r \cdot \frac{T_Z}{T_C} \cdot P_C$$

Donde:

P_Z : Presión al final del proceso de la combustión.

P_C : Presión al final del proceso de la compresión.

T_Z : Temperatura al final del proceso de la combustión.

T_C : Temperatura al final del proceso de la compresión.

μ_r : Coeficiente real de variación molecular.

Reemplazamos:

$$P_Z = 1.0743 \cdot \frac{2726 \text{ K}}{770 \text{ K}} \cdot 1.6749 \text{ MPa}$$

$$P_Z = 6.3722 \text{ MPa}$$

Los valores reales de la presión máxima en los motores de gasolina se definen multiplicando el valor calculado “ P_Z ” por un coeficiente empírico de disminución de la presión “ φ_z ” para este caso se toma el valor de 0.85 (Jóvaj, 1982, pág. 157).

$$P_{zr} = \varphi_z \cdot P_Z$$

Reemplazando:

$$P_{zr} = (0.85) \cdot (6.3722 \text{ MPa})$$

$$P_{zr} = 5.4164 \text{ MPa}$$

5.1.7. *Proceso de Expansión.*

Para determinar los parámetros de presión y temperatura en el proceso de expansión para los motores a gasolina se debe definir el exponente politrópico de expansión “ n_2 ” el cual varía entre 1.23 a 1.30 (Jóvaj, 1982, pág. 161). Para nuestro caso adoptaremos el valor de $n_2 = 1.25$, considerando constante para todo el proceso.

5.1.7.1. **Presión de Expansión (P_b).**

$$P_b = \frac{P_{zr}}{\varepsilon^{n_2}}$$

Donde:

P_{zr} : Presión al final del escape (MPa).

ε : Relación de compresión.

n_2 : Exponente politrópico de expansión.

Reemplazando:

$$P_b = \frac{5.4164 \text{ MPa}}{9.3^{1.25}}$$

$$P_b = 0.3335 \text{ MPa}$$

5.1.7.2. **Temperatura de Expansión (T_b).**

$$T_b = \frac{T_z}{\varepsilon^{n_2-1}}$$

Donde:

T_b : Temperatura al final de la expansión (K).

ε : Relación de compresión.

n_2 : Exponente politrópico de expansión.

Reemplazando:

$$T_b = \frac{2726 \text{ K}}{9,3^{1,25-1}}$$

$$T_b = 1561 \text{ K}$$

5.1.8. Índices del Ciclo de Trabajo.

5.1.8.1. Presión Media Indicada del Ciclo.

Esta presión hace referencia al suministra el calor a volumen constante para los motores a gasolina, se define según la ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 169):

$$P_{inr} = P_a \cdot \frac{\varepsilon^{n_1}}{\varepsilon - 1} \left[\frac{\lambda}{n_2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right]$$

Donde:

P_a : Presión al final de la admisión (MPa).

ε : Relación de compresión.

n_1 : Exponente politrópico de compresión.

n_2 : Exponente politrópico de expansión.

λ : Grado de elevación de la presión al suministrar el calor en el proceso a volumen constante.

Definimos el valor λ :

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c}$$

Donde:

PZ: Presión al final del proceso de la combustión.

PC: Presión al final del proceso de la compresión.

Reemplazamos:

$$\lambda = \frac{6.3722}{1.6749}$$

$$\lambda = 3.8045$$

Reemplazamos en la ecuación:

$$P_{inr} = 0.0825 \cdot \frac{9.3^{1.35}}{9.3 - 1} \left[\frac{3.8045}{1.25 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{9.3^{1.25-1}} \right) - \frac{1}{1.35 - 1} \cdot \left(1 - \frac{1}{9.3^{1.35-1}} \right) \right]$$

$$P_{inr} = 1.0000 \text{ MPa}$$

La presión media indicada real del ciclo “ P_i ”, tomando en cuenta el coeficiente de redondeamiento del diagrama “ φ_i ” según los datos experimentales para los motores de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa para este caso varía entre 0.92 a 0.97 (Jóvaj, 1982, pág. 170) tomaremos el valor superior de 0.97 para el cálculo:

$$P_i = \varphi_i \cdot P_{inr}$$

Reemplazo:

$$P_i = (0.97) \cdot (1.000 \text{ Mpa})$$

$$P_i = 0.97 \text{ Mpa}$$

5.1.8.2. Presión de Pérdidas Mecánicas.

Esta presión es la fracción de pérdidas que se gasta en vencer la fricción y accionar los mecanismos auxiliares propios del motor, se define según la ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 211):

$$P_m = A + B \cdot V_p$$

Donde:

P_m : Perdidas Mecánicas (MPa).

A y B: Coeficientes adimensionales.

V_p : Velocidad del Pistón (m/s).

Según los datos experimentales para los motores de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa, para los valores de A y B son 0.04 y 0.0135 respectivamente (Jóvaj, 1982, pág. 212).

Velocidad del pistón

$$V_p = \frac{2 \cdot S \cdot n}{60}$$

Donde:

S: Carrera del pistón (m)

n: Revoluciones del motor (RPM)

Reemplazando:

$$V_p = \frac{2 \cdot (0.076) \cdot 6000}{60}$$

$$V_p = 15 \text{ m/s}$$

Reemplazando en la ecuación de Perdidas Mecánicas (MPa):

$$P_m = A + B \cdot V_p$$

$$P_m = 0.04 + (0.0135) \cdot (15)$$

$$P_m = 0.2425 \text{ MPa}$$

5.1.8.3. Presión Media Efectiva.

Se define según la siguiente ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 176):

$$P_e = P_i - P_m$$

$$P_e = 0.97 \text{ MPa} - 0.2425 \text{ MPa}$$

$$P_e = 0.7275 \text{ MPa}$$

5.1.8.4. Eficiencia Mecánica.

Se define según la siguiente ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 177):

$$n_m = \frac{P_e}{P_i}$$

$$n_m = \frac{0.7275}{0.97}$$

$$n_m = 75\%$$

5.1.8.5. Eficiencia Volumétrica.

Se define según la siguiente ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 96):

$$n_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \left[\varepsilon \cdot \frac{P_a}{P_0} - \frac{P_r}{P_0} \right]$$

$$n_v = \frac{298}{298 + 18} \cdot \frac{1}{9.3 - 1} \left[(9.3) \cdot \frac{0.0825}{0.1015} - \frac{(1.18) \cdot (0.1015)}{0.1015} \right]$$

$$n_v = 72\%$$

5.1.8.6. Consumo Especifico Indicado de Combustible.

Se define según la siguiente ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 174):

$$g_i = 3600 \cdot \frac{n_v \cdot \rho_0}{P_i \cdot \alpha \cdot l_0}$$

$$g_i = 3600 \cdot \frac{(0.72) \cdot (1.1864 \text{ kg/m}^3)}{(0.97 \text{ MPa}) \cdot (0.9) \cdot (14.9565 \text{ kg de aire/kg de combustible})}$$

$$g_i = 237 \frac{\text{g}}{\text{kW} \cdot \text{hr}}$$

5.1.8.7. Consumo Especifico Efectivo de Combustible.

Se define según la siguiente ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 177):

$$g_e = \frac{g_i}{n_m}$$

$$g_e = \frac{237 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}}{0.75}$$

$$g_e = 317 \frac{\text{g}}{\text{kW} \cdot \text{hr}}$$

5.1.8.8. Rendimiento indicado del ciclo.

El rendimiento indicado del ciclo cuando g_i se expresa en $\text{g/kW} \cdot \text{hr}$ y el H_u en MJ/kg de acuerdo con la ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 174):

$$n_i = \frac{3600}{g_i \cdot H_u}$$

$$n_i = \frac{3600}{(235 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}) \cdot (44.5 \text{ MJ/kg})}$$

$$n_i = 34\%$$

5.1.8.9. Rendimiento efectivo del ciclo.

Se define según la siguiente ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 178):

$$n_e = n_i \cdot n_m$$

$$n_e = (0.75) \cdot (0.34)$$

$$n_e = 25\%$$

5.1.8.10. Consumo de combustible.

Se define según la siguiente ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 172):

$$\text{Consumo} = g_e \cdot N_e \cdot 10^{-3}$$

$$\dot{m}_c = (317 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}) \cdot 55 \text{ kW} \cdot 10^{-3}$$

$$\dot{m}_c = 17 \text{ kg/hr}$$

5.1.9. Resultados.

A continuación, se muestra los principales valores obtenidos para el motor de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa dados en la tabla 18.

Tabla 18.

Resultados del motor a gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa.

A	RPM	g_i $\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	g_e $\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	n_i %	n_m %	n_e %	\dot{m}_c $\left(\frac{kg}{hr}\right)$
0.9	6000	237	317	34	75	25	17

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Cálculo Térmico del Motor Encendido por Chispa usando hidrógeno como complemento del combustible.

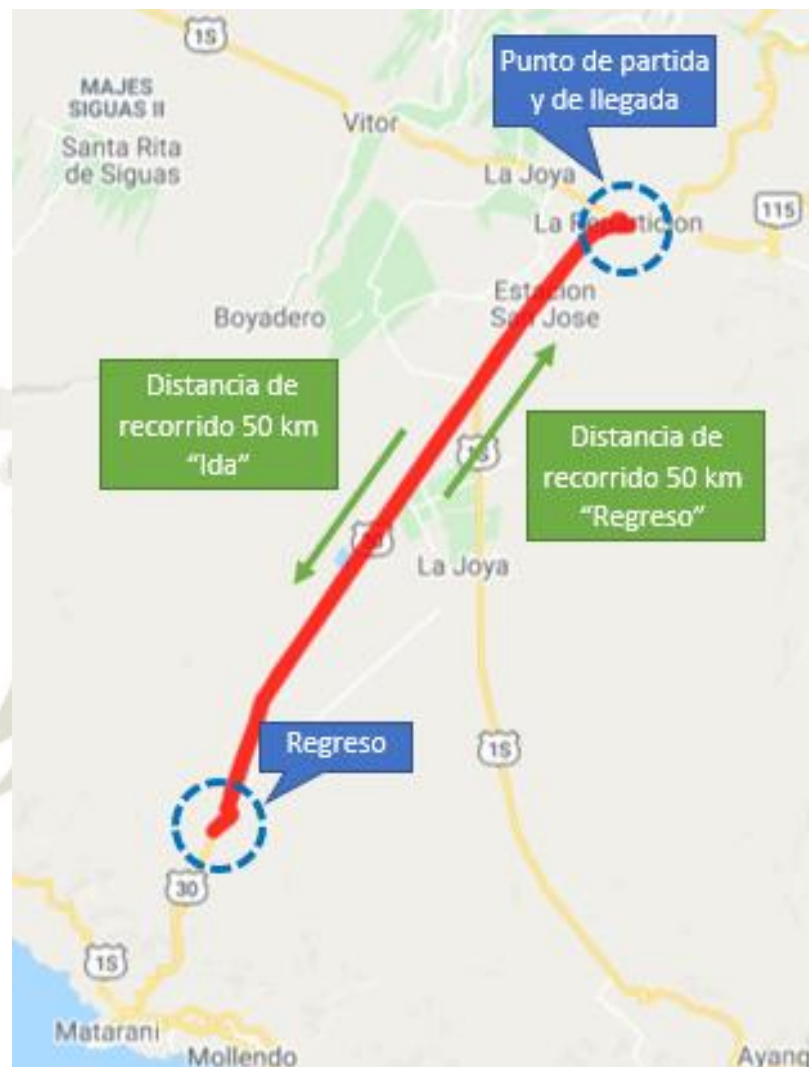
Aquí procederemos al desarrollo del cálculo térmico del motor de encendido por chispa utilizando el hidrógeno como complemento de la gasolina, el fin es conseguir una reducción al consumo del combustible piloto cuando ambos combustibles ingresan de forma simultánea al motor sin afectar su desempeño y eficiencia.

Obtenida la estrategia de utilización del hidrógeno desarrollado en capítulos anteriores conoceremos los porcentajes y los niveles de participación de la gasolina e hidrógeno de forma experimental obtenida de los ensayos, tomando en consideración las revoluciones del motor, de esta manera podremos conocer los aportes energéticos que realizan ambos combustibles.

Para obtener estos valores se realizaron dos viajes que comprenden una distancia de 100km cada uno, el primer viaje la medición del consumo de combustible fue solo con alimentación de gasolina (90 octanos) y para el segundo viaje se utilizó el hidrógeno de forma simultánea con el combustible piloto. Como se muestra en la figura 61 se efectuó las pruebas en la carretera panamericana sur tomando como punto de partida el grifo Petro América ubicado en la Asociación Progreso 48 Zona 2 del departamento de Arequipa.

Figura 61.

Carretera panamericana sur Asociación Progreso 48 Zona 2 Arequipa.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 62 nos muestra los puntos de partida y llegada los cuales fueron desde el grifo Petro América para el reabastecimiento del tanque de combustible, dichos valores del consumo de combustible se encuentran registrados en los baucherés de pago para el abastecimiento de gasolina, así como también se registra la distancia de recorrido, tiempo de prueba y revoluciones del motor los cuales serán de utilidad para los cálculos correspondientes de eficiencias y consumos para ambas pruebas.

Figura 62.

Pruebas realizadas en el grifo Petro América, Asociación Progreso 48 Zona 2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 63.

Distancia de recorrido 100km.



Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la figura 63 se realizó un recorrido para los primeros 50km en un viaje de ida y se dio vuelta cumplido esta distancia para recorrer los 50km restantes y regresar al grifo Petro América para su reabastecimiento de combustible, de esta manera tenemos nuestra distancia de 100 km registrando los valores antes descritos para ambas pruebas.

5.2.1. Índices del Ciclo de Trabajo para la Prueba N°1 utilizando Gasolina.

Para el cálculo de los índices de trabajo utilizando solo gasolina para la prueba N°1 tomaremos los datos registrados en la tabla 19, así como también las ecuaciones de la bibliografía citada anteriormente para el cálculo de los principales parámetros del ciclo en el motor de gasolina encendido por chispa.

Tabla 19.

Valores obtenidos en las prueba N°1.

Datos	Unidad	Prueba N° 1
Consumo de gasolina	gal	2.0221
Tiempo de recorrido	hr	1.22
Revoluciones del motor	RPM	3000
Distancia recorrida	km	101.6

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.1.1. Presión de pérdidas mecánicas.

Como se indicó anteriormente este parámetro se ve influenciado por la variación en las revoluciones del motor, por tanto, ingresaremos el nuevo valor registrado durante el desarrollo de la prueba utilizando gasolina en la siguiente ecuación:

$$P_{m'} = A + B \cdot V_p$$

Donde:

$P_{m'}$: Presión de pérdidas Mecánicas de prueba utilizando gasolina (MPa).

A y B: Coeficientes adimensionales.

V_p : Velocidad del Pistón (m/s).

- **Velocidad del pistón.**

La velocidad del pistón se obtendrá en base a las revoluciones del motor, estas mediciones fueron registradas durante el desarrollo de la prueba tomando los valores del tablero del vehículo, el tacómetro quien registra las revoluciones del motor y del velocímetro cuyo valor no se excedió a la velocidad promedio de 100 km/hr dado por el ministerio de transportes, se ingresa los valores registrados en la tabla 19.

$$V_p = \frac{2 \cdot S \cdot n}{60}$$

Donde:

S : Carrera del pistón (m).

n : Revoluciones del motor (RPM).

Reemplazamos los valores:

$$V_p = \frac{2 \cdot (0.076) \cdot 3000}{60}$$

$$V_p = 7.6 \text{ m/s}$$

Para los parámetros de A y B utilizaremos los mismos valores indicados anteriormente de 0.04 y 0.0135 respectivamente.

Reemplazamos los valores:

$$P_{m'} = 0.04 + (0.0135) \cdot (7.6)$$

$$P_{m'} = 0.1426 \text{ MPa}$$

5.2.1.2. Eficiencia Mecánica.

Según los datos experimentales para los motores de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa, a medida que disminuye la carga la presión media indicada del ciclo

(P_i) se reduce, por tanto, el trabajo indicado se gasta en accionar los mecanismos propios del motor, en este caso se relaciona la presión por pérdidas mecánicas calculada para el ensayo y la de diseño (Jóvaj, 1982, pág. 171), obteniendo la siguiente ecuación:

$$\eta_m = \frac{P_{m'}}{P_m}$$

Donde:

η_m : Eficiencia mecánica.

$P_{m'}$: Pérdidas mecánicas de prueba (MPa).

P_m : Pérdidas mecánicas de diseño (MPa).

Reemplazamos los valores:

$$\eta_m = \frac{0.1426}{0.2425}$$

$$\eta_m = 58\%$$

5.2.1.3. Consumo Específico Efectivo de Combustible.

Se define según la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{gasolina} = g_e \cdot N_e$$

Donde:

$\dot{m}_{gasolina}$: Consumo de Gasolina (kg/hr).

g_e : Consumo Específico Efectivo (g/kW – hr).

N_e : Potencia Efectiva (kW).

Para definir el flujo de masa de combustible en la ecuación del consumo específico efectivo debemos tener en cuenta las principales propiedades de la gasolina, los cuales son su poder calorífico (H_U) que es 44.5 MJ/kg y densidad de 720 Kg/m³ a 20°C (Castillo Hernández

& Mendoza Domínguez), de la tabla 8 extraemos el valor del consumo de combustible realiza en la prueba N°1.

$$v = 2.0221 \text{ gal}$$

Se requiere expresar el consumo en flujo de masa el consumo de combustible (kg/hr), entonces:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

ρ = Densidad del combustible (kg/m³).

m = Masa del combustible (kg).

v = Volumen del combustible (m³).

Reemplazando en la ecuación:

$$m = \rho \cdot v$$

$$m = 720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2.0221 \text{ gal} \cdot \frac{3.785 \text{ L}}{1 \text{ gal}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}$$

$$m = 5.5106 \text{ kg}$$

El tiempo de duración de la prueba fue:

$$t = 1.22 \text{ hr}$$

Entonces el flujo de combustible es:

$$\dot{m}_{\text{gasolina}} = \frac{5.5106 \text{ kg}}{1.22 \text{ hr}}$$

$$\dot{m}_{\text{gasolina}} = 4.5169 \text{ Kg/hr}$$

Para el segundo término de la ecuación es necesario el cálculo de la potencia efectiva dado que se realizan pruebas de desempeño en el motor con revoluciones que están por debajo

a la de diseño, es necesario calcular nuevos parámetros de potencias para obtener los nuevos índices de eficiencias y consumos, los cuales se detalla a continuación:

- **Potencia de Indicada.**

La potencia indica para “i” cilindros, se define según la siguiente ecuación

(Jóvaj, 1982, pág. 171).

$$N_i = \frac{2}{\tau} \cdot P_i \cdot i \cdot V_h \cdot n$$

Donde:

N_i : Potencia indicada (kW).

P_i : Presión media indicada (P_a).

V_h : Volumen de trabajo del cilindro (m^3).

i : Numero de cilindros.

n : Frecuencia de rotación del cigüeñal (RPS).

Para el cálculo del volumen de cilindro unitaria (V_h), se tiene la siguiente expresión:

$$V_h = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot S$$

Reemplazamos los valores:

$$V_h = \frac{\pi}{4} \cdot (0.075^2) \cdot (0.076)$$

$$V_h = 3.3576 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Reemplazamos en la ecuación:

$$N_i = \frac{2}{4} \cdot (0.97 \cdot 10^6 \text{ Pa}) \cdot (4) \cdot (3.3576 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3) \cdot \left(\frac{3000}{60}\right) \cdot 10^3$$

$$N_i = 32.57 \text{ kW}$$

- **Potencia de Perdidas Mecánicas.**

La potencia de perdidas mecánicas para “i” cilindros, se define según la siguiente ecuación (Jóvaj, 1982, pág. 171).

$$N_m = \frac{2}{\tau} \cdot P_m \cdot i \cdot V_h \cdot n$$

Donde:

N_m : Potencia perdidas mecánicas (kW).

P_m : Presión perdidas mecánicas (P_a).

V_h : Volumen de trabajo del cilindro (m^3).

i : Numero de cilindros.

n : Frecuencia de rotación del cigüeñal (RPS).

Reemplazamos los valores:

$$N_m = \frac{2}{4} \cdot (0.1426 \cdot 10^6 \text{ Pa}) \cdot (4) \cdot (3.3576 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3) \cdot \left(\frac{3000}{60}\right) \cdot 10^3$$

$$N_m = 4.79 \text{ kW}$$

- **Potencia Efectiva.**

La potencia efectiva, según la expresión (Jóvaj, 1982, pág. 176).

$$N_e = N_i - N_m$$

$$N_e = 32.57 \text{ kW} - 4.79 \text{ kW}$$

$$N_e = 27.78 \text{ kW}$$

De esta manera obtenemos el consumo específico efectivo, reemplazamos en la ecuación:

$$g_e = \frac{\dot{m}_{gasolina}}{N_e}$$

$$g_e = \frac{4.5169 \text{ kg/hr}}{27.78 \text{ kW}}$$

$$g_e = 163 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}$$

5.2.1.4. Consumo Especifico Indicado de Combustible.

$$n_m = \frac{g_e}{g_i}$$

Donde:

n_m : Eficiencia mecánica.

g_e : Consumo Especifico Efectivo (g/kW – hr).

g_i : Consumo Especifico Indicado (g/kW – hr).

Reemplazando los valores:

$$g_i = \frac{163 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}}{0.58}$$

$$g_i = 280 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}$$

5.2.1.5. Rendimiento Indicado del ciclo.

$$n_i = \frac{3600}{g_i \cdot H_u}$$

Donde:

n_i : Rendimiento Indicado del ciclo.

g_i : Consumo Especifico Indicado (g/kW – hr).

H_u : Poder calorífico del combustible (MJ/kg).

Reemplazando los valores:

$$n_i = \frac{3600}{(280 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}) \cdot (44.5 \text{ MJ/kg})}$$

$$n_i = 29\%$$

5.2.1.6. Rendimiento Efectivo del ciclo.

$$n_e = n_i \cdot n_m$$

$$n_e = (0.58) \cdot (0.29)$$

$$n_e = 16\%$$

5.2.1.7. Resultados.

A continuación, se muestra los principales valores obtenidos para el motor de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa dados en la tabla 20.

Tabla 20.

Resultados de los parámetros de operación del motor a gasolina prueba N°1.

α	RPM	g_i $\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	g_e $\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	n_m %	n_i %	n_e %	\dot{m}_c $\left(\frac{kg}{hr}\right)$
0.9	3000	280	163	58	29	16	4.5169

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Índices del Ciclo de Trabajo para la Prueba N°2 utilizando el hidrógeno como complemento del combustible.

En esta prueba es donde se utilizará el sistema de generación de hidrógeno propuesto en el motor, el cual se utiliza como complemento del combustible piloto, ya definida la estrategia de generación y suministro de este combustible renovable y de combustión limpia, se pone en marcha su uso para un funcionamiento continuo, las condiciones de operación serán con los mismos parámetros de la prueba N°1 registrando los valores para su trazabilidad, los cuales se muestra en la tabla 21 a continuación.

Tabla 21.

Valores obtenidos en la prueba N°1 y 2.

Datos	Unidad	Prueba N° 1	Prueba N° 2
Consumo de gasolina	gal	2.0221	1.1949
Tiempo de recorrido	hr	1.22	1.32
Revoluciones del motor	RPM	3000	2500
Distancia recorrida	km	101.6	100.2

Fuente: Elaboración Propia.

Tal como se muestra en la tabla 21, observamos una reducción en el consumo de gasolina cuando se suministra hidrógeno durante el funcionamiento del motor en la prueba N°2, este valor se obtuvo al reabastecer de combustible en el grifo Petro América al culminar la prueba, de esta manera experimental podemos extraer los porcentajes de participación de ambos combustibles los cuales se detallan a continuación.

$$H_2 = 1 - \frac{\text{Consumo Gasolina}_{\text{prueba 2}}}{\text{Consumo Gasolina}_{\text{prueba 1}}} (\%)$$

Reemplazamos los valores:

$$H_2 = \left[1 - \frac{1.1949}{2.0221} \right] \cdot 100\%$$

$$H_2 = 40\%$$

Como se puede observar obtenemos un porcentaje de sustitución del combustible base (gasolina) del 40% por hidrógeno, teniendo predominancia la gasolina como combustible piloto con una participación del 60%. Dado este último porcentaje se desprende que no es posible dejar de prescindir del consumo de la gasolina para satisfacer la demanda del motor y mantener en movimiento el vehículo, sino que podemos sustituirlo de forma parcial en tanto se nos permita.

En esta prueba suministrando hidrógeno para el funcionamiento del motor se observó una clara reducción de las revoluciones del motor en comparación con la prueba N°1, según datos

registrados en la Tabla 10 de 3000 RPM durante el manejo del vehículo realizada en la prueba N°1 se redujo a 2500 RPM el giro del motor en la prueba N°2, dicho valor fue observado en el tacómetro del tablero al desplazarnos a la misma velocidad de 100 km/hr (promedio) para ambas pruebas.

Esta reducción en las revoluciones del motor se dio al percibir la misma capacidad de empuje para alcanzar la velocidad deseada, por tanto, caso se fue dejando de presionar el acelerador de forma progresiva hasta alcanzar un valor final de 2500 RPM (aproximadamente) para el giro del motor cumpliendo con los mismos lineamientos realizados en la prueba N°1 sin afectar el desempeño del vehículo.

Estas diferencias en las revoluciones del motor se ven reflejado en el consumo de combustible al reabastecer el tanque del vehículo, según los valores registrados se pudo establecer una utilización de la gasolina que está en beneficio del consumidor al comprobar que es posible reducir el consumo energético de este combustible convencional no renovable.

Para establecer la sustitución de la gasolina por el hidrógeno, debemos encontrar una equivalencia que represente un conjunto comparable de unidades, ya que se demostró experimentalmente la reducción del consumo de gasolina al utilizar hidrógeno para el funcionamiento del motor, por ello se requiere hallar un factor de conversión que relacione sus densidades energéticas, por tanto, la densidad energética del hidrógeno es de 120 MJ/kg (Muñiz Sánchez) y de la gasolina es de 44.5 MJ/kg con una densidad de 720 kg/m³ a 20°C (Castillo Hernández & Mendoza Domínguez).

De esta manera relacionaremos las densidades energéticas como se detalla a continuación:

- Factor de conversión (fdc):

$$\text{fdc} = \frac{\text{MJ/kg Hidrógeno}}{\text{MJ/ kg Gasolina}}$$

Reemplazamos los valores y obtenemos:

$$f_{dc} = \frac{120 \text{ MJ/kg Hidrógeno}}{44.5 \text{ MJ/kg Gasolina}} = 2.7 \text{ kg Gasolina/kg H}_2$$

Podemos observar que 2.7 kilogramos de Gasolina son equivalentes a 1 kilogramos de Hidrógeno.

De igual manera para el cálculo de los índices de trabajo para el motor encendido por chispa con el uso del hidrógeno como complemento usaremos los datos obtenidos en la experimentación, así como las ecuaciones de la bibliografía citada anteriormente para el cálculo de los principales parámetros del ciclo en el motor.

5.2.2.1. Presión de pérdidas mecánicas.

Ingresaremos el nuevo valor registrado durante el desarrollo de la prueba utilizando hidrógeno mostrada en la tabla 20 en la siguiente ecuación.

$$P_{m'} = A + B \cdot V_p$$

Donde:

$P_{m'}$: Presión de perdidas Mecánicas de prueba utilizando hidrógeno (MPa).

A y B: Coeficientes adimensionales.

V_p : Velocidad del Pistón (m/s).

- **Velocidad del pistón.**

Se ingresa el valor registrado en la tabla 10, en la siguiente ecuación.

$$V_p = \frac{2 \cdot S \cdot n}{60}$$

Donde:

S: Carrera del pistón (m).

n: Revoluciones del motor (RPM).

Reemplazamos los valores:

$$V_p = \frac{2 \cdot (0.076) \cdot 2500}{60}$$

$$V_p = 6.3 \text{ m/s}$$

Reemplazamos los valores:

$$P_{m'} = A + B \cdot V_p$$

$$P_{m'} = 0.04 + (0.0135) \cdot (6.3)$$

$$P_{m'} = 0.1255 \text{ MPa}$$

5.2.2.2. Eficiencia Mecánica.

Tomaremos el mismo criterio realizado para la prueba con gasolina, obteniendo la siguiente expresión:

$$n_m = \frac{P_{m'}}{P_m}$$

Donde:

n_m : Eficiencia mecánica.

$P_{m'}$: Perdidas Mecánicas de prueba (MPa).

P_m : Perdidas Mecánicas (MPa).

Reemplazamos los valores:

$$n_m = \frac{0.1255}{0.2425}$$

$$n_m = 52\%$$

5.2.2.3. Consumo Especifico Efectivo de combustible utilizando gasolina e hidrógeno.

Para este cálculo debemos expresar los valores de ambos combustibles de forma individual ya que durante la experimentación hubo diferencia en el consumo de gasolina.

- **Consumo Especifico Efectivo de la gasolina.**

Se define según la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{gasolina} = g_e \cdot N_e$$

Donde:

$\dot{m}_{gasolina}$: Consumo de Gasolina (kg/hr).

g_e : Consumo Especifico Efectivo (g/kW – hr).

N_e : Potencia Efectiva (kW).

De igual manera definimos el flujo de masa de combustible considerando las principales propiedades de la gasolina, poder calorífico (H_u) de 44.5 MJ/kg y densidad de 720 kg/m³ a 20°C (Castillo Hernández & Mendoza Domínguez), extraemos el valor de consumo de combustible de la tabla 10 realiza en la prueba N°2.

$$v = 1.1949 \text{ gal}$$

Se requiere expresar el consumo en flujo de masa el consumo de combustible (kg/hr), entonces:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

ρ = Densidad del combustible (kg/m³).

m = Masa del combustible (kg).

v = Volumen del combustible (m³).

Reemplazando en la ecuación:

$$m = \rho \cdot v$$

$$m = 720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1.1949 \text{ gal} \cdot \frac{3.785 \text{ L}}{1 \text{ gal}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}$$

$$m = 3.2563 \text{ kg}$$

El tiempo de duración de la prueba fue:

$$t = 1.32 \text{ hr}$$

Entonces el flujo de combustible es:

$$\dot{m}_{gasolina} = \frac{3.2563 \text{ kg}}{1.32 \text{ hr}}$$

$$\dot{m}_{gasolina} = 2.4669 \text{ kg/hr}$$

Reemplazando en la ecuación:

$$g_e = \frac{\dot{m}_{gasolina}}{N_e}$$

$$g_e = \frac{2.4669 \text{ kg/hr}}{27.78 \text{ kW}}$$

$$g_e = 89 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}$$

- **Consumo Especifico Efectivo del hidrógeno.**

Se define según la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{H_2} = g_e \cdot N_e$$

Donde:

\dot{m}_{H_2} : Consumo de Hidrógeno (kg/hr).

g_e : Consumo Especifico Efectivo de hidrógeno (g/kW – hr).

N_e : Potencia Efectiva (kW).

Para obtener el consumo específico efectivo del hidrógeno debemos utilizar el factor de conversión antes calculado para encontrar la equivalencia de sustitución de la gasolina por el hidrógeno.

$$fdc = 2.7 \frac{\text{kg Gasolina}}{\text{kg H}_2}$$

Calcularemos el volumen desplazado por el hidrógeno, estos valores de consumo para la prueba N°2 se encuentra en la tabla 21.

$$v_{Desplazado} = v_{Prueba_1} - v_{Prueba_2}$$

$$v_{Desplazado} = 2.0221 \text{ gal} - 1.1949 \text{ gal}$$

$$v_{Desplazado} = 0.8272 \text{ gal}$$

Se requiere obtener el consumo del combustible en kg/hr entonces:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

ρ = Densidad del combustible (kg/m^3).

m = Masa del combustible (kg).

v = Volumen del combustible (m^3).

Reemplazando en la ecuación:

$$m_{v_{desplazado}} = \rho \cdot v$$

$$m_{v_{desplazado}} = 0.8272 \text{ gal} \cdot 720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{3.785 \text{ L}}{1 \text{ gal}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}$$

$$m_{v_{desplazado}} = 2.2543 \text{ kg}_{\text{gasolina}}$$

Expresamos en su equivalente de hidrogeno:

$$m_{\text{H}_2} = \left[\frac{2.2543 \text{ kg}_{\text{gasolina}}}{2.7 \text{ kg}_{\text{gasolina}}} \right] \cdot 1 \text{ kg H}_2$$

$$m_{\text{H}_2} = 0.8360 \text{ kg H}_2$$

El tiempo de duración de la prueba fue:

$$t = 1.32 \text{ hr}$$

Entonces:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{0.8360 \text{ kg}}{1.32 \text{ hr}}$$

$$\dot{m}_{H_2} = 0.6334 \text{ kg/hr}$$

Reemplazando en la ecuación:

$$g_e = \frac{\dot{m}_{H_2}}{N_e}$$

$$g_e = \frac{0.6334 \text{ kg/hr}}{27.78 \text{ kW}}$$

$$g_e = 23 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}$$

5.2.2.4. Consumo Especifico Indicado de combustible utilizando gasolina e hidrógeno.

- **Consumo Especifico Indicado de la gasolina.**

Se define según la siguiente ecuación:

$$n_m = \frac{g_e}{g_i}$$

Donde:

n_m : Eficiencia mecánica.

g_e : Consumo Especifico Efectivo (g/kW – hr).

g_i : Consumo Especifico Indicado (g/kW – hr).

Reemplazando en la ecuación:

$$g_i = \frac{89 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}}{0.52}$$

$$g_i = 171 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}$$

- **Consumo Especifico Indicado del hidrógeno.**

Se define según la siguiente ecuación:

$$n_m = \frac{g_e}{g_i}$$

Donde:

n_m : Eficiencia mecánica.

g_e : Consumo Especifico Efectivo de hidrógeno (g/kW – hr).

g_i : Consumo Especifico Indicado de hidrógeno (g/kW – hr).

Reemplazando en la ecuación:

$$g_i = \frac{23 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}}{0.52}$$

$$g_i = 44 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}$$

5.2.2.5. Rendimiento Indicado del Ciclo utilizando gasolina e hidrógeno.

El rendimiento indicado del ciclo los obtenemos de la siguiente ecuación:

$$n_i = \frac{3600}{(g_i \cdot H_u)_{\text{Gasolina}} + (g_i \cdot H_u)_{\text{H}_2}}$$

Donde:

n_i : Rendimiento Indicado del ciclo utilizando gasolina e hidrógeno.

g_i : Consumo Especifico Indicado (g/kW – hr).

H_u : Poder calorífico del combustible (MJ/kg).

Reemplazando en la expresión:

$$n_i = \frac{3600}{(171 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}) \cdot (44.5 \text{ MJ/kg}) + (44 \text{ g/kW} \cdot \text{hr}) \cdot (120 \text{ MJ/kg})}$$

$$n_i = 28\%$$

5.2.2.6. Rendimiento Efectivo del Ciclo utilizando gasolina e hidrógeno.

$$n_e = n_i \cdot n_m$$

$$n_e = (0.28) \cdot (0.52)$$

$$n_e = 15\%$$

5.2.2.7. Resultados.

A continuación, se muestra los principales valores obtenidos para el motor de gasolina de cuatro tiempos encendidos por chispa utilizando el hidrógeno como complemento de la gasolina (combustible piloto) registrados en la tabla 22.

Tabla 22.

Resultados de los parámetros de operación del motor a gasolina prueba N°2.

α	RPM	Gasolina			Uso del Hidrógeno			n_m	n_i	n_e
		g_i	g_e	\dot{m}_c	g_i	g_e	\dot{m}_c			
		$\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	$\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	$\left(\frac{kg}{hr}\right)$	$\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	$\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	$\left(\frac{kg}{hr}\right)$			
0.9	2500	171	89	2.4669	44	23	0.6333	52	28	15

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Ensayos utilizando el hidrógeno como complemento.

Para consolidar la reducción al consumo de gasolina utilizado el hidrógeno, se realizaron más pruebas que demuestren de forma experimental el ahorro del combustible piloto y obtener un porcentaje de participación promedio para ambos combustibles sin afectar el desempeño y eficiencia del motor para el desplazamiento del vehículo.

Estas pruebas se realizaron dentro y en los alrededores de la ciudad de Arequipa siguiendo la misma metodología que la prueba ya mencionada, considerando una ruta establecida cuya distancia fue de 100km registrando los valores de interés para los cálculos térmicos respectivos.

El número total de pruebas adicionales fueron 7, a los cuales siguiente la metodología ya establecida se realizaron 2 ensayos por cada prueba registrando en cada una la medición al consumo de combustible en un grifo designado para cada prueba con la finalidad de reabastecer el

tanque de combustible al culminar cada ensayo. A continuación, en la tabla 23 se muestra el registro de los valores para todas las pruebas realizadas.

Tabla 23.

Valores obtenidos en las pruebas de gasolina vs. hidrógeno.

Prueba Nro.	Ensayo con Gasolina				Ensayo con Hidrógeno como complemento			
	Consumo de Combustible	Tiempo de Recorrido	Revoluciones del Motor	Distancia Recorrida	Consumo de Combustible	Tiempo de Recorrido	Revoluciones del Motor	Distancia Recorrida
	(gal)	(hr)	(RPM)	(km)	(gal)	(hr)	(RPM)	(km)
Prueba N° 1	2.0221	01:22	3000	101.6	1.1949	01:32	2500	100.2
Prueba N° 2	2.741	03:15	2500	115.7	1.7817	03:31	2200	115.9
Prueba N° 3	2.572	03:10	2500	101.4	1.6718	03:09	2200	101.4
Prueba N° 4	2.742	02:30	2500	100.2	1.773	02:31	2200	100.2
Prueba N° 5	2.308	03:30	2100	96.8	1.495	03:50	1800	96.8
Prueba N° 6	2.631	04:40	2100	101.6	1.761	04:21	1800	101.6
Prueba N° 7	2.725	05:00	2100	101.2	1.801	05:20	1800	101.2
Prueba N° 8	2.977	05:50	2100	101.4	2.02	05:50	1800	104

Fuente: Elaboración propia.

Para las pruebas 2, 3 y 4 indicadas en la tabla 23 se realizaron los ensayos en los alrededores de la ciudad de Arequipa y para las pruebas 5, 6, 7 y 8 dentro de la ciudad, tomando como punto de partida y llegada el grifo designado recorriendo los primeros 50km en un viaje de ida y los 50km restantes de regresó para el abastecimiento de combustible, también se puede observar en dicha tabla el grado de reducción de las revoluciones del motor para todas las pruebas realizadas esto reflejo una reducción a consumo de combustible. A continuación, se muestran los porcentajes de utilización de ambos combustibles en la tabla 24.

Tabla 24.

Porcentaje de participación de ambos combustibles.

Prueba Nro.	Ensayo con Gasolina		Ensayo con Hidrógeno	
	Consumo de Combustible (gal)	Porcentaje de participación (%)	Consumo de Combustible (gal)	Porcentaje de participación (%)
Prueba N° 1	2.0221	60%	1.1949	40%
Prueba N° 2	2.741	65%	1.7817	35%
Prueba N° 3	2.572	65%	1.6718	35%
Prueba N° 4	2.742	64%	1.773	36%
Prueba N° 5	2.308	64%	1.495	36%
Prueba N° 6	2.631	66%	1.761	34%
Prueba N° 7	2.725	66%	1.801	34%
Prueba N° 8	2.977	67%	2.02	33%

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 24 los porcentajes de sustitución del combustible base (gasolina) presentan una tendencia del 35% por hidrógeno frente al 65% de utilización de la gasolina como combustible piloto. Este grado de sustentación por hidrógeno es menor al obtenido en la prueba n°1 debido a que las condiciones de manejo a partir de las pruebas 5, 6, 7 y 8 dentro de la ciudad generaron restricciones en la operación de manejo del vehículo (tráfico, etc.), estos porcentajes obtenidos de forma experimental se desprende que no es posible dejar de prescindir del consumo de gasolina para satisfacer la demanda del motor.

A continuación, en la tabla 25 se muestra los resultados del consumo específico, consumo horario de combustible y rendimientos de ciclo al igual que la tabla 26 para todos los ensayos realizados con la utilización solo de gasolina e hidrógeno para cada prueba respectivamente y en la tabla 27 el rendimiento del combustible utilizando el sistema de hidrógeno.

Tabla 25.

Resultados de los cálculos utilizando solo gasolina.

Prueba Nro.	RPM	g_i	g_e	n_m	n_i	n_e	\dot{m}_c
		$\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	$\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	(%)	(%)	(%)	$\left(\frac{kg}{hr}\right)$
Prueba N° 1	3000	280	163	58	29	16	4.5169
Prueba N° 2	2500	197	100	51	41	20	2.3714
Prueba N° 3	2500	188	96	51	43	21	2.2610
Prueba N° 4	2500	270	137	51	30	15	3.2489
Prueba N° 5	2100	210	94	45	38	17	1.9060
Prueba N° 6	2100	180	81	45	45	20	1.6295
Prueba N° 7	2100	164	74	45	49	22	1.4852
Prueba N° 8	2100	163	73	45	49	22	1.4751

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26.

Resultados de los cálculos, gasolina vs. sistema de hidrógeno.

Prueba Nro.	RPM	Gasolina			Hidrógeno			n_m	n_i	n_e
		g_i	g_e	\dot{m}_c	g_i	g_e	\dot{m}_c			
		$\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	$\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	$\left(\frac{kg}{hr}\right)$	$\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	$\left(\frac{g}{kW \cdot hr}\right)$	$\left(\frac{kg}{hr}\right)$	(%)	(%)	(%)
Prueba N° 1	2500	171	89	2.4669	44	23	0.6333	52	28	15
Prueba N° 2	2200	132	62	1.4669	26	12	0.2929	47	40	19
Prueba N° 3	2200	133	62	1.4744	27	12	0.2944	47	40	19
Prueba N° 4	2200	188	89	2.0917	38	18	0.4239	47	28	14
Prueba N° 5	1800	137	58	1.1640	28	12	0.2347	42	39	17
Prueba N° 6	1800	135	57	1.1399	25	10	0.2088	42	41	18
Prueba N° 7	1800	111	47	0.9439	21	9	0.1796	42	48	21
Prueba N° 8	1800	118	50	1.0009	21	9	0.1758	42	47	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27.

Rendimiento del combustible utilizando el sistema de hidrógeno.

Prueba Nro.	Ensayo con consumo de gasolina			Ensayo con consumo de hidrógeno		
	Ensayo con Gasolina	Distancia Recorrida	Rendimiento	Ensayo con Hidrógeno	Distancia Recorrida	Rendimiento
	(gal)	(km)	(km/gal)	(gal)	(km)	(km/gal)
Prueba N° 1	2.0221	101.6	50	1.1949	100.2	84
Prueba N° 2	2.741	115.7	42	1.7817	115.9	65
Prueba N° 3	2.572	101.4	39	1.6718	101.4	61
Prueba N° 4	2.742	100.2	37	1.773	100.2	57
Prueba N° 5	2.308	96.8	42	1.495	96.8	65
Prueba N° 6	2.631	101.6	39	1.761	101.6	58
Prueba N° 7	2.725	101.2	37	1.801	101.2	56
Prueba N° 8	2.977	101.4	34	2.02	104	51

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Comparación de resultados.

Realizada las pruebas adicionales para comprobar y consolidar la reducción al consumo de combustible “gasolina” utilizado “hidrógeno”, procederemos a comparar los resultandos de mayor trascendencia que nos permita identificar los valores que estén acorde a este proyecto de investigación.

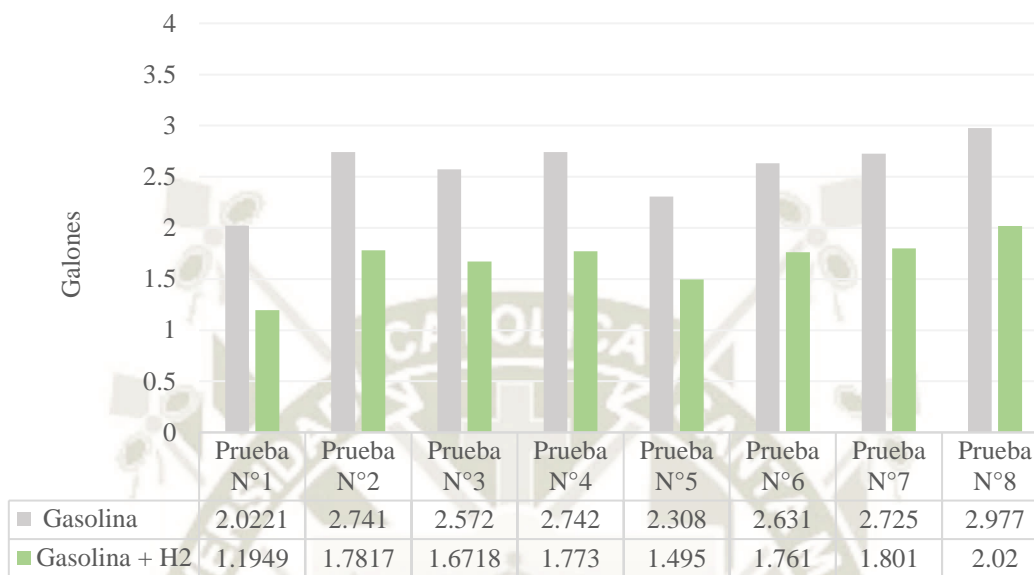
Con los datos obtenidos en la tabla 23, podemos graficar los consumos de combustible para ambos ensayos en cada prueba realizada, tal como se muestra en la figura 64.

Con los datos obtenidos en la tabla 26 podemos graficar el consumo específico efectivo del combustible ($\text{g/kW} \cdot \text{hr}$) tal como se muestra en la figura 65, así como también el consumo horario del combustible (kg/hr) mostrado en la figura 66, y la eficiencia de ambos ciclos en la figura 67.

Con los datos obtenidos en la tabla 27 podemos graficar el rendimiento del combustible (km/gal) para ambos ensayos en las diferentes pruebas, tal como se muestra en la figura 68.

Figura 64.

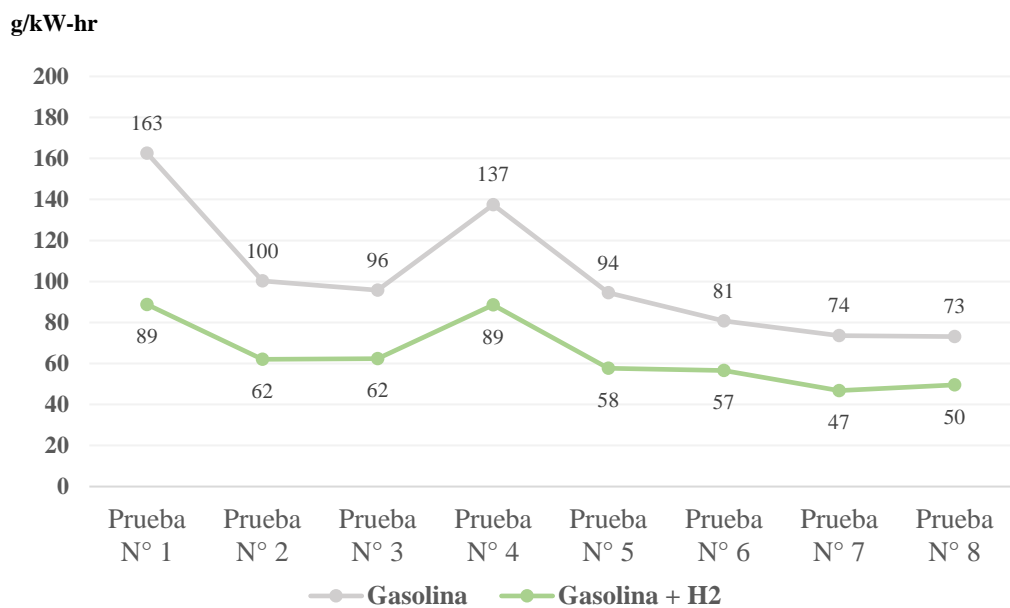
Consumo de gasolina vs sistema de hidrogeno.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 65.

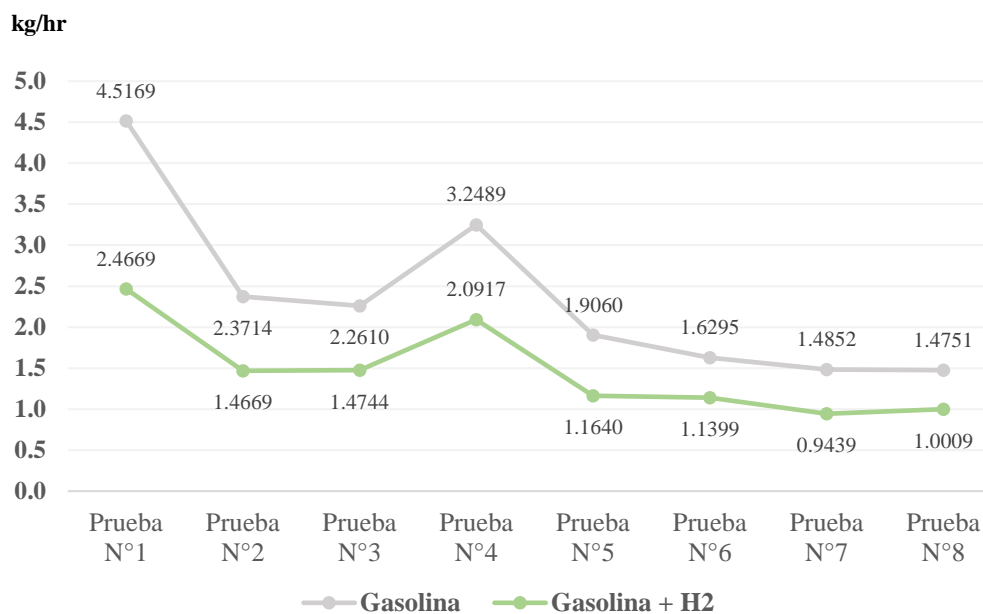
Consumo de especifico efectivo, gasolina vs. sistema de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 66.

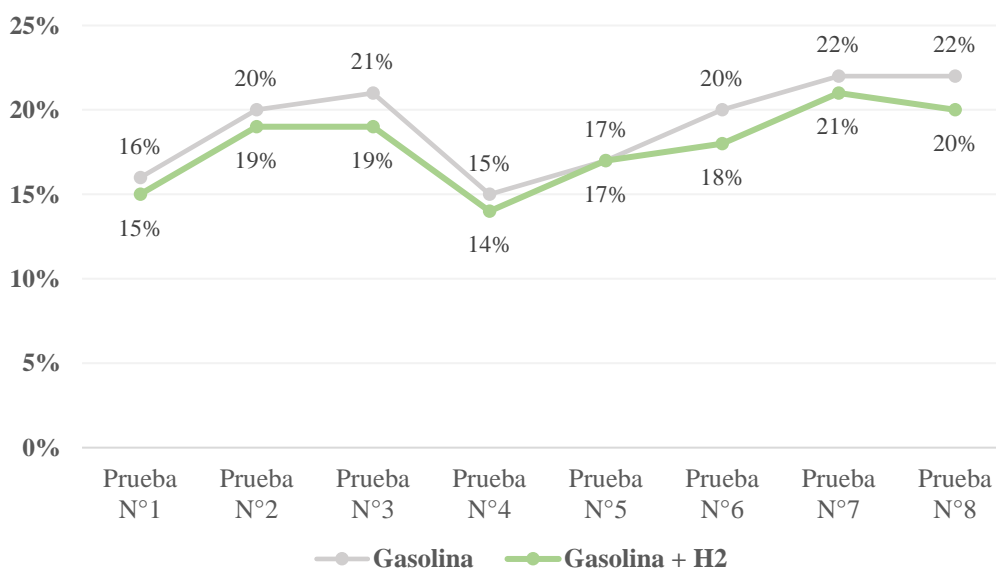
Consumo horario de combustible, gasolina vs. sistema de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 67.

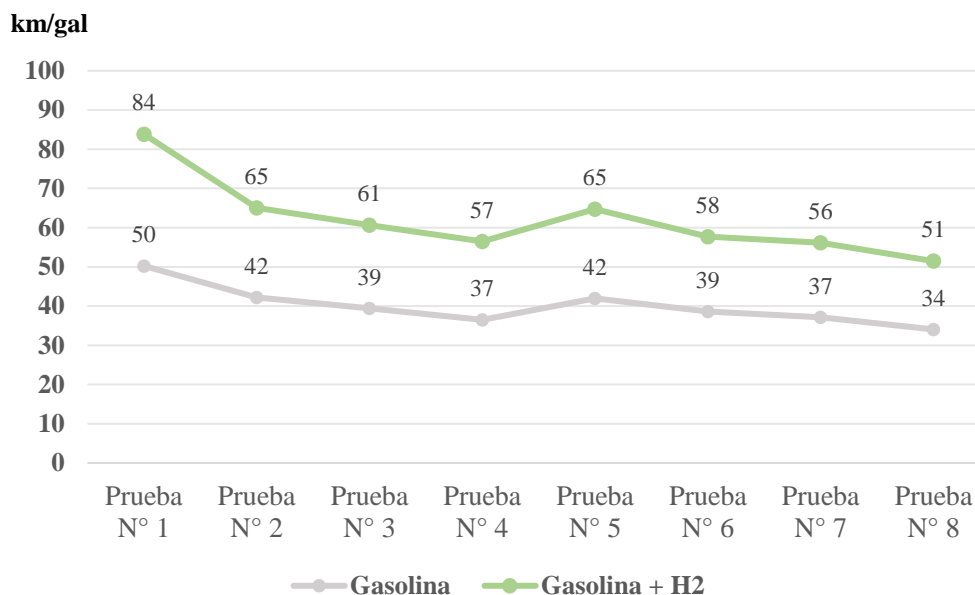
Eficiencia efectiva del ciclo, gasolina vs. sistema de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 68.

Rendimiento del combustible, gasolina vs. sistema de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

5.5. Costo beneficio de la implementación del sistema de hidrógeno.

La implementación del sistema propuestos de generación de hidrógeno, así como se muestra en la tabla 23 se comprueba de forma experimental que es posible obtener una reducción al consumo de gasolina utilizando el hidrógeno como complemento para el funcionamiento del motor en cualquiera de las condiciones de operación del vehículo, esta reducción se ve reflejado en un notable ahorro en los costos de adquisición del combustible convencional sin afectar el rendimiento del vehículo y los índices de eficiencias del motor.

A continuación, en la tabla 28 se muestra el consumo de gasolina utilizado para ambas pruebas, ya conocida la metodología para los ensayos en dicha tabla se muestra el ahorro del combustible convencional y el porcentaje de ahorro que este representa y en la tabla 29 se muestra el ahorro en los costos por cada reabasteciendo del combustible al culminar cada ensayo.

Tabla 28.

Consumo y ahorro del combustible utilizando el sistema de hidrógeno.

Prueba Nro.	Consumo de Combustible			Sustitución (%)
	Ensayo con Gasolina	Ensayo con Hidrógeno	Ahorro de Combustible	
	(gal)	(gal)	(gal)	
Prueba N° 1	2.0221	1.1949	0.8272	40%
Prueba N° 2	2.741	1.7817	0.9594	35%
Prueba N° 3	2.572	1.6718	0.9002	35%
Prueba N° 4	2.742	1.773	0.9690	36%
Prueba N° 5	2.308	1.495	0.8130	36%
Prueba N° 6	2.631	1.761	0.8700	34%
Prueba N° 7	2.725	1.801	0.9240	34%
Prueba N° 8	2.977	2.02	0.9570	33%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29.

Costos del consumo de combustible, gasolina vs. sistema de hidrógeno.

Prueba Nro.	Costo de Gasolina (S/. /gal)	Consumo de Combustible		Costos de Utilización		
		Ensayo con Gasolina (gal)	Ensayo con Hidrógeno (gal)	Ensayo con Gasolina (S/.)	Ensayo con Hidrógeno (S/.)	Ahorro (S/.)
		Prueba N° 1	10.88	2.0221	1.1949	22.00
Prueba N° 2	13.9	2.741	1.7817	38.10	24.76	13.33
Prueba N° 3	14.19	2.572	1.6718	36.50	23.72	12.77
Prueba N° 4	14.95	2.742	1.773	40.99	26.51	14.49
Prueba N° 5	14.95	2.308	1.495	34.50	22.35	12.15
Prueba N° 6	15.05	2.631	1.761	39.60	26.50	13.09
Prueba N° 7	15.05	2.725	1.801	41.01	27.11	13.91
Prueba N° 8	15.05	2.977	2.02	44.80	30.40	14.40

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 29 se puede observar que el costo de la gasolina por galón ha incrementado su costo en el periodo 2020 – 2021 (periodo de Setiembre a Agosto respectivamente) en un 27.71% y esta tendencia al alza sigue en aumento, en la figura 69 se muestra los costos del consumo de combustible “gasolina” por cada ensayo realizada en todas las pruebas.

Figura 69.

Diferencias de costo al consumo de combustible, gasolina vs. sistema de hidrógeno.



Fuente: Elaboración propia.

Según los datos obtenidos en la tabla 29 y representado el costo de utilización de la gasolina en la figura 69 para las pruebas realizadas al suministrar el hidrogeno en el motor Honda D13B encendido por chispa se obtiene un porcentaje de ahorro promedio al costo de adquisición para el suministro de gasolina del vehículo de prueba del 35%.

5.5.1. Consumo de agua.

El consumo de agua durante las pruebas realizadas para los ensayos con la utilización del hidrógeno como complemento del combustible piloto es de importancia saber su rendimiento para un consumo continuo y un funcionamiento diario y prolongado para el abastecimiento de los generadores de hidrógeno del sistema propuesto.

Este rendimiento al consumo de agua lo expresaremos en “cm³/hr” es decir, los litros de suministro de agua a los generadores de hidrógeno para la producción de ambos gases hidrógeno y oxígeno dividido por las horas de funcionamiento del sistema que está ligado a las horas de funcionamiento del motor durante la conducción del vehículo de prueba.

Como se mencionó anteriormente el tanque o depósito de agua es de un capacidad de 1L (capacidad para propósitos experimentales) entonces, para conocer la autonomía de la cantidad de agua puesta en el depósito tomaremos el tiempo para la producción de hidrógeno del segundo ensayo al realizar la prueba N°1 cuya duración fue de 1:32hr cuyos valores se obtuvieron de forma experimental puestos en la tabla 23, con este valor podemos calcular el tiempo (hr) de duración que nos permita el consumo del depósito de agua hasta llegar al mínimo y finalmente poderlo expresar en “días” asumiendo una jornada laboral de 8 hr/día, según lo redactado se detalla a continuación en la tabla 30.

Tabla 30.

Consumo de agua durante la utilización del sistema de hidrógeno.

Volumen del tanque de agua (V _T) cm ³	Volumen consumido (V _C) cm ³	Veces que puede ser utilizado (V _T /V _C)	Consumo total del tanque de agua hr	Autonomía del tanque de agua (8 hr/día) Días
1000	25.35	39	52	7

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 30 se obtuvo un consumo de 25.35cm³ para un tiempo de 1.32hr de funcionamiento de los generadores de hidrogeno, el cual nos da una autonomía del tanque de agua de 7 días para llegar al mínimo de dicho tanque. A continuación, en la tabla 31 se muestra los valores para la autonomía del tanque y consumo del agua en los ensayos realizados utilizando el hidrógeno en las distintas pruebas.

Tabla 31.

Rendimiento del tanque de agua durante la utilización del sistema de hidrógeno.

Prueba Nro.	Volumen tanque cm ³	Volumen consumido cm ³	Tiempo de duración hr	Consumo total del tanque hr	Autonomía del tanque Días	Consumo del agua cm ³ /hr
Prueba N° 1	1000	25.35	01:32	52	7	19
Prueba N° 2	1000	59.15	03:31	56	7	18
Prueba N° 3	1000	59.15	03:09	52	7	19
Prueba N° 4	1000	42.25	02:31	55	7	18
Prueba N° 5	1000	67.60	03:50	52	6	19
Prueba N° 6	1000	76.05	04:21	55	7	18
Prueba N° 7	1000	92.95	05:20	56	7	18
Prueba N° 8	1000	101.40	05:50	54	7	18

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 31 podemos observar que se tiene una tendencia de 7 días para la autonomía del tanque y un consumo del agua de 19 cm³/hr para un funcionamiento continuo de los generadores lo que refleja un notable rendimiento de la gasolina en beneficio de nuestra economía.

5.6. Reducción de emisiones contaminantes.

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos que se derivada del petróleo y que comúnmente se utiliza en motores de combustión interna para su funcionamiento, este hidrocarburo que se

utiliza como combustible presenta en su estructura base el carbono e hidrógeno al cual se le suma aditivos que nos permita el correcto funcionamiento del motor y que este acorde con el medio ambiente al momento de emitir los gases producto de la combustión al aire.

Los productos secundarios que genera la combustión de este combustible fósil son gases tóxicos que se emiten hacia la atmósfera expulsados a través de la tubería de escape en los vehículos, para el caso de los motores de encendido por chispa los gases de combustión están compuestos principalmente por el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no combustionados (HC) y material particulado (PM).

5.6.1. Emisiones contaminantes del motor encendido por chispa.

De acuerdo con los indicado los gases producto de la combustión de mayor preocupación para los motores de encendido por chispa son:

- **Dióxido de carbono (CO_2):** Las emisiones del dióxido de carbono en los gases de escape de un motor de combustión interna se da por una combustión completa del combustible, no es considerado en su totalidad como un gas tóxico (dependiendo de sus concentraciones en el aire) ya que este gas de forma natural pertenece y está presente en la atmósfera terrestre permitiendo que la temperatura de la tierra sea la adecuada para la vida, pero la producción y acumulación de este gas de forma artificial por la actividad humana forma parte de los gases de efecto invernadero y ocasionando lo que se conoce como el calentamiento global.
- **Monóxido de carbono (CO):** Las emisiones del monóxido de carbono en los gases de escape de un motor de combustión interna es principalmente por una combustión incompleta del combustible, este gas venenoso de fácil propagación en el aire es de perjuicio para la salud de los seres humanos al ser inhalado, ya que reduce el aporte de oxígeno que requiere los órganos y tejidos del cuerpo humano esto por un deficiente

intercambio de gases realizado en los pulmones al combinarse la hemoglobina de la sangre con este gas e impidiendo que el oxígeno llegue a los órganos vitales.

- **Hidrocarburos no combustionados (HC):** Las emisiones y presencia de hidrocarburos en los gases de escape es en su mayoría por una combustión incompleta del combustible, esto debido a que parte del combustible no se llega a mezclar en su totalidad con el oxígeno del aire no participando en el proceso de la combustión siendo evacuado durante el tiempo de escape (para motores de 4 tiempos), estas condiciones de operación en su mayoría se dan en motores que utilizan carburador para el suministro del combustible “gasolina”.
- **Material particulado (PM):** Las emisiones del material particulado (PM) provienen de la combustión incompleta del combustible y de la quema del aceite lubricante en la cámara de combustión los cuales se presentan en forma de pequeñas gotas al salir por e múltiple de admisión. Estas emisiones se forman en su mayoría por las bajas temperaturas de la combustión, por falta de aire para el proceso de la combustión (mezclas ricas) o por impurezas del combustible al ser suministrado a la cámara de combustión. Actualmente se busca el equilibrio de la producción de estas emisiones de material particulado al incrementar la temperatura de operación del proceso de combustión evitando la presencia de los óxidos de nitrógeno (NO_x) en valores que no excedan de $2.5\mu\text{m} - 10\mu\text{m}$.

5.6.2. *Reducción de emisiones contaminantes utilizando el sistema de hidrógeno.*

La utilización del sistema de producción de hidrógeno al suministrarse con la gasolina como complemento para el consumo y funcionamiento del motor encendido por chispa permite la reducción de emisiones contaminantes, implementar este sistema traería beneficios para mitigar la contaminación del medio ambiente al estimar una reducción significativa los gases antes mencionados al sustituir el combustible convencional “gasolina” por este combustible renovable.

Calcularemos la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no combustionados (HC) y material particulado (PM) aplicando la sustitución parcial del hidrógeno, el cual lo expresaremos en kg/km para cada prueba utilizando gasolina e hidrogeno según se el ensayo, según la publicación realizada por Andrew Simons (2013) “Transporte por carretera: nuevos inventarios del ciclo de vida de los combustibles fósiles turismos y emisiones que no son de escape en Ecoinvent v3”, nos muestra los valores de emisión para estos gases, como se muestra a continuación en la tabla 32:

Tabla 32.
Emisiones de gases contenientes utilizando gasolina.

Combustible	CO_2	CO	HC	PM
	(kg/km)	(kg/km)	(kg/km)	>2.5 y <10um (kg/km)
Gasolina	3.18	9.84 ·E-04	5.86 ·E-05	1.355 ·E-05

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar los cálculos de las emisiones de gases de CO_2 , CO, HC y PM para el motor Honda D13B encendido por chispa utilizaremos los valores de consumo de combustible “gasolina” obtenidos en la experimentación los cuales se expresan en la tabla 33, realizando las respectivas conversiones expresamos el consumo en “kg/km”.

Así mismo en la tabla 34 se muestra los datos obtenidos de hacer los cálculos para la obtención de gases contaminantes, los cuales para CO_2 lo expresamos en kg/km y para el resto de los gases en g/km.

Tabla 33.

Consumo de gasolina vs. sistema de hidrógeno.

Prueba Nro.	Sistema Convencional		Usando Hidrógeno	
	Gal	kg/km	Gal	kg/km
Prueba N° 1	2.0221	5.5106	1.1949	3.2563
Prueba N° 2	2.741	7.4698	1.7817	4.8554
Prueba N° 3	2.572	7.0092	1.6718	4.5560
Prueba N° 4	2.742	7.4725	1.773	4.8318
Prueba N° 5	2.308	6.2898	1.495	4.0742
Prueba N° 6	2.631	7.1700	1.761	4.7991
Prueba N° 7	2.725	7.4262	1.801	4.9081
Prueba N° 8	2.977	8.1129	2.02	5.5049

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34.

Emisión de gases contaminantes gasolina vs. sistema de hidrógeno.

Prueba Nro.	Sistema Convencional				Usando Hidrógeno			
	CO ₂ (kg/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	PM (g/km)	CO ₂ (kg/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	PM (g/km)
Prueba N° 1	17.52	5.42	0.3229	0.0747	10.36	3.20	0.1908	0.0441
Prueba N° 2	23.75	7.35	0.4377	0.1012	15.44	4.78	0.2845	0.0658
Prueba N° 3	22.29	6.90	0.4107	0.0950	14.49	4.48	0.2670	0.0617
Prueba N° 4	23.76	7.35	0.4379	0.1013	15.37	4.75	0.2831	0.0655
Prueba N° 5	20.00	6.19	0.3686	0.0852	12.96	4.01	0.2387	0.0552
Prueba N° 6	22.80	7.06	0.4202	0.0972	15.26	4.72	0.2812	0.0650
Prueba N° 7	23.62	7.31	0.4352	0.1006	15.61	4.83	0.2876	0.0665
Prueba N° 8	25.80	7.98	0.4754	0.1099	17.51	5.42	0.3226	0.0746

Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar en la tabla 34 es notable la reducción de los gases contaminantes para el CO₂, CO, HC y PM al utilizar el sistema de hidrógeno, para tal caso, promediaremos los

valeres obtenidos para un mejor entendimiento puesto en la tabla 35, el cual hace referencia a la producción de gases contaminantes para un recorrido de 100km aproximadamente.

Tabla 35.

Reducción de gases contaminantes gasolina vs. sistema de hidrógeno.

Sistema Convencional				Usando Hidrógeno			
CO ₂	CO	HC	PM	CO ₂	CO	HC	PM
(kg/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)	(kg/km)	(g/km)	(g/km)	(g/km)
22.44	6.94	0.41	0.10	14.62	4.52	0.27	0.06

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, calcularemos el porcentaje reducción de emisiones para el CO₂, CO, HC y PM, según datos obtenidos en la tabla anteriormente el cual lo podemos apreciar en la tabla 36 y procederemos a su grafica según los valores obtenidos en la figura 70.

Tabla 36.

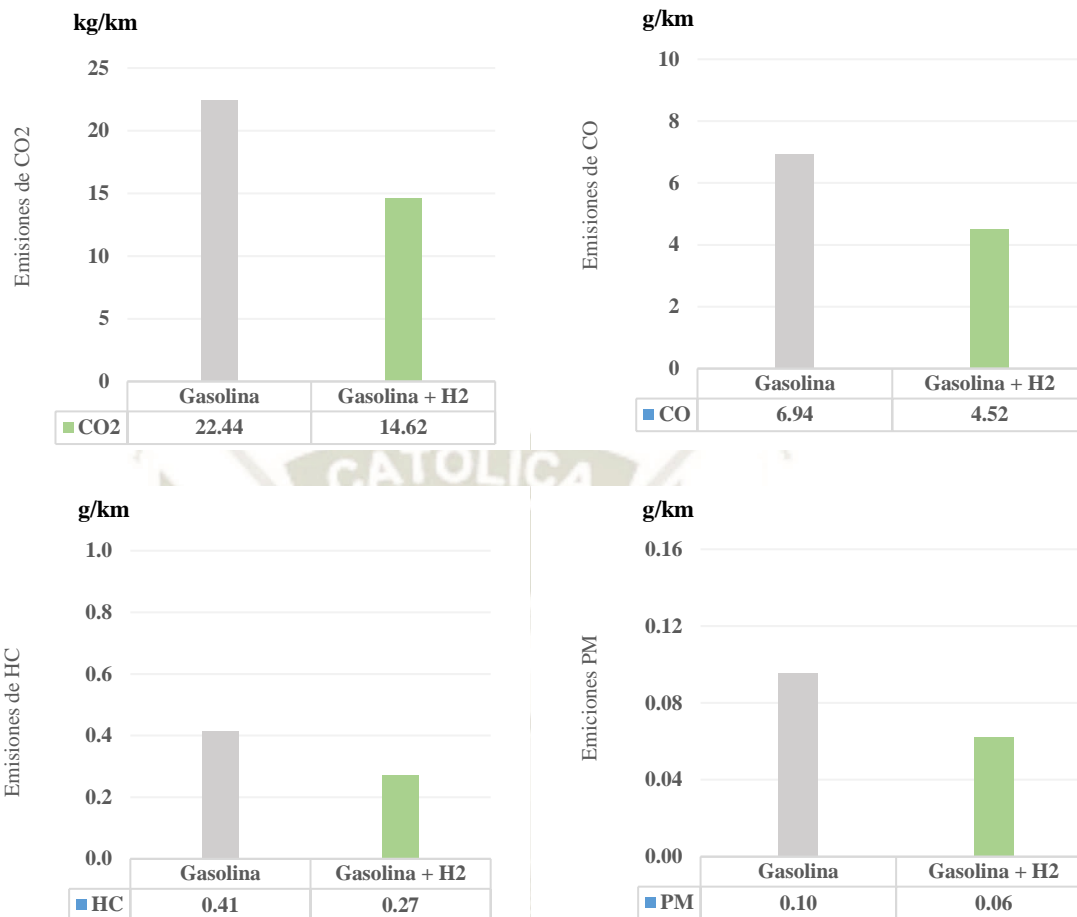
Porcentaje de reducción de emisiones con el sistema de hidrógeno.

CO ₂	CO	HC	PM
%	%	%	%
35%	35%	34%	40%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 70.

Reducción de gases contaminantes.



Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observado el implementar el sistema de hidrógeno para la utilización con la gasolina como complemento se obtienen porcentajes de reducción de emisiones que alcanzan valores del 35% aproximadamente para los gases CO₂, CO, HC, mientras que para PM se obtuvo un porcentaje de reducción de emisión del 40%.

Para un funcionamiento continuo del sistema propuesto asumiremos un recorrido de 20,000km por año aproximadamente dichos valores de reducción de emisiones contaminantes se observan en la tabla 37, dando una notable reducción del CO₂ de 156 TN/año así como los demás gases, a su vez se estima un consumo de agua para la producción de hidrógeno de 56L (15gal aproximadamente) considerando una jornada laboral de 8 hr/día.

Tabla 37.

Reducción de gases contaminantes en un año.

CO₂ (Ton)	CO (kg)	HC (kg)	PM (kg)
156.42	48.40	2.88	0.67

Fuente: Elaboración propia.



CONCLUSIONES

1. El uso del hidrógeno como complemento del combustible en el motor D13B2 de ciclo otto es técnicamente posible, dado que dicho motor gasolinero de alimentación de combustible por carburador nos da la posibilidad de sumar a la mezcla aire combustible el hidrógeno en estado gaseoso y obtener resultados satisfactorios en lo que respecta a la reducción del consumo de combustible y de gases contaminantes sin afectar el funcionamiento y rendimiento del motor realizado en el vehículo de prueba.
2. Se logró diseñar un generador de hidrógeno por electrolisis del tipo Celda Seca (Dry Cell) con una capacidad de 500cm^3 , que mediante los principios teóricos se pudo complementar con ensayos y el manejo de datos experimentales para el diseño más adecuado que permita incrementar la producción de hidrógeno en tiempo real a partir del suministro de corriente eléctrica proporcionada por la batería del vehículo.
3. Se obtuvo de forma experimental la concentración adecuada del electrolito (hidróxido de sodio) que permitió acelerar el proceso de la electrolisis y aumentar la producción de hidrógeno y oxígeno de forma progresiva cuyo valor fue del 5% en peso por litro de agua destilada, como resultado las condiciones de operación del generador fueron de 13A el consumo de corriente con una producción de $600\text{ cm}^3/\text{min}$. Mediante la experimentación este valor de producción es insuficiente para reflejar un ahorro de combustible, por esta razón se añadió un generador más con las mismas características que permitan duplicar la producción, obteniendo un consumo total de 26A sin alternar el porcentaje de concentración del electrolito.
4. Para el diseño y puesta en marcha del proyecto se utilizó el microcontrolador Arduino Nano que nos permitió enlazar las etapas de potencia y generación de hidrógeno, cuyo lenguaje de

programación pudo variar el ciclo de trabajo de los generadores al 95% valor óptimo de producción de hidrógeno, este porcentaje fue desarrollado a partir de la experimentación y permitió un decremento de la temperatura al mantener la misma corriente de operación para ambos generadores estabilizando la producción evitando la pérdida de energía eléctrica en calor, a su vez utilizar este microcontrolador nos garantizó un mayor tiempo producción disminuyendo la complejidad para el desarrollo de la etapa de control.

5. Los cálculos termodinámicos realizados para la utilización de la gasolina e hidrogeno como complemento del combustible piloto muestra una variación de la eficiencia efectiva del ciclo para ambos combustibles no mayor al 1%, a su vez los resultados obtenidos experimentalmente nos permitió saber la aportación energética de cada elemento y describir la tendencia de los parámetros cuyo análisis al consumo de ambos combustibles fueron del 65% para la gasolina y 35% para el hidrógeno, de esta manera se consiguió reducir el consumo del combustible piloto sin afectar su desempeño y eficiencia del motor y con ello un notable ahorro en los costos de adquisición de este combustible de base orgánica para cualquiera de las condiciones de operación del vehículo.
6. Los cálculos realizados para la reducción de emisiones contaminantes utilizando el sistema propuesto en motores de ciclo otto con alimentación de combustible por carburador se logró porcentajes de reducción del 35% para los gases CO_2 , CO y HC , mientras que para PM se obtuvo un porcentaje de reducción de emisión del 40%.

RECOMENDACIONES

1. Para la construcción e implementación del sistema de generación de producción de hidrogeno se recomienda usar equipos de protección personal básicos tales como zapatos de seguridad, lentes y guantes, estos dos últimos necesarios para la manipulación de las soluciones con el hidróxido de sodio.
2. Para efectuar pruebas con los generadores de hidrogeno puesto en el vehículo se recomienda realizarlos en lugares con ventilación y evitar exponer a fuentes de ignición o materiales inflamables, así como también comprobar que el sistema sea hermético para evitar fugas tanto para la mezcla del agua con el electrolito y del gas hidrogeno en las líneas de agua y gas, así mismo verificar el estado de las conexiones y componentes eléctricos.
3. Se recomienda ampliar el estudio para la producción del hidrógeno, así como de los cálculos termodinámicos y poder implementar este sistema a motores que presenten sistemas de inyección directa mono punto o multipunto de gasolina en vehículos de transporte liviano y poder obtener porcentajes de sustitución de combustible iguales o superiores a los obtenidos en la presente investigación.
4. De requerir la aplicación del sistema propuesto en motores que cumplan el ciclo Diesel se recomienda extender el estudio al ciclo termodinámico y funcionamiento del motor ya que la metodología empleada en la presente investigación se tiene un dominio para motores de ciclo Otto con alimentación de combustible por carburador.
5. Se recomienda por factores de seguridad mantener el switch del sistema de producción de hidrogeno en estado de corte cuando se tenga el switch de encendido propio del vehículo en la posición de accesorios para evitar acumulación del gas de hidrogeno al dar arranque al motor.

BIBLIOGRAFÍA

- All Data Sheet.* (11 de 10 de 2021). Obtenido de <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/791637/ETC2/ARDUINO101.html>
- All Data Sheet.* (10 de 10 de 2021). Obtenido de <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/2466/MOSPEC/2N3055.html>
- Altronics.* (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://altronics.cl/mod-rele-2ch>
- Álvarez Flórez, J. (2005). *Motores alternativos de combustión interna*. Barcelona, España: Edicions Universitat Politècnica de Catalunya.
- Anderson, R. (15 de abril de 2014). *Gasificación del carbón: ¿la energía limpia del futuro?* Obtenido de https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/04/140415_economia_carbon_energia_limpia_aa
- Baltazar Ortega, P. (2020). *Diseño de un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen 1.5 L en la ciudad de Huancayo*. Huancayo, Perú.
- Carinf.* (30 de 09 de 2021). Obtenido de Honda Civic 1992: <https://www.carinf.com/es/224048638.html>
- Castillo Hernández, & Mendoza Domínguez. (2012). Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 304.
- Chávez Marin, J. (2018). *Motor de combustión interna adaptado para funcionar con hidrógeno autogenerado mediante electrólisis*. Chile.
- DeMotor. (5 de 12 de 2017). *Motores Térmicos*. Obtenido de Motor Otto: <https://demotor.net/motores-termicos/motor-otto/diferencia-ciclos-otto-real-teorico>

- DeMotor. (14 de 05 de 2018). *Motores Térmicos*. Obtenido de Motor Diesel:
<https://demotor.net/motores-termicos/motor-diesel/ciclos-diesel-teorico>
- DescubreArduino.com. (14 de 8 de 2021). Obtenido de <https://descubrearduino.com/2n3055-transistor-bipolar-npn/>
- Díaz Rey, Á. O., & González Gil, J. E. (25 de 10 de 2017). Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna. Colombia.
- ElectroPeak. (10 de 09 de 2021). Obtenido de <https://electropeak.com/dc-dc-xl4015-adjustable-buck-module-4-38v-5a>
- Estrada Estrada, J. (29 de Noviembre de 2020). Agenda para el aprovechamiento del hidrógeno en México. *Energía a Debate*. Obtenido de <https://www.energiaadebate.com/energia-limpia/titulo-hidrogeno/>
- Fernández, M. (28 de Mayo de 2021). Hidrógeno verde: el combustible eterno que alumbra una nueva era. Obtenido de <https://elpais.com/economia/2021-05-23/hidrogeno-verde-el-combustible-eterno-que-alumbra-una-nueva-era.html>
- Fúnez, C., & Reyes, L. (2019). *El hidrógeno como vector energético*. Universidad Autónoma de Chile, Santiago de Chile.
- Fúnez, C., Almansa, E., & Fuentes, D. (2010). El hidrógeno: vector energético del futuro. *Actualidad tecnológica | energía*. Obtenido de Actualidad Tecnología | energía.
- Gil, M. (2018). PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR OXIDACIÓN PARCIAL DE METANO SOBRE CATALIZADORES DERIVADOS DE ALUMINATO DE NÍQUEL. (*tesis de doctorado*). Universidad del País Vasco, España. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10810/31648>

- González Palacios, C. (Junio de 2005). *Diseño de un sistema de control para inyección de hidrógeno en la cámara de combustión de un motor de combustión interna de cuatro tiempos*. Colombia.
- Guerra Carmentate, J. (14 de 08 de 2021). *Programar facil.com*. Obtenido de <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/familia-arduino-nano/>
- HHO experiences. (29 de 07 de 2021). Obtenido de La energía del futuro: <https://sites.google.com/site/hhoexperiencie/home/celdahumeda>
- HHO experiences. (29 de 07 de 2021). Obtenido de La energía del futuro: <https://sites.google.com/site/hhoexperiencie/home/la-celda-seca>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2 de Febrero de 2020). *Estadísticas Ambientales*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística e Informática: <http://m.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/boletines/ambienbtalesene.pdf>
- IRENA, A. I. (01 de 06 de 2020). *Agencia Internacional de Energías Renovables IRENA*. Obtenido de Costos de generación de energía renovable en 2019: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>
- Jóvay, M. S. (1982). *Motores de automóvil*. Moscú: Editorial MIR.
- MecanicAPP. (25 de 02 de 2021). Obtenido de <http://mecanicappweb.com/modulacion-por-ancho-de-pulso-pwm/>
- Muñiz Sánchez, A. (2012). *El hidrógeno: Consideraciones sobre su aplicación*. Argentina.
- Nel Hydrogen Electrolysers. (2019). *The World's Most Efficient and Reliable Electrolysers*. Obtenido de Nel Hydrogen Electrolysers: <https://www.eseeexpo.de/vis-content/event-energy2019/exh-energy2019.2621590/Energy-Storage-Europe-2019-Nel-Hydrogen-Paper-energy2019.2621590-kPvvuuRHSyuOm7zdR0AkdA.pdf>

- Organización Panamericana de la Salud Perú. (2019). *Cuáles son las 10 principales amenazas a la salud en 2019*. Obtenido de Organización Panamericana de la Salud Perú: https://www.paho.org/per/index.php?option=com_content&view=article&id=4229:cuales-son-las-10-principales-amenazas-a-la-salud-en-2019&Itemid=900
- Osinermin. (12 de 2020). *Reporte de análisis económico sectorial (RAES)*. Obtenido de Energías Renovables: características y perspectivas: https://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/RAES/RAES-Electricidad-diciembre-2020-GPAE-OS.pdf
- Payri, F., & Muñoz, M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Barcelona, España: REVERTÉ S. A.
- Paz Cardona, A. J. (1 de Abril de 2019). *Perú, Chile, México, Brasil y Colombia entre los 50 países con peor calidad del aire*. Obtenido de Mongabay: <https://es.mongabay.com/2019/04/calidad-del-aire-peru-chile-mexico-brasil-colombia/>
- Rhodes, W. (21 de octubre de 2012). Hidrógeno y celdas de electrolisis. Obtenido de <http://www.unrobotica.com/hidrogeno/hidrogeno.htm>
- Ritchie, H., & Roser, M. (6 de 10 de 2020). *Our World in Data*. Obtenido de Energía renovable: <https://ourworldindata.org/renewable-energy#solar-in-the-energy-and-electricity-mix>
- Ritchie, H., & Roser, M. (9 de 10 de 2021). *Our World in Data*. Obtenido de Energía renovable: https://ourworldindata.org/grapher/modern-renewable-energy-consumption?time=2009..latest&country=~OWID_WRL
- Ritchie, H., & Roser, M. (7 de 10 de 2021). *Our World in Data*. Obtenido de Energía renovable: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-energy->

consumption?tab=chart&yScale=log&time=2010..latest&country=ITA~ESP~DEU~IND
~JPN~USA~CHN

Ritchie, H., & Roser, M. (8 de 10 de 2021). *Our World in Data*. Obtenido de Energía renovable:
[https://ourworldindata.org/grapher/wind-
generation?tab=chart&time=2010..latest&country=BRA~ESP~IND~GBR~USA~DEU~
CHN](https://ourworldindata.org/grapher/wind-generation?tab=chart&time=2010..latest&country=BRA~ESP~IND~GBR~USA~DEU~CHN)

Ritchie, H., & Roser, M. (6 de 10 de 2021). *Our World in Data*. Obtenido de Energía renovable:
<https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>

Ritchie, H., & Roser, M. (6 de 10 de 2021). *Our World in Data*. Obtenido de Energía renovable:
<https://ourworldindata.org/renewable-energy#solar-in-the-energy-and-electricity-mix>

Roser, M. (1 de 12 de 2020). *Our World in Data*. Obtenido de ¿Por qué las energías renovables se
volvieron tan baratas tan rápido?: <https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>

Sainz Casas, D. (2014). *Adaptación de un motor de combustión interna alternativo de gasolina
para su funcionamiento con hidrógeno como combustible. Aplicaciones energética y de
automoción*. España.

SENAMHI. (16 de 06 de 2021). *Estación: Huasacache*. Obtenido de Ministerio de Ambiente -
Perú: [https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-
estaciones/_dat_esta_tipo.php?estaciones=000799](https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-estaciones/_dat_esta_tipo.php?estaciones=000799)

Simons, A. (07 de Agosto de 2013). Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled
passenger cars and non-exhaust emissions in ecoinvent v3. THE ECOINVENT
DATABASE V3.

Suárez Alcántara, K. (2019). Un poco de todo sobre el Hidrógeno. *Ciencia*, 72-80.

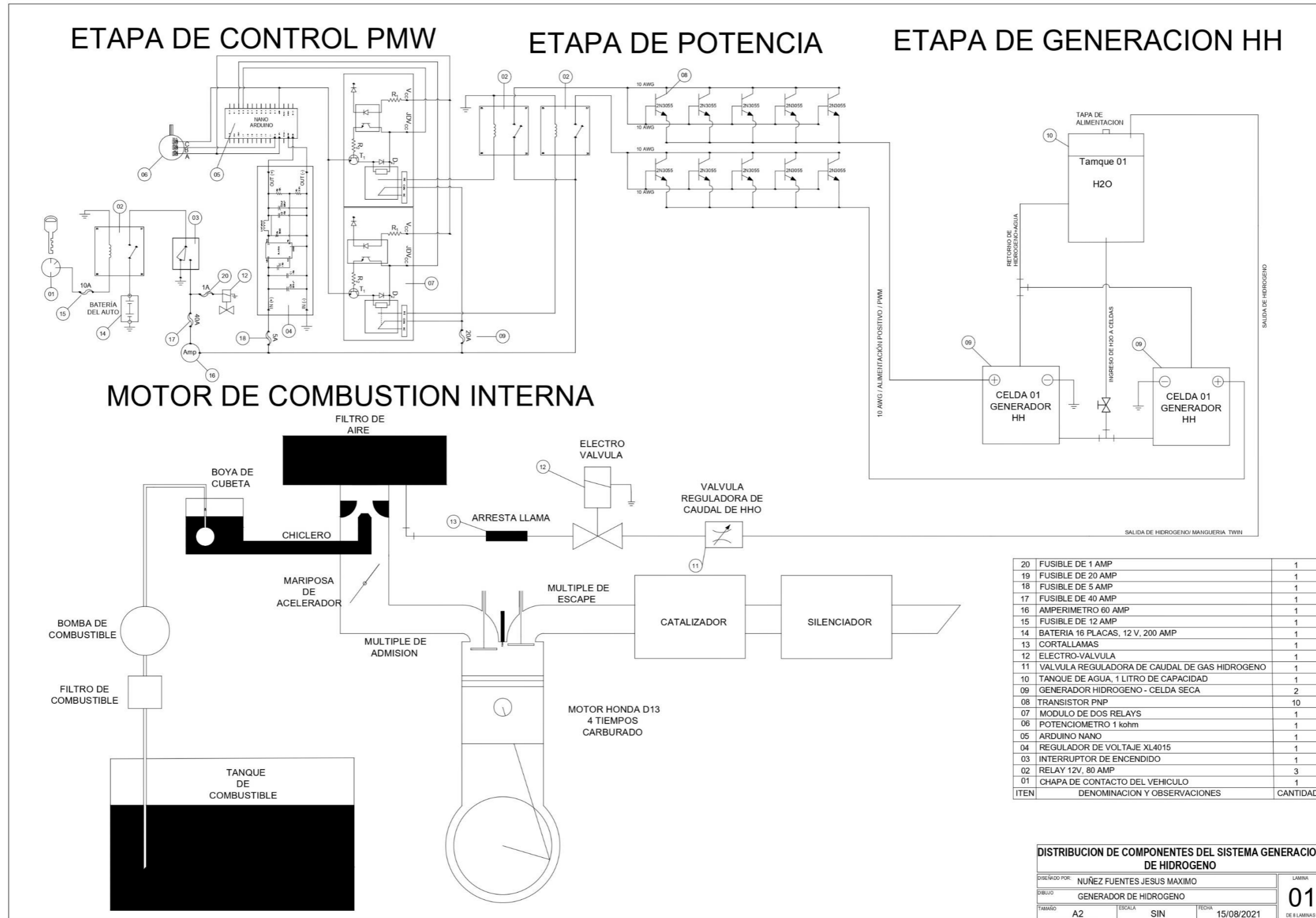
Universidad de Sevilla. (2009). *Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica.* . España.

Valencia, M., & Cardona, C. (2013). Análisis del ciclo de vida para la producción de hidrógeno. *Revista Cubana de Química.*

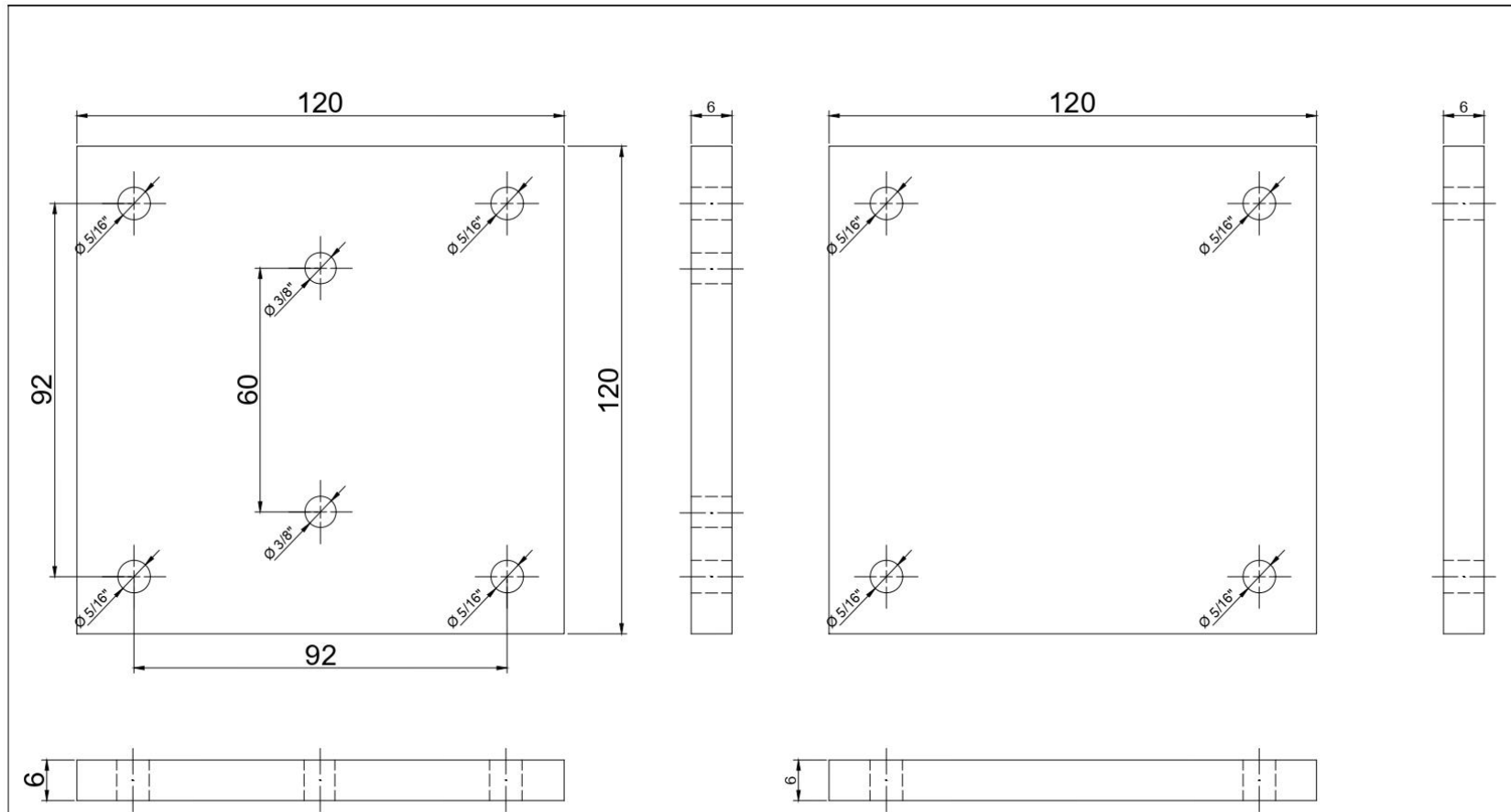


ANEXOS

Anexo 1. Distribución de componentes del sistema generación de hidrogeno

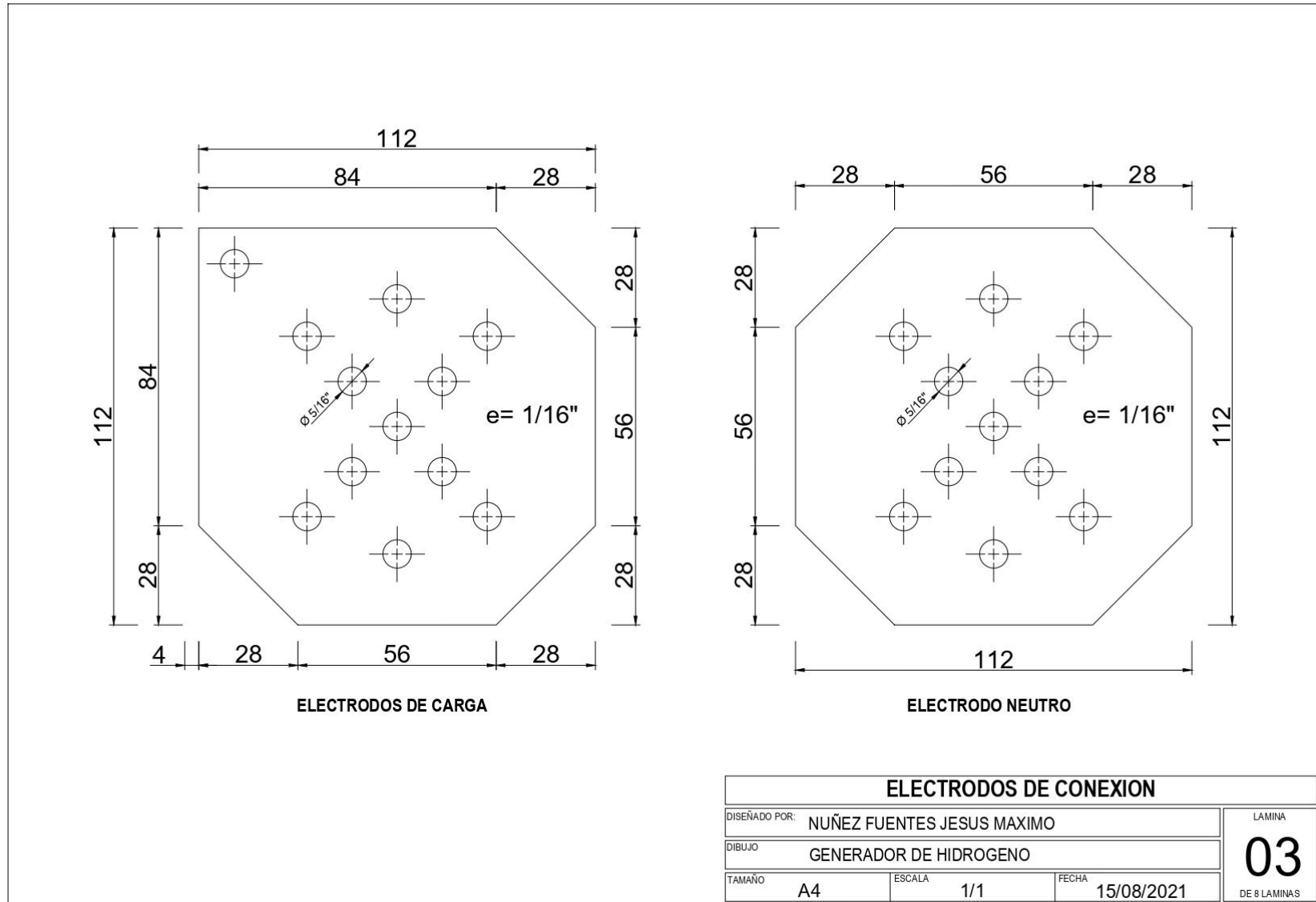


Anexo 2. Tapas del generador de hidrógeno

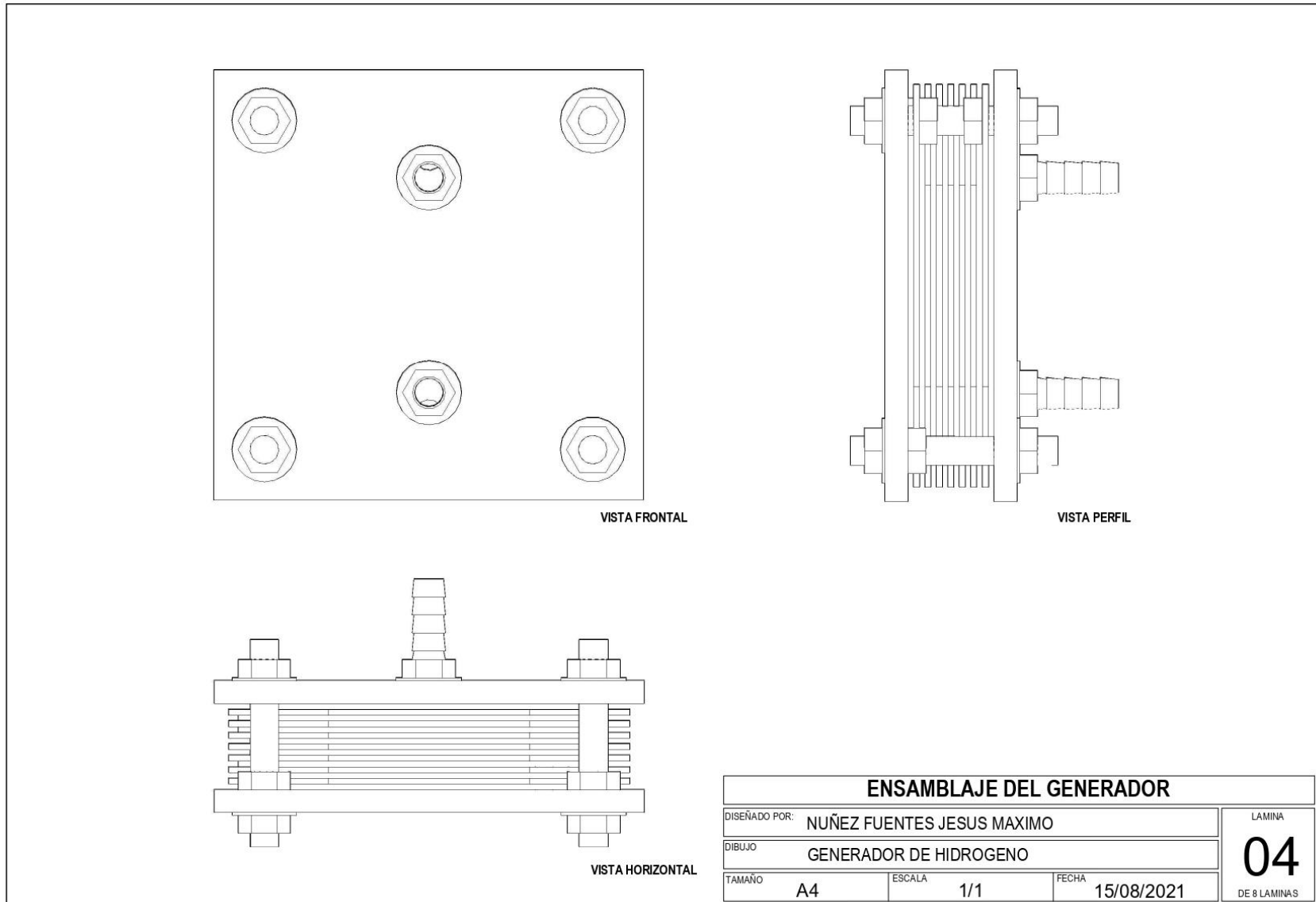


TAPAS DEL GENERADOR DE HIDROGENO			
DISEÑADO POR: NUÑEZ FUENTES JESUS MAXIMO			LAMINA
DIBUJO: GENERADOR DE HIDROGENO			02 DE 8 LAMINAS
TAMAÑO	A4	ESCALA	
		FECHA	15/08/2021

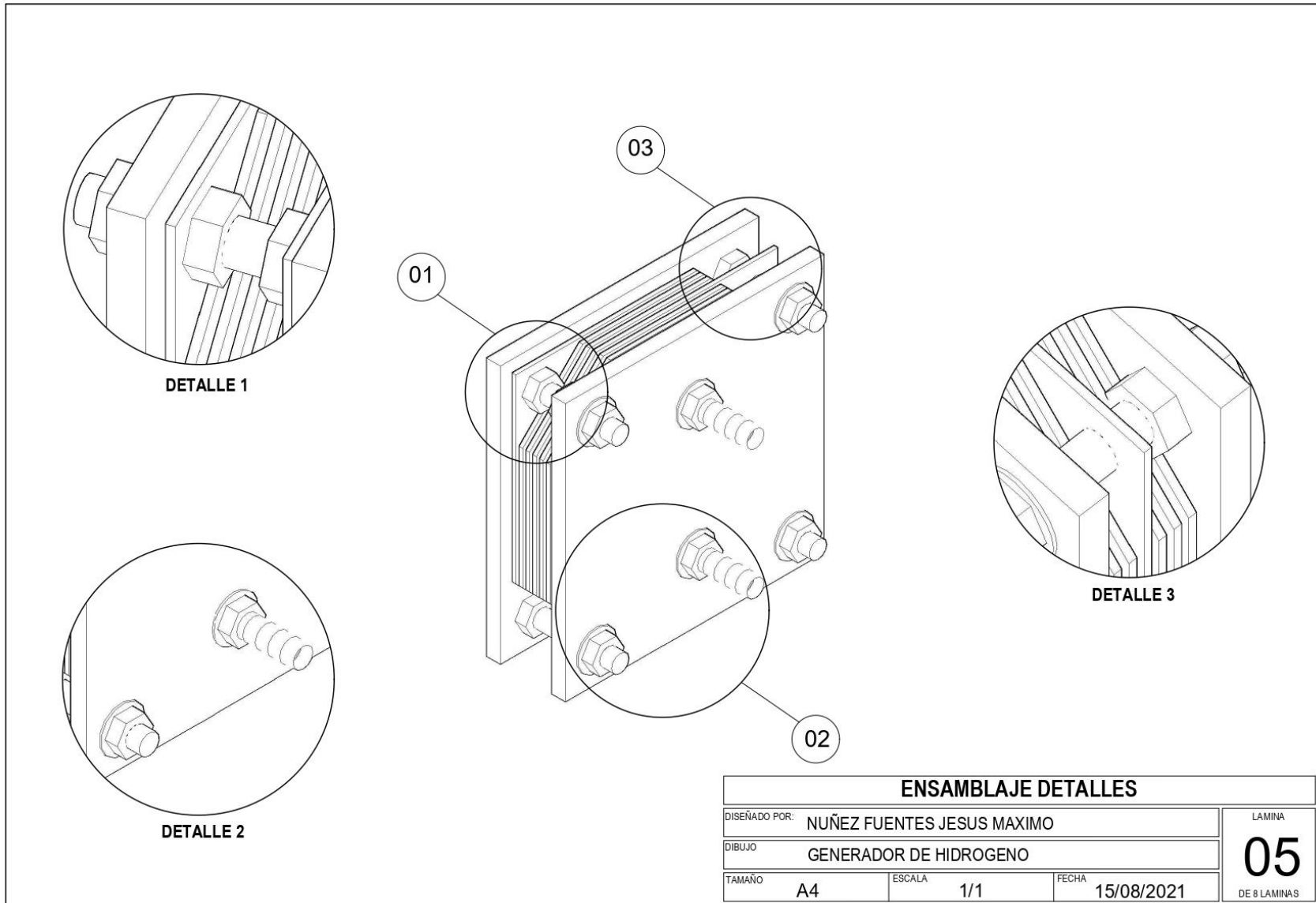
Anexo 3. Electrodo de conexión



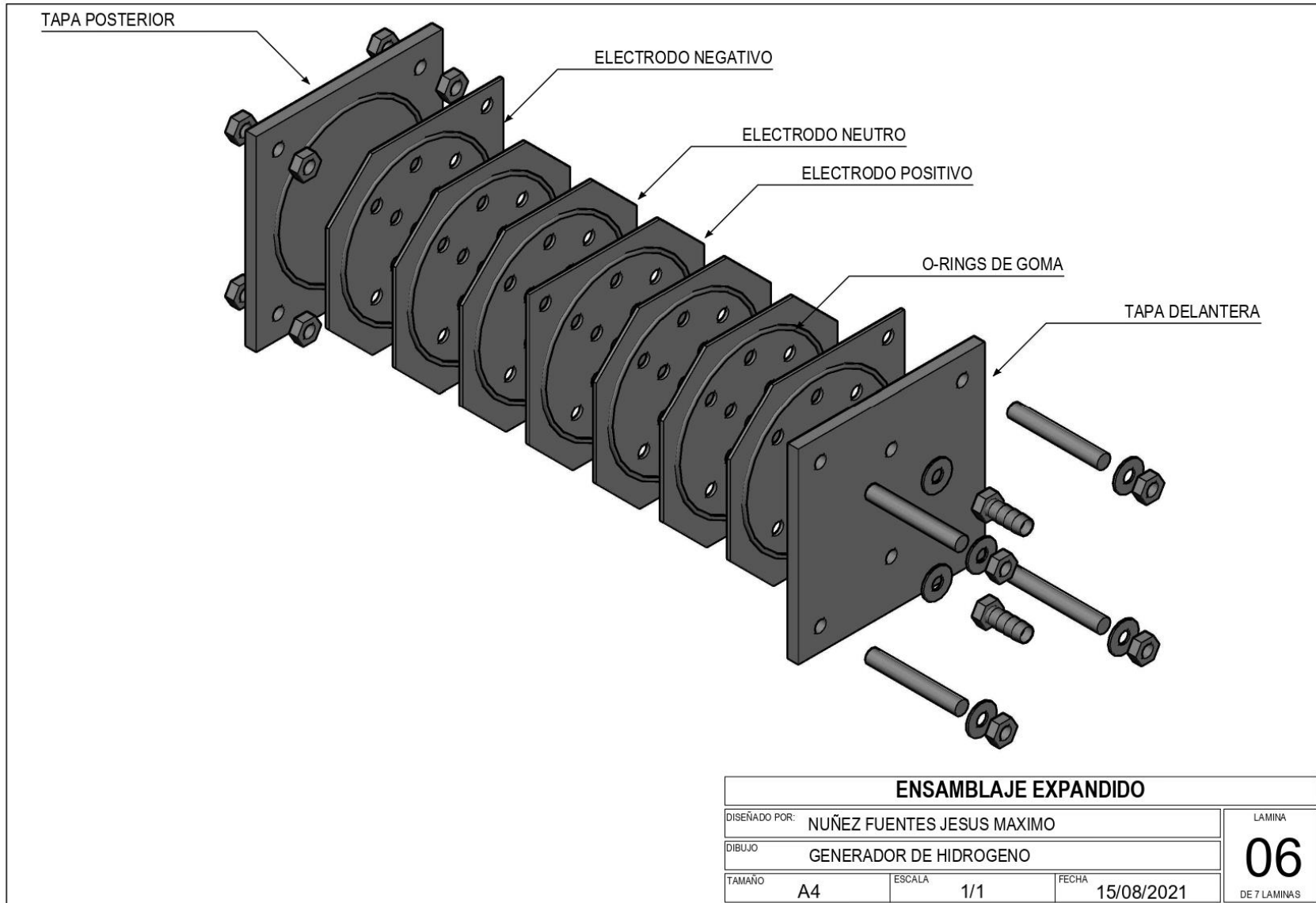
Anexo 4. Ensamble del generador



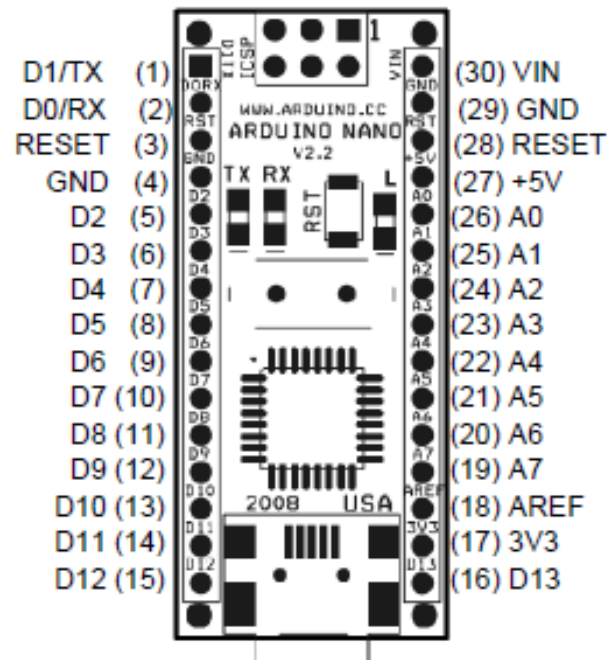
Anexo 5. Ensamblaje detalles



Anexo 6. Ensamblaje expandido



Anexo 7. Arduino Nano

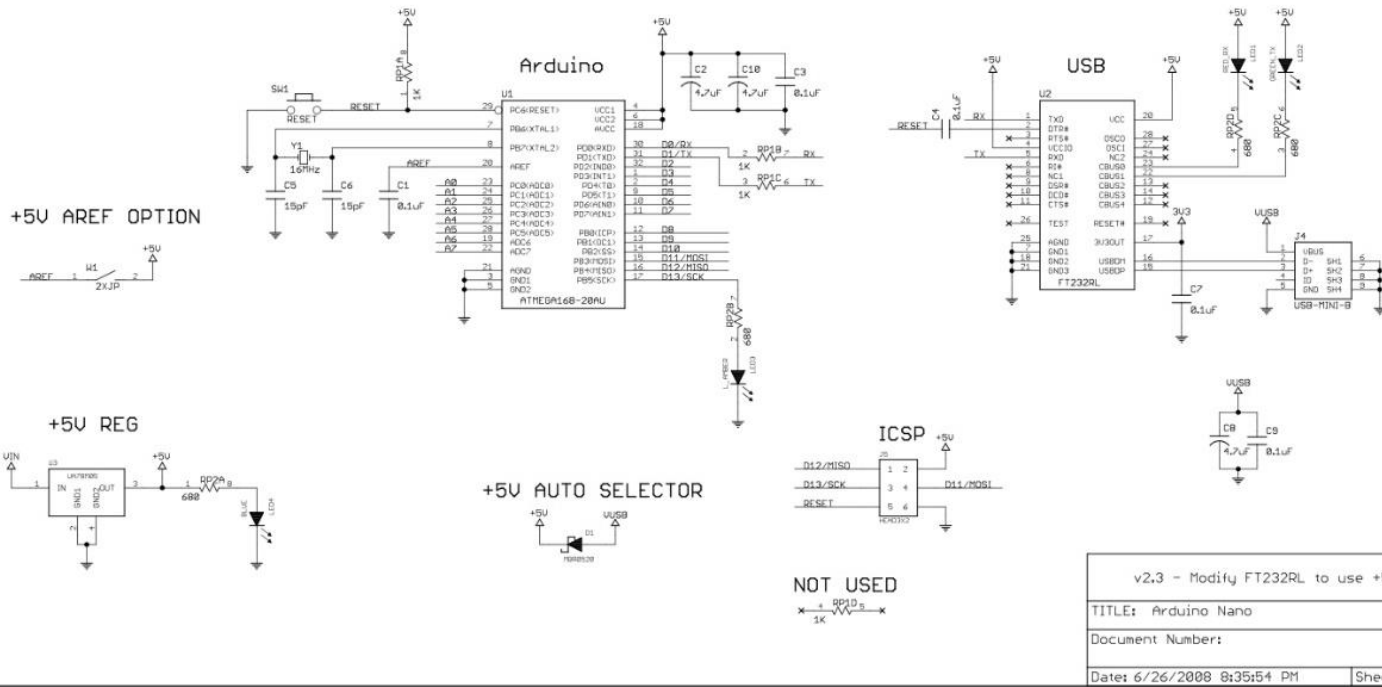
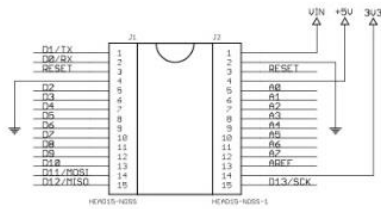


Pin No.	Name	Type	Description
1-2, 5-16	D0-D13	I/O	Digital input/output port 0 to 13
3, 28	RESET	Input	Reset (active low)
4, 29	GND	PWR	Supply ground
17	3V3	Output	+3.3V output (from FTDI)
18	AREF	Input	ADC reference
19-26	A7-A0	Input	Analog input channel 0 to 7
27	+5V	Output or Input	+5V output (from on-board regulator) or +5V (input from external power supply)
30	VIN	PWR	Supply voltage

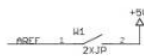
Arduino Nano Schematic

Copyright 2008 under the Creative Commons Attribution Share-Alike 2.5 License

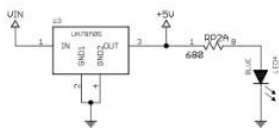
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>



+5U AREF OPTION



+5U REG



+5U AUTO SELECTOR



NOT USED



v2.3 - Modify FT232RL to use +5U	
TITLE: Arduino Nano	
Document Number:	REV: 2,3
Date: 6/26/2008 8:35:54 PM	Sheet: 1/1

Anexo 8. Transistor 2N3055

MOTOROLA SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document
by 2N3055A/D

Complementary Silicon High-Power Transistors

... PowerBase complementary transistors designed for high power audio, stepping motor and other linear applications. These devices can also be used in power switching circuits such as relay or solenoid drivers, dc-to-dc converters, inverters, or for inductive loads requiring higher safe operating area than the 2N3055 and MJ2955.

- Current-Gain — Bandwidth-Product @ $I_C = 1.0 \text{ A dc}$
 $f_T = 0.8 \text{ MHz (Min) — NPN}$
 $= 2.2 \text{ MHz (Min) — PNP}$
- Safe Operating Area — Rated to 60 V and 120 V, Respectively

*MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	2N3055A MJ2955A	MJ15015 MJ15016	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	60	120	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	100	200	Vdc
Collector-Emitter Voltage Base Reversed Biased	V_{CEV}	100	200	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	7.0		Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	15		A dc
Base Current	I_B	7.0		A dc
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	115 0.65	180 1.03	Watts W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +200		$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1.52	0.98	$^\circ\text{C/W}$

* Indicates JEDEC Registered Data. (2N3055A)

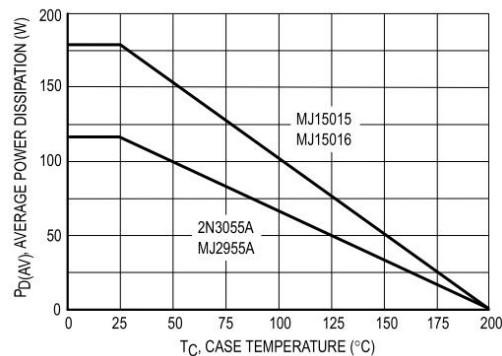
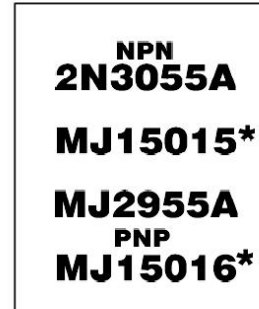


Figure 1. Power Derating

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

REV 1

© Motorola, Inc. 1995



*Motorola Preferred Device

15 AMPERE
COMPLEMENTARY
SILICON
POWER TRANSISTORS
60, 120 VOLTS
115, 180 WATTS



CASE 1-07
TO-204AA
(TO-3)

2N3055A MJ15015 MJ2955A MJ15016

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic		Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS (1)					
*Collector-Emitter Sustaining Voltage ($I_C = 200\text{ mA}$, $I_B = 0$)	2N3055A, MJ2955A MJ15015, MJ15016	$V_{CEO(sus)}$	60 120	— —	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 30\text{ Vdc}$, $V_{BE(off)} = 0\text{ Vdc}$) ($V_{CE} = 60\text{ Vdc}$, $V_{BE(off)} = 0\text{ Vdc}$)	2N3055A, MJ2955A MJ15015, MJ15016	I_{CEO}	— —	0.7 0.1	mAdc
*Collector Cutoff Current ($V_{CEV} = \text{Rated Value}$, $V_{BE(off)} = 1.5\text{ Vdc}$)	2N3055A, MJ2955A MJ15015, MJ15016	I_{CEV}	— —	5.0 1.0	mAdc
Collector Cutoff Current ($V_{CEV} = \text{Rated Value}$, $V_{BE(off)} = 1.5\text{ Vdc}$, $T_C = 150^\circ\text{C}$)	2N3055A, MJ2955A MJ15015, MJ15016	I_{CEV}	— —	30 6.0	mAdc
Emitter Cutoff Current ($V_{EB} = 7.0\text{ Vdc}$, $I_C = 0$)	2N3055A, MJ2955A MJ15015, MJ15016	I_{EBO}	— —	5.0 0.2	mAdc

***SECOND BREAKDOWN**

Second Breakdown Collector Current with Base Forward Biased ($t = 0.5\text{ s non-repetitive}$) ($V_{CE} = 60\text{ Vdc}$)	2N3055A, MJ2955A MJ15015, MJ15016	$I_{S/b}$	1.95 3.0	— —	Adc
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------	-----------	-------------	--------	-----

***ON CHARACTERISTICS (1)**

DC Current Gain ($I_C = 4.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 2.0\text{ Vdc}$) ($I_C = 4.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$) ($I_C = 10\text{ Adc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$)		h_{FE}	10 20 5.0	70 70 —	—
Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 4.0\text{ Adc}$, $I_B = 400\text{ mA}$) ($I_C = 10\text{ Adc}$, $I_B = 3.3\text{ Adc}$) ($I_C = 15\text{ Adc}$, $I_B = 7.0\text{ Adc}$)		$V_{CE(sat)}$	— — —	1.1 3.0 5.0	Vdc
Base-Emitter On Voltage ($I_C = 4.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$)		$V_{BE(on)}$	0.7	1.8	Vdc

***DYNAMIC CHARACTERISTICS**

Current-Gain — Bandwidth Product ($I_C = 1.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ MHz}$)	2N3055A, MJ15015 MJ2955A, MJ15016	f_T	0.8 2.2	6.0 18	MHz
Output Capacitance ($V_{CB} = 10\text{ Vdc}$, $I_E = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)		C_{ob}	60	600	pF

***SWITCHING CHARACTERISTICS (2N3055A only)**

RESISTIVE LOAD					
Delay Time	$V_{CC} = 30\text{ Vdc}$, $I_C = 4.0\text{ Adc}$, $I_{B1} = I_{B2} = 0.4\text{ Adc}$, $t_p = 25\text{ }\mu\text{s Duty Cycle} \leq 2\%$	t_d	—	0.5	μs
Rise Time		t_r	—	4.0	μs
Storage Time		t_s	—	3.0	μs
Fall Time		t_f	—	6.0	μs

(1) Pulse Test: Pulse Width = 300 μs , Duty Cycle $\leq 2\%$.

* Indicates JEDEC Registered Data. (2N3055A)

Anexo 10. Regulador de voltaje

XLSEMI

Datasheet

5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter

XL4015

Features

- Wide 8V to 36V Input Voltage Range
- Output Adjustable from 1.25V to 32V
- Maximum Duty Cycle 100%
- Minimum Drop Out 0.3V
- Fixed 180KHz Switching Frequency
- 5A Constant Output Current Capability
- Internal Optimize Power MOSFET
- High efficiency up to 96%
- Excellent line and load regulation
- Built in thermal shutdown function
- Built in current limit function
- Built in output short protection function
- Available in TO263-5L package

Applications

- LCD Monitor and LCD TV
- Portable instrument power supply
- Telecom / Networking Equipment

General Description

The XL4015 is a 180 KHz fixed frequency PWM buck (step-down) DC/DC converter, capable of driving a 5A load with high efficiency, low ripple and excellent line and load regulation. Requiring a minimum number of external components, the regulator is simple to use and include internal frequency compensation and a fixed-frequency oscillator.

The PWM control circuit is able to adjust the duty ratio linearly from 0 to 100%. An over current protection function is built inside. When short protection function happens, the operation frequency will be reduced from 180KHz to 48KHz. An internal compensation block is built in to minimize external component count.



TO263-5L

Figure1. Package Type of XL4015

XLSEMI

Datasheet

5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter

XL4015

Pin Configurations

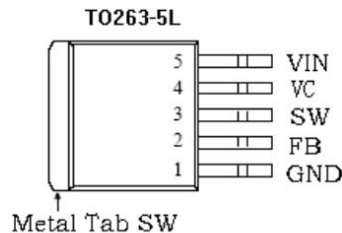


Figure2. Pin Configuration of XL4015 (Top View)

Table 1 Pin Description

Pin Number	Pin Name	Description
1	GND	Ground Pin. Care must be taken in layout. This pin should be placed outside of the Schottky Diode to output capacitor ground path to prevent switching current spikes from inducing voltage noise into XL4015.
2	FB	Feedback Pin (FB). Through an external resistor divider network, FB senses the output voltage and regulates it. The feedback threshold voltage is 1.25V.
3	SW	Power Switch Output Pin (SW). SW is the switch node that supplies power to the output.
4	VC	Internal Voltage Regulator Bypass Capacity. In typical system application, The VC pin connect a 1uf capacity to VIN.
5	VIN	Supply Voltage Input Pin. XL4015 operates from a 8V to 36V DC voltage. Bypass Vin to GND with a suitably large capacitor to eliminate noise on the input.

XLSEMI

Datasheet

5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter

XL4015

Function Block

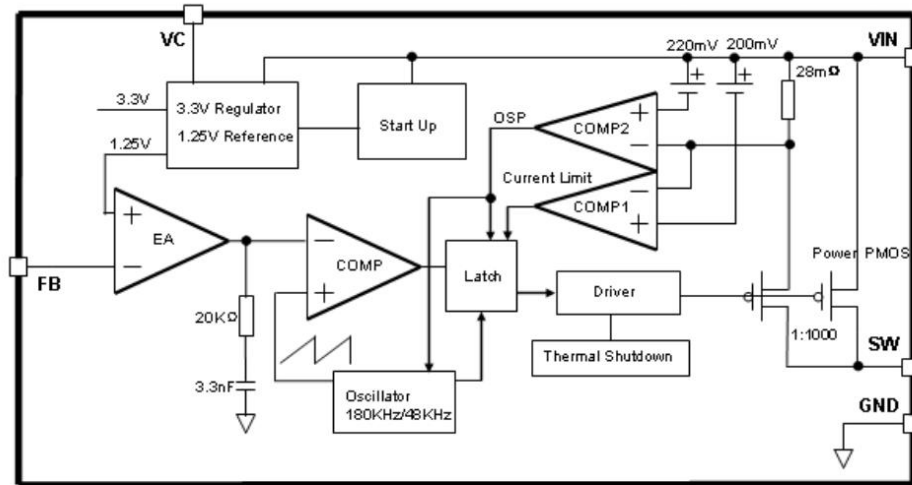


Figure3. Function Block Diagram of XL4015

Typical Application Circuit

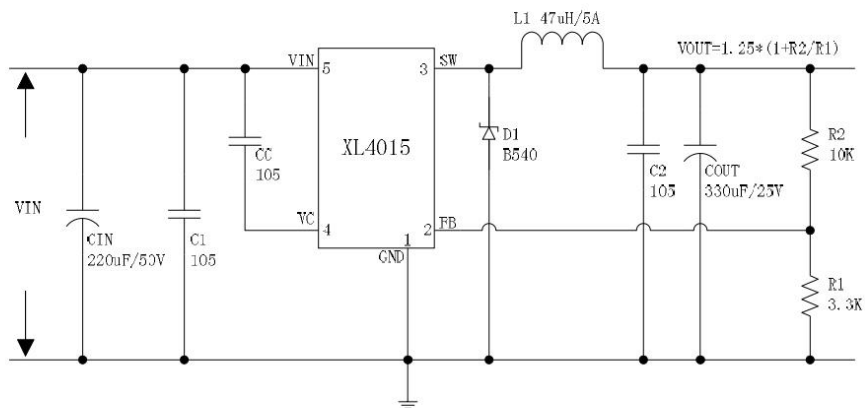


Figure4. XL4015 Typical Application Circuit (VIN=8V~36V, VOUT=5V/5A)

XLSEMI

Datasheet

5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter

XL4015

XL4015 Electrical Characteristics

$T_a = 25^\circ\text{C}$; unless otherwise specified.

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
<i>System parameters test circuit figure4</i>						
VFB	Feedback Voltage	$V_{in} = 8\text{V to } 40\text{V}, V_{out}=5\text{V}$ $I_{load}=0.5\text{A to } 5\text{A}$	1.225	1.25	1.275	V
Efficiency	η	$V_{in}=12\text{V}, V_{out}=5\text{V}$ $I_{out}=5\text{A}$	-	87	-	%
Efficiency	η	$V_{in}=24\text{V}, V_{out}=12\text{V}$ $I_{out}=4\text{A}$	-	93	-	%

Electrical Characteristics (DC Parameters)

$V_{in} = 12\text{V}$, $GND=0\text{V}$, V_{in} & GND parallel connect a 220uf/50V capacitor; $I_{out}=500\text{mA}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$; the others floating unless otherwise specified.

Parameters	Symbol	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input operation voltage	V_{in}		8		36	V
Quiescent Supply Current	I_q	$V_{FB} = V_{in}$		2.1	5	mA
Oscillator Frequency	F_{osc}		144	180	216	KHz
Output Short Frequency	F_{osp}			48		KHz
Switch Current Limit	I_L	$V_{FB} = 0$		7		A
Max. Duty Cycle	D_{MAX}	$V_{FB}=0\text{V}$		100		%
Output Power PMOS	R_{dson}	$V_{FB}=0\text{V}, V_{in}=12\text{V},$ $I_{SW}=5\text{A}$		60	80	mohm

Anexo 11. Boletas de pago

Prueba 1	
Ensayo con Gasolina	Ensayo con Hidrógeno
<p>ESTACION DE SERVICIOS OTTAWA SAC AV. PACASMAYO MZ C LT 1 URB. JORGE CHAVEZ ET 1 (PACASMAYO Y TONAS VALLE) CALLAO-PROV.CONST.CALLAO- PROV.CONST.CALLAO RUC: 20511283389 Teléfono:</p> <p>Maq. Regist. N°: TC6Y417319 Boleta de venta Electronica N: B008-0004215</p> <p>Fecha: 10/09/2020 - 14:24:28 NOMBRE: CLIENTE VARIOS DOC. IDENT: 99999999 DIRECCION: GUERICA</p> <p>2.0221x10.88 S/22.00 GASOHOI GASOHOI 90</p> <p>TOTAL A PAGAR: S/22.00 VEINTIDOS CON 00/100 SOLES</p> <p>Vendedor: JOEL CHOQUEPATA CANAHUTRI</p> <p>Gracias por su Compra!!! Puedes descargar tu factura en: https://escriptorio.acepta.pe/portalboletas/buscarboleta/index.php</p>	<p>ESTACION DE SERVICIOS OTTAWA SAC AV. PACASMAYO MZ C LT 1 URB. JORGE CHAVEZ ET 1 (PACASMAYO Y TONAS VALLE) CALLAO-PROV.CONST.CALLAO- PROV.CONST.CALLAO RUC: 20511283389 Teléfono:</p> <p>Maq. Regist. N°: TC6Y417319 Boleta de venta Electronica N: B008-0004217</p> <p>Fecha: 10/09, 2020 - 16:53:19 NOMBRE: CLIENTE VARIOS DOC. IDENT: 99999999 DIRECCION: GUERICA</p> <p>1.1949x10.88 S/13.00 GASOHOI GASOHOI 90</p> <p>TOTAL A PAGAR: S/13.00 TRECE CON 00/100 SOLES</p> <p>Vendedor: JOEL CHOQUEPATA CANAHUTRI</p> <p>Gracias por su Compra!!! Puedes descargar tu factura en: https://escriptorio.acepta.pe/portalboletas/buscarboleta/index.php</p>

Prueba 2

Ensayo con Gasolina



PACIDAMA ENERGIA S.A.C.
RUC: 20601741637

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA - AREQQUIPA

SUCURSAL GRIFO JESUS
AV. JESUS NRO. 400

BOLETA ELECTRONICA
B040-020398

Fecha: 14/06/2021 Hora: 14:02:00
Cajero: RMEZA
RUC/DNI: 0000000000
Cliente: VENTAS DEL DIA
Punto de venta: Atención Arcosurpa AREQUIPA - AREQUIPA - ARE
Plaza Unid.: VIX-354
Transacción: VENTAS ELECTROELECTIVO-ELECTIVO
Operación: 00002 000021921 (OPENT)

CANT	DESCRIPCION	PRECIO
3.74	GALON GASOLINA 90	13.90
	OP. GRAVADA S/	32.29
	OP. INAFECTO S/	0.00
	OP. EXONERADO S/	0.00
	OTROS TRIBUTOS S/	0.00
	OTROS CARGOS S/	0.00
	I.G.V. S/	5.81
	PERCEPCION S/	0.00
	TOTAL A COBRAR S/	38.10

SON TREINTAY OCHO CON CERO/100 SOLES
Autorizado mediante RESOLUCION DE INTENDENCIA
NRO. 018-005-0009489/SUNAT
Consulte su documento en: www.gre.com.pe



GRACIAS POR SU PREFERENCIA

Ensayo con Hidrógeno



PACIDAMA ENERGIA S.A.C.
RUC: 20601741637

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA - AREQQUIPA

SUCURSAL GRIFO JESUS
AV. JESUS NRO. 400

BOLETA ELECTRONICA
B040-020767

Fecha: 15/06/2021 Hora: 14:07:00
Cajero: RMEZA
RUC/DNI: 0000000000
Cliente: VENTAS DEL DIA
Punto de venta: Atención Arcosurpa AREQUIPA - AREQUIPA - ARE
Plaza Unid.: VIX-354
Transacción: VENTAS ELECTROELECTIVO-ELECTIVO
Operación: 00002 000022511 (OPENT)

CANT	DESCRIPCION	PRECIO
1.78	GALON GASOLINA 90	13.90
	OP. GRAVADA S/	20.93
	OP. INAFECTO S/	0.00
	OP. EXONERADO S/	0.00
	OTROS TRIBUTOS S/	0.00
	OTROS CARGOS S/	0.00
	I.G.V. S/	3.77
	PERCEPCION S/	0.00
	TOTAL A COBRAR S/	24.70

SON VEINTIDATRO CON CERO/100 SOLES
Autorizado mediante RESOLUCION DE INTENDENCIA
NRO. 018-005-0009489/SUNAT
Consulte su documento en: www.gre.com.pe



GRACIAS POR SU PREFERENCIA

Prueba 3

Ensayo con Gasolina	Ensayo con Hidrógeno																
<p>GRIFO-MORALES LIPA HILDA Ruc: 10024198915 AV. TARAPACA NRO. 1801 URB. EDIFICADORES ALTO MISTI - MIRAFLORES - AR</p> <p>BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA B002 - 00007910</p> <p>Cliente: CLIENTE CONTADO Dirección:</p> <p>Núm Doc: 10000001 Fecha de Emisión: 17/06/2021 7:05:20 p. m. Vendedor: ADMINISTRADOR Placa: V1X-354</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Descrip</th> <th>Cant</th> <th>V. U.</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GASOHOL 90 PLUS</td> <td>2.572 GLL</td> <td>14.19</td> <td>36.50</td> </tr> </tbody> </table> <p>Total Gravado: S/. 30.93 I.G.V. 18 % S/ 5.57 TOTAL : S/ 36.50</p> <p>TREINTA Y SEIS CON 50/100 SOLES Consulte su comprobante en la siguiente dirección: https://www.nubefact.com/cpe/df298285-19f1-41f1-9452-f8f3429ab049 aceptada_por_s</p>	Descrip	Cant	V. U.	Total	GASOHOL 90 PLUS	2.572 GLL	14.19	36.50	<p>GRIFO-MORALES LIPA HILDA Ruc: 10024198915 AV. TARAPACA NRO. 1801 URB. EDIFICADORES ALTO MISTI - MIRAFLORES - AR</p> <p>BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA B002 - 00007935</p> <p>Cliente: CLIENTE CONTADO Dirección:</p> <p>Núm Doc: 10000001 Fecha de Emisión: 16/06/2021 5:45:45 p. m. Vendedor: ADMINISTRADOR Placa: V1X-354</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Descrip</th> <th>Cant</th> <th>V. U.</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GASOHOL 90 PLUS</td> <td>1.670 GLL</td> <td>14.19</td> <td>23.70</td> </tr> </tbody> </table> <p>Total Gravado: S/ 20.08 I.G.V. 18 % S/ 3.62 TOTAL : S/ 23.70</p> <p>VEINTITRES CON 70/100, SOLES Consulte su comprobante en la siguiente dirección: https://www.nubefact.com/cpe/bbd491bb-59b6-4b58-8350-2a21e51e1b08 aceptada_por_s</p>	Descrip	Cant	V. U.	Total	GASOHOL 90 PLUS	1.670 GLL	14.19	23.70
Descrip	Cant	V. U.	Total														
GASOHOL 90 PLUS	2.572 GLL	14.19	36.50														
Descrip	Cant	V. U.	Total														
GASOHOL 90 PLUS	1.670 GLL	14.19	23.70														

Prueba 4

Ensayo con Gasolina

GRIFO-MORALES LIPA HILDA

Ruc: 10024198915
AV. TARAPACA NRO. 1801 URB.
EDIFICADORES ALTO MISTI -
MIRAFLORES - AR

**BOLETA DE VENTA
ELECTRÓNICA**

B002 - 00008853

Cliente:
CLIENTE CONTADO

Dirección:

Núm. Doc.: 10000001
Fecha de Emisión: 22/07/2021 11:58:21 a. m.
Vendedor: ADMINISTRADOR
Placa: V1X-354

Descrip	Cant	V. U	Total
GASOHOL 90 PLUS	2.743 GLL	14.95	41.00

Total Gravado S/ 34.75
I.G.V. 18 % S/ 6.25
TOTAL : S/ 41.00

CUARENTA Y UNO CON 00/100

SOLES

Consulte su comprobante en la
siguiente dirección:

<https://www.nubefact.com/cpe/af5a173a-2b6d-43d5-9aae-e7117c614d2b>
aceptada_por_s

Ensayo con Hidrógeno

GRIFO-MORALES LIPA HILDA

Ruc: 10024198915
AV. TARAPACA NRO. 1801 URB.
EDIFICADORES ALTO MISTI -
MIRAFLORES - AR

**BOLETA DE VENTA
ELECTRÓNICA**

B002 - 00008884

Cliente:
CLIENTE CONTADO

Dirección:

Núm. Doc.: 10000001
Fecha de Emisión: 23/07/2021 11:23:23 a. m.
Vendedor: ADMINISTRADOR
Placa: V1X-354

Descrip	Cant	V. U	Total
GASOHOL 90 PLUS	1.773 GLL	14.95	26.50

Total Gravado S/ 22.46
I.G.V. 18 % S/ 4.04
TOTAL : S/ 26.50

VEINTISEIS CON 50/100 SOLES

Consulte su comprobante en la
siguiente dirección:

<https://www.nubefact.com/cpe/d463e79e-53bb-47e1-a791-83b15a44c88a>
aceptada_por_s

Prueba 5															
Ensayo con Gasolina	Ensayo con Hidrógeno														
<p>GRIFO-MORALES LIPA HILDA Ruc: 10024198915 AV. TARAPACA NRO. 1801 URB EDIFICADORES ALTO MISTI - MIRAFLORES - AR</p> <p>----- BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA B002 - 00008927</p> <p>----- Cliente : CLIENTE CONTADO Dirección :</p> <p>Núm Doc: 10000001 Fecha de Emisión: 24/07/2021 11:30 p. m Vendedor: ADMINISTRADOR Placa: V1X-354</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Descrip.</th> <th>C.</th> <th>V. U.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GASOHOL 90 PLUS</td> <td>1495 GLL</td> <td>15.05</td> </tr> </tbody> </table> <p>----- Total Gravado : S/ 29.24 I.G.V. 18 % S/ 5.26 TOTAL : S/ 34.50</p> <p>TREINTA Y CUATRO CON 50/100 SOLES Consulte su comprobante en la siguiente dirección: https://www.nubefact.com/cpe/a052a56c-f71f-4bc4-a6da-7b93a86210e4 aceptada_por_s</p>	Descrip.	C.	V. U.	GASOHOL 90 PLUS	1495 GLL	15.05	<p>GRIFO-MORALES LIPA HILDA Ruc: 10024198915 AV. TARAPACA NRO. 1801 URB EDIFICADORES ALTO MISTI - MIRAFLORES - AR</p> <p>----- BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA B002 - 00009145</p> <p>----- Cliente : CLIENTE CONTADO Dirección :</p> <p>Núm Doc: 10000001 Fecha de Emisión: 31/07/2021 2:35:07 p. m Vendedor: ADMINISTRADOR Placa: V1X-354</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Descrip.</th> <th>Cant.</th> <th>V. U.</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GASOHOL 90 PLUS</td> <td>1495 GLL</td> <td>15.05</td> <td>22.50</td> </tr> </tbody> </table> <p>----- Total Gravado : S/ 19.07 I.G.V. 18 % S/ 3.43 TOTAL : S/ 22.50</p> <p>VEINTIDOS CON 50/100 SOLES Consulte su comprobante en la siguiente dirección: https://www.nubefact.com/cpe/a052a907-8073-4408-99b1-92558ae1eca6 aceptada_por_s</p>	Descrip.	Cant.	V. U.	Total	GASOHOL 90 PLUS	1495 GLL	15.05	22.50
Descrip.	C.	V. U.													
GASOHOL 90 PLUS	1495 GLL	15.05													
Descrip.	Cant.	V. U.	Total												
GASOHOL 90 PLUS	1495 GLL	15.05	22.50												

Prueba 6

Ensayo con Gasolina	Ensayo con Hidrógeno																																								
<p>GRIFO-MORALES LIPA HILDA Ruc: 10024198915 AV. TARAPACA NRO. 1801 URB. EDIFICADORES ALTO MISTI - MIRAFLORES - AR</p> <p>BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA B002 - 00009020</p> <p>Cliente: Código: N° Dirección:</p> <p>Núm Doc: 10000001 Fecha de Emisión: 27/07/2021 9:24:59 p. m. Variable: ADMINISTRADOR V1X-354</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Cant</th> <th>V. U.</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GASOLINA 90 PLUS</td> <td>2.631 GLL</td> <td>16.05</td> <td>39.60</td> </tr> <tr> <td>Total Gravado:</td> <td>S/</td> <td></td> <td>33.56</td> </tr> <tr> <td>I.G.V. 18 %</td> <td>S/</td> <td></td> <td>6.04</td> </tr> <tr> <td>TOTAL :</td> <td>S/.</td> <td></td> <td>39.60</td> </tr> </tbody> </table> <p>TREINTA Y NUEVE CON 60/100 SOLES Consulte su comprobante en la siguiente dirección https://www.nubefact.com/cpe/3426dca3-b75e-408f-afc8-7969662e0ddf aceptada_por_s</p>		Cant	V. U.	Total	GASOLINA 90 PLUS	2.631 GLL	16.05	39.60	Total Gravado:	S/		33.56	I.G.V. 18 %	S/		6.04	TOTAL :	S/.		39.60	<p>GRIFO-MORALES LIPA HILDA Ruc: 10024198915 AV. TARAPACA NRO. 1801 URB. EDIFICADORES ALTO MISTI - MIRAFLORES - AR</p> <p>BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA B002 - 00009039</p> <p>Cliente: CLIENTE CONTADO Dirección:</p> <p>Núm Doc: 10000001 Fecha de Emisión: 27/07/2021 9:24:59 p. m. Variable: ADMINISTRADOR V1X-354</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Cant</th> <th>V. U.</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GASOLINA 90 PLUS</td> <td>1.761 GLL</td> <td>15.05</td> <td>26.60</td> </tr> <tr> <td>Total Gravado:</td> <td>S/.</td> <td></td> <td>22.46</td> </tr> <tr> <td>I.G.V. 18 %</td> <td>S/.</td> <td></td> <td>4.04</td> </tr> <tr> <td>TOTAL :</td> <td>S/.</td> <td></td> <td>26.50</td> </tr> </tbody> </table> <p>VEINTISEIS CON 50/100 SOLES Consulte su comprobante en la siguiente dirección https://www.nubefact.com/cpe/f18d0f2f-4db0-4c8b-88a1-f156956642ed aceptada_por_s</p>		Cant	V. U.	Total	GASOLINA 90 PLUS	1.761 GLL	15.05	26.60	Total Gravado:	S/.		22.46	I.G.V. 18 %	S/.		4.04	TOTAL :	S/.		26.50
	Cant	V. U.	Total																																						
GASOLINA 90 PLUS	2.631 GLL	16.05	39.60																																						
Total Gravado:	S/		33.56																																						
I.G.V. 18 %	S/		6.04																																						
TOTAL :	S/.		39.60																																						
	Cant	V. U.	Total																																						
GASOLINA 90 PLUS	1.761 GLL	15.05	26.60																																						
Total Gravado:	S/.		22.46																																						
I.G.V. 18 %	S/.		4.04																																						
TOTAL :	S/.		26.50																																						

Prueba 7

Ensayo con Gasolina	Ensayo con Hidrógeno																
<p>GRIFO-MORALES LIPA HILDA Ruc: 10024198915 AV TARAPACA NRO. 1801 URB EDIFICADORES ALTO MISTI - MIRAFLORES - AR</p> <p>-----</p> <p>BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA</p> <p>B002 - 00009103</p> <p>Cliente : CLIENTE CONTADO</p> <p>Dirección :</p> <p>Núm Doc: 10000001 Fecha de Emisión : 30/07/2021 4:22:26 p. Vendedor : ADMINISTRADOR Placa: V1X-354</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Descrip.</th> <th>Cant.</th> <th>V. U.</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GASOHL 90 PLUS</td> <td>2.725 GLL</td> <td>15.05</td> <td>41.01</td> </tr> </tbody> </table> <p>Total Gravado: S/. 34.75 I.G.V. 18 % S/. 6.26 TOTAL : S/. 41.01</p> <p>CUARENTA Y UNO CON 01/100 SOLES</p> <p>Consulte su comprobante en la siguiente dirección: https://www.nubefact.com/cpe/4845982a-dd2c-4f47-Bef7-cea8d72a644a aceptada_por_s</p>	Descrip.	Cant.	V. U.	Total	GASOHL 90 PLUS	2.725 GLL	15.05	41.01	<p>GRIFO-MORALES LIPA HILDA Ruc: 10024198915 AV TARAPACA NRO. 1801 URB EDIFICADORES ALTO MISTI - MIRAFLORES - AR</p> <p>-----</p> <p>BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA</p> <p>B002 - 00009188</p> <p>Cliente : CLIENTE CONTADO</p> <p>Dirección :</p> <p>Núm Doc: 10000001 Fecha de Emisión : 2/08/2021 2:17:41 p. m. Vendedor : ADMINISTRADOR Placa: V1X-354</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Descrip.</th> <th>Cant.</th> <th>V. U.</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GASOHL 90 PLUS</td> <td>1.801 GLL</td> <td>15.05</td> <td>27.10</td> </tr> </tbody> </table> <p>Total Gravado: S/. 22.97 I.G.V. 18 % S/. 4.13 TOTAL : S/. 27.10</p> <p>VEINTISIETE CON 10/100 SOLES</p> <p>Consulte su comprobante en la siguiente dirección: https://www.nubefact.com/cpe/92c80476-1cc8-456b-89e6-3464e10ac20f aceptada_por_s</p>	Descrip.	Cant.	V. U.	Total	GASOHL 90 PLUS	1.801 GLL	15.05	27.10
Descrip.	Cant.	V. U.	Total														
GASOHL 90 PLUS	2.725 GLL	15.05	41.01														
Descrip.	Cant.	V. U.	Total														
GASOHL 90 PLUS	1.801 GLL	15.05	27.10														

Prueba 8

Ensayo con Gasolina	Ensayo con Hidrógeno																
<p>GRIFO-MORALES LIPA HILDA Ruc: 10024198915 AV. TARAPACA NRO. 1801 URB. EDIFICADORES ALTO MISTI - MIRAFLORES - AR</p> <hr/> <p>BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA B002 - 00009234</p> <p>Cliente: CONTADO Direccion:</p> <p>Núm Doc: 10000001 Fecha de Emision: 3/08/2021 5:26:29 p. m. Vendedor: ADMINISTRADOR Placa: V1X-354</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Descrip</th> <th>Cant</th> <th>V. U.</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GASOHOL 90 PLUS</td> <td>2.977 GLL</td> <td>15.05</td> <td>44.80</td> </tr> </tbody> </table> <p>Total Gravado: S/. 37.97 I.G.V. 18 % S/. 6.83 TOTAL : S/. 44.80</p> <p>CUARENTA Y CUATRO CON 80/100 SOLES Consulte su comprobante en la siguiente dirección: https://www.nubefact.com/cpe/5abdfoa3-759f-4a1a-af25-f16a0bfe947b aceptada_por_s</p>	Descrip	Cant	V. U.	Total	GASOHOL 90 PLUS	2.977 GLL	15.05	44.80	<p>GRIFO-MORALES LIPA HILDA Ruc: 10024198915 AV. TARAPACA NRO. 1801 URB. EDIFICADORES ALTO MISTI - MIRAFLORES - AR</p> <hr/> <p>BOLETA DE VENTA ELECTRÓNICA B002 - 00009250</p> <p>Cliente: CONTADO Direccion:</p> <p>Núm Doc: 10000001 Fecha de Emision: 4/08/2021 4:44:23 p. m. Vendedor: ADMINISTRADOR Placa: V1X-354</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Descrip</th> <th>Cant</th> <th>V. U.</th> <th>Total</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GASOHOL 90 PLUS</td> <td>2.020 GLL</td> <td>15.05</td> <td>30.40</td> </tr> </tbody> </table> <p>Total Gravado: S/. 25.76 I.G.V. 18 % S/. 4.64 TOTAL : S/. 30.40</p> <p>TREINTA CON 40/100 SOLES Consulte su comprobante en la siguiente dirección: https://www.nubefact.com/cpe/c36d477c-8f20-474c-b75a-46bfc2f69073 aceptada_por_s</p>	Descrip	Cant	V. U.	Total	GASOHOL 90 PLUS	2.020 GLL	15.05	30.40
Descrip	Cant	V. U.	Total														
GASOHOL 90 PLUS	2.977 GLL	15.05	44.80														
Descrip	Cant	V. U.	Total														
GASOHOL 90 PLUS	2.020 GLL	15.05	30.40														