

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

**MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ADAPTADO PARA FUNCIONAR CON
HIDRÓGENO AUTOGENERADO MEDIANTE ELECTRÓLISIS.**

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Técnico Universitario en
MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Alumno:

José Alejandro Chávez Marín

Profesor Guía:

Roberto Leiva-Illanes

2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por darme la fuerza de no rendirme durante el largo camino dedicado a este trabajo, a mi familia por ser un pilar fundamental en mi educación y valores, y especialmente a Mariana mi compañera de vida por su amor y apoyo.

RESUMEN

keywords: Hidrógeno - Electrólisis - Generadores de hidrógeno - Combustibles alternativos.

Hoy en día la experimentación por parte de las grandes industrias automotrices internacionales, en su búsqueda por reducir la huella de carbono, se ha enfocado en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan utilizar combustibles alternativos a los fósiles. Estas tecnologías desarrolladas por los fabricantes apuntan a la elaboración de motores eléctricos y el uso del hidrógeno como combustible.

En el capítulo uno de este trabajo se realizó una revisión y recopilación de información documentada sobre los usos del hidrógeno, en el capítulo dos se explica la elaboración de un sistema piloto que consiste en un motor de combustión interna que utiliza como combustible hidrógeno gaseoso obtenido mediante la electrólisis del agua, la cual disocia la molécula de agua utilizando un flujo de electricidad, para así obtener hidrógeno y oxígeno en forma de gas.

Para la alimentación del anteriormente mencionado sistema, se fabricaron dos generadores de hidrógeno, uno de tipo seco y el otro tipo húmedo, luego de perfeccionar ambos generadores, se llegó a la decisión de usar ambos. El caudal generado por ambos se midió a través de un medidor volumétrico de caudal, arrojando una producción de gas de 25.4 [ml/s].

En el tercer capítulo a través de los ensayos se llegó al resultado de que el sistema desarrollado permite el arranque del motor, pero no mantenerlo en funcionamiento por más de 8 [s], esto debido a que la producción de combustible no satisface la demanda del motor, durante este capítulo se explicará porque funciona tal tiempo, junto con los problemas que posee el sistema y posibles soluciones.

Una solución que se planteó en el trabajo fue la elaboración de un sistema de almacenaje, que permite acumular una parte del gas producido, aproximadamente 1.5 [L], utilizando este acumulador se logró aumentar el tiempo de funcionamiento del motor de 3 [s] a 8 [s].

Por lo obtenido a partir de las pruebas realizadas incluyendo los resultados de otras pruebas ajenas a las de este trabajo, existen tres posibles soluciones para lograr mantener al motor de combustión interna funcionando de forma continua, una es utilizar un motor de menor cilindrada al utilizado (110 cm^3) en donde su demanda de combustible sea igual a la producción del combustible, otra es aumentar la producción de combustible, para lograr esto se debe aumentar el área de contacto de las placas con el electrolito además de aumentar la energía suministrada, y por último el aumento del tamaño del acumulador para que de esta forma se pueda almacenar una mayor cantidad de combustible.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	2
CAPÍTULO 1: HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE	3
1.1. ASPECTOS GENERALES DEL HIDRÓGENO	5
1.2. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO.....	5
1.2.1. Inflamabilidad	5
1.2.2. Energía mínima de la chispa para encender el hidrógeno	6
1.2.3. Temperatura de autoignición	7
1.2.4. Otras propiedades.....	7
1.3. RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA AIRE/COMBUSTIBLE DEL HIDRÓGENO	8
1.4. CONSIDERACIONES PARA TRABAJAR CON HIDRÓGENO.....	9
1.5. OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO.....	10
1.5.1. Reformado de vapor a partir de gas natural	11
1.5.2. Oxidación parcial catalítica de hidrocarburos	11
1.5.3. Electrólisis del agua.....	11
1.6. USOS DEL HIDRÓGENO	12
1.7. HIDRÓGENO Y APLICACIÓN VEHICULAR	12
1.8 ACUMULACIÓN DE HIDRÓGENO.....	14
1.8.1. Acumulación de hidrógeno en vehículos.....	15

1.9	ENSAYO ANTERIOR DE ADICIÓN DE HIDRÓGENO GASEOSO A MOTOR CICLO OTTO CON INYECCIÓN ELECTRÓNICA	15
1.10	INVESTIGACIÓN ANTERIOR SOBRE UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO COMO FUENTE DE COMBUSTIBLE PARA MOTOR DE COMBUSTION INTERNA	16
1.10.1	Obtención de hidrógeno para el ensayo	16
1.10.2	Producción de gas	17
1.10.3	Adición de hidrógeno a motor de combustión interna	17
	CAPÍTULO 2: OBTENCIÓN Y SUMINISTRO DEL HIDRÓGENO UTILIZADO EN EL SISTEMA	21
2.1.	OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO PARA EL SISTEMA	23
2.2.	MATERIALES NECESARIOS PARA ELABORACIÓN DEL GENERADOR HÚMEDO	23
2.2.1.	Disposición eléctrica de las placas	23
2.3.	EXPLICACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS.....	24
2.3.1.	Depósito hermético.....	24
2.3.2.	Placas de acero inoxidable 316L.....	24
2.3.3.	Electrolito.....	25
2.4.	CONSIDERACIONES	25
2.5.	ARMADO DE GENERADOR TIPO HÚMEDO.....	25
2.6.	GENERADOR DE HIDRÓGENO TIPO SECO	28
2.6.1.	Materiales necesarios para construir generador de hidrógeno tipo seco	28
2.7.	ARMADO DE GENERADOR TIPO SECO	28

2.8.	DEPÓSITO DE AGUA	31
2.9.	MEDICIÓN DE CAUDAL DE LOS GENERADORES.....	33
2.10.	CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN MASA.....	35
2.11.	COMPARACIÓN ENTRE GENERADORES.....	36
2.12.	MEJORA DE GENERADOR TIPO SECO.....	38
2.13.	MEJORAS DEL GENERADOR TIPO HÚMEDO	38
2.14.	COMPARACIÓN ENTRE GENERADORES, SEGUNDA VERSIÓN.....	39
2.15.	ALMACENAJE DE HÍDRÓGENO.....	40
2.15.1	Explicación del funcionamiento del acumulador.....	40
2.16.	EXPLICACIÓN DEL SISTEMA	42
CAPÍTULO 3: ENSAYO Y RESULTADOS.....		47
3.1.	MOTOR SELECCIONADO	49
3.2.	ELECCIÓN DEL MOTOR.....	49
3.3.	PRUEBAS DE GENERADORES DE HIDRÓGENO	50
3.4.	UTILIZACIÓN DEL CARBURADOR PARA SUMINISTRAR HIDRÓGENO	51
3.5.	SUMINISTRO DE HIDRÓGENO EN COLECTOR DE ADMISIÓN	53
3.5.1.	Suministro de hidrógeno en el colector de admisión con producción deambos generadores.....	54
3.6.	MOTOR TRABAJANDO CON ACUMULACIÓN DE HIDRÓGENO.	55

3.7. CANTIDAD NECESARIA DE HIDRÓGENO PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR	55
3.8. RENDIMIENTO ENERGÉTICO DEL GENERADOR DE HIDRÓGENO	56
3.9. INCONVENIENTES DEL SISTEMA.....	58
3.9.1 Utilización de motor de menor cilindrada	59
3.9.2 Aumento de la producción de hidrógeno.....	59
3.9.3 Aumento de la acumulación de hidrógeno.....	59
3.10 ORIENTACIÓN A TRABAJOS FUTUROS.....	60
CONCLUSIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS.....	68
ANEXO 1: LISTA DE MATERIALES UTILIZADOS PARA ELABORACIÓN DE GENERADOR DE HIDRÓGENO TIPO HÚMEDO	69
ANEXO 2: LISTA DE MATERIALES UTILIZADOS PARA ELABORACIÓN DE GENERADOR DE HIDRÓGENO TIPO SECO.....	70
ANEXO 3: DATOS TECNICOS DEL MOTOR A UTILIZAR.....	71
ANEXO 4: COSTOS.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1. TABLA DE ENERGÍA MÍNIMA DE LA CHISPA PARA ENCENDER HIDRÓGENO	7
TABLA 1-3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL HIDRÓGENO.....	8

TABLA 1-4. NORMA DE EMISIONES APLICADA EN REVISIÓN TÉCNICA EN CHILE	13
TABLA 1-5. COMPARACIÓN DE EMISIONES DE GASES PRODUCIDA POR EL MOTOR FUNCIONANDO CON GASOLINA VS HIDRÓGENO	18
TABLA 2-1 DATOS DE PRODUCCIÓN DE AMBOS GENERADORES.....	34
TABLA 2-2. COMPARACIÓN DE AMBOS GENERADORES, PRIMERAS VERSIONES.....	37
TABLA 2-3 COMPARACIÓN DE AMBOS GENERADORES, SEGUNDAS VERSIONES.....	39
TABLA 3-1. DATOS DE LOS GENERADORES UTILIZADOS EN EL ENSAYO	50

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1-1. MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	10
---	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1. COMPARACIÓN DE DISTINTOS COMBUSTIBLES SOBRE SUS LÍMITES DE INFLAMABILIDAD, MEZCLADOS CON AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	6
FIGURA 1-2. DISPOSICIÓN ELÉCTRICA DE GENERADOR HÚMEDO DE HIDRÓGENO	17
FIGURA 2-1. DISPOSICIÓN ELÉCTRICA UTILIZADA	24
FIGURA 2-2. PLACAS UTILIZADAS EN GENERADOR HÚMEDO	26
FIGURA 2-3. SEPARACIÓN ENTRE PLACAS	26

FIGURA 2-4 DISPOSICIÓN ELÉCTRICA DE LAS PLACAS	27
FIGURA 2-5. GENERADOR HÚMEDO.....	27
FIGURA 2-6. GENERADOR SECO	28
FIGURA 2-7. PLACAS UTILIZADAS EN GENERADOR TIPO SECO	29
FIGURA 2-8. TAPAS DE ACRÍLICO DE GENERADOR TIPO SECO.....	30
FIGURA 2-9. INSTALACIÓN DE SELLO DE GOMA SOBRE TAPA DE ACRÍLICO.....	30
FIGURA 2-10. INSTALACIÓN PRIMERA PLACA NEGATIVA.....	31
FIGURA 2-11. TAPA DE DEPÓSITO DE AGUA	32
FIGURA 2-12. DEPÓSITO DE AGUA DEL SISTEMA.....	32
FIGURA 2-13. DEPÓSITO DE AGUA FINALIZADO	32
FIGURA 2-14. ELEMENTO RUDIMENTARIO PARA MEDICIÓN DE PRODUCCIÓN	33
FIGURA 2-15. VISTA SUPERIOR ELEMENTO RUDIMENTARIO PARA MEDICIÓN DE PRODUCCIÓN	33
FIGURA 2-16. PUNTOS DE SUJECCIÓN Y CONEXIÓN DE LAS PLACAS DAÑADO TRAS AUMENTO DE TEMPERATURA.....	36
FIGURA 2-17. GENERADOR TIPO SECO MODIFICADO PARA AUMENTAR SU PRODUCCIÓN.	38
FIGURA 2-18. SEGUNDA VERSIÓN DE GENERADOR HÚMEDO.....	39
FIGURA 2-19. ELEMENTOS QUE COMPONEN EL ACUMULADOR DE GAS	40

FIGURA 2-20. EXPLICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL ACUMULADOR DE GAS.....	41
FIGURA 2-21. DISPOSICIÓN GENERAL DE LOS EQUIPOS; 1 GENERADOR DE HIDROGENO, 2 DEPÓSITO DE AGUA, 3 BURBUJEADOR, 4 VÁLVULA DE PASO DE GAS, 5 ACUMULADOR DE GAS, 6 ARRESTA LLAMA , 7 CARBURADOR.....	42
FIGURA 2-22. BURBUJEADOR, SISTEMA DE SEGURIDAD	43
FIGURA 2-23. VÁLVULA DE PASO DE GAS.....	43
FIGURA 2-24. ACUMULADOR DE GAS.	44
FIGURA 2-25. CORTA LLAMA.....	44
FIGURA 2-26. INTERIOR CORTA LLAMA.....	45
FIGURA 2-27. CARBURADOR	45
FIGURA 3-1. MOTOR UTILIZADO	49
FIGURA 3-2. PLACA POSITIVA, GENERADOR HÚMEDO.....	51
FIGURA 3-3. CONEXIÓN TIPO “T” DE GAS Y GASOLINA 93 OCTANOS	52
FIGURA 3-4. PERNO DE VACIADO DE LA CUBA	53
FIGURA 3-5. INGRESO DE COMBUSTIBLE MEDIANTE VACÍO EN COLECTOR DE ADMISIÓN.....	54

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

Sigla

H ₂ O	: Fórmula química del agua
O ₂	: Fórmula química del oxígeno
H ₂	: Fórmula química del hidrógeno
N ₂	: Fórmula química del nitrógeno
CO ₂	: Fórmula química del dióxido de carbono
CO	: Fórmula química del monóxido de carbono
NO _x	: Fórmula química del nitróxido
CH ₄	: Fórmula química del Metano
HC	: Hidrocarburos
R.A.C	: Relación aire-combustible
MAP	: Manifold Absolute Presion (Presión absoluta del múltiple de admisión sensor)
EGR	: Exhaust Gas Recirculation (Recirculación de gases de escape)
RPM	: Revoluciones por minuto
PPM	: Partes por millón
PVC	: Policloruro de vinilo
ISO	: Organización Internacional de la estandarización
SI	: Sistema internacional de unidades
MECH	: Motor encendido por chispa

Simbología

P	: Presión (atm)
V	: Volumen (L)
T	: Temperatura (K)
n	: Moles de gas
R	: Constante universal de los gases ideales
be	: Consumo específico
Pe	: Potencia efectiva
PCI	: Potencia del combustible inferior
ρ	: Densidad
P_{comb}	: Potencia del combustible
\dot{M}	: Flujo másico
η_{gen}	: Rendimiento

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha vuelto muy importante el cuidado del medio ambiente, por esto el presente trabajo explica la utilización de hidrógeno como sustituto de los combustibles derivados del petróleo, para ir en búsqueda de resolver los problemas de emisión de gases producidos por los motores de combustión interna, especialmente a motores ciclo Otto (MECH) siendo éstos los mayormente utilizados en vehículos de turismo y de transporte, si bien tienen la posibilidad de satisfacer todas las necesidades de transportes y traslado de carga liberan residuos producto de la combustión que resultan ser contaminantes tales como el dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos y nitróxidos. Siendo uno de estos un gas de efecto invernadero (CO_2) y de ser responsable de creación de lluvias ácidas (NO_x), además de ser riesgoso para la salud [1].

La sumatoria de todos los vehículos en funcionamiento generan un aporte del 23 % a la contaminación ambiental [2], aun cumpliendo con la normativa sobre emisiones por las cuales se rigen los países.

Cabe además mencionar que la producción y utilización de motores de combustión interna va al alza, y por ende el uso de combustibles fósiles. Teniendo en cuenta que la producción mundial de automóviles al año 2016 creció un 5 %, llegando a la producción de 93.9 millones de vehículos fabricados [3].

OBJETIVOS

1) Objetivo general:

Desarrollar un prototipo que permita producir y almacenar hidrógeno en un motor encendido por chispa (MECH).

2) Objetivos específicos:

- Construir dos generadores de hidrógeno de forma piloto para producir hidrógeno.
- Acoplar el sistema de producción de hidrógeno en un motor disponible para este efecto.
- Construir un prototipo de un sistema de almacenaje de hidrógeno.

CAPÍTULO 1: HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

1.1. ASPECTOS GENERALES DEL HIDRÓGENO

La norma ISO/TR 15916 [4] describe al hidrógeno como el elemento más abundante en el universo, siendo un 75 % de la masa total, se puede hallar en la mayoría de los compuestos. Este elemento se encuentra en grandes proporciones en estrellas, jugando un papel fundamental en la combustión de ellas. En el universo, el hidrógeno se encuentra en estado de plasma.

Este elemento se encuentra generalmente en compuestos, como, por ejemplo H_2 en el caso de hidrógeno puro, H_2O en el caso del agua, o cualquier compuesto de elementos orgánicos unido a átomos de carbono, en resumen, los átomos de hidrógeno se encuentran unidos a otros, por lo cual, si se necesita utilizar hidrógeno puro debe ser separado de los compuestos, para lograr esto existen distintas formas que serán explicadas en el ítem 1.5.

1.2. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno es un elemento incoloro, inodoro, insípido y no tóxico, tiene una densidad de $0.0899 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ [5] en su estado gaseoso bajo las características de presión atmosférica (101 [kPa]) y temperatura ambiente ($20 \text{ [}^\circ\text{C]}$), que lo convierte en el elemento con menor densidad conocido.

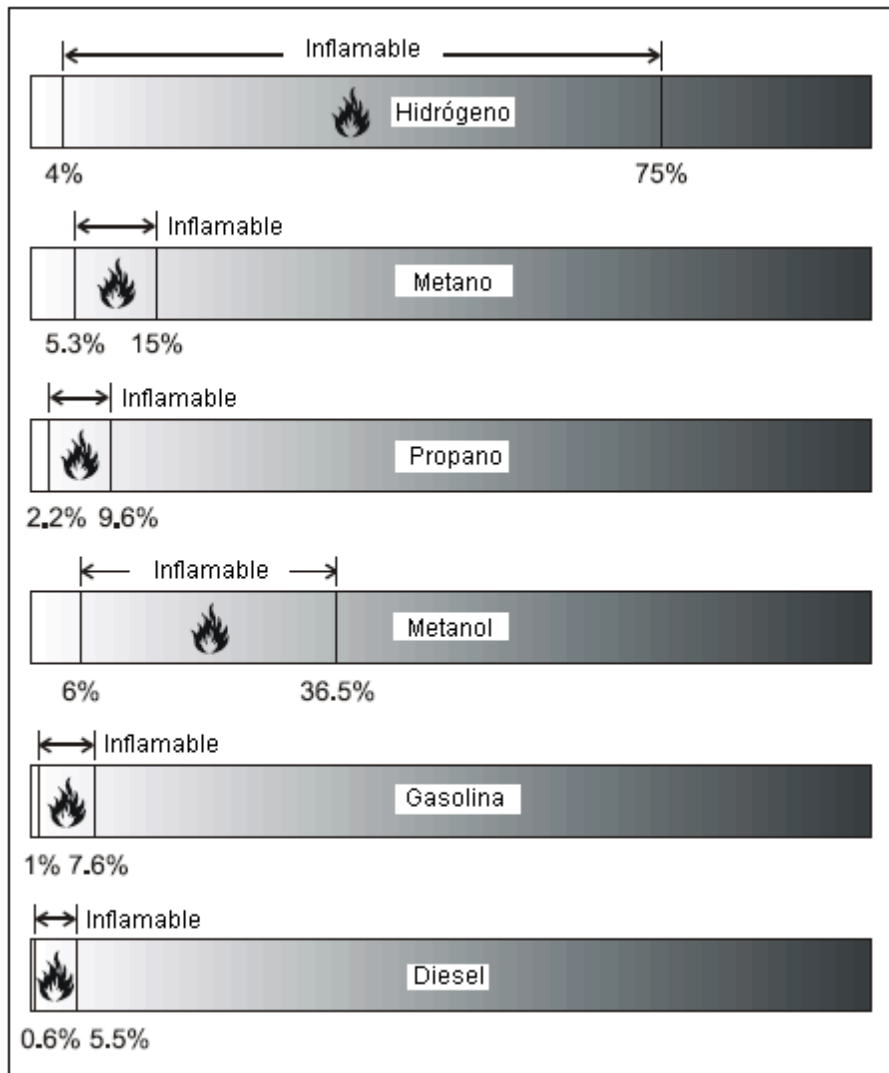
1.2.1. Inflamabilidad

El hidrógeno para poder combustionar necesita una fuente de energía externa, para que esto se produzca son necesarias tres situaciones:

- Que el hidrógeno se mezcle con un oxidante.
- Que la mezcla este dentro de los límites de inflamabilidad.
- Una fuente externa de ignición que entregue la energía requerida para que este encienda.

Los límites de inflamabilidad del hidrógeno considerando la presión atmosférica a nivel del mar (101.3 [kPa]) y a una temperatura ambiente, están en el rango de 4.1 % a 74.8 % de concentración volumétrica de hidrógeno en el aire, este dato varía si se encuentra mezclado con oxígeno, siendo de 4.1% a 94 %, [6] una presión inferior a la mencionada tiende a estrechar el rango de inflamabilidad, reduciendo el límite superior y

aumentando el límite inferior, en la Figura 1-1. Comparación de distintos combustibles sobre sus límites de inflamabilidad, mezclados con aire a presión atmosférica, se puede apreciar una comparación de los límites de inflamabilidad de distintos combustibles, siendo los porcentajes la concentración en volumen del combustible en el aire.



Fuente: Hidrógeno, aplicación en motores de combustión interna.[6]

Figura 1-1. Comparación de distintos combustibles sobre sus límites de inflamabilidad, mezclados con aire a presión atmosférica.

1.2.2. Energía mínima de la chispa para encender el hidrógeno

La energía necesaria para quemar el hidrógeno varía según la presión reinante en el ambiente, dependiendo de si se encuentra mezclada con aire u oxígeno, la Tabla 1-1 Tabla de energía mínima de la chispa para encender hidrógeno, entrega datos de aporte de

energía mínima requerida para encender el hidrógeno dependiendo de la presión del medio.

Tabla 1-1. Tabla de energía mínima de la chispa para encender hidrógeno

Energía mínima de la chispa (mJ)	Presión (kPa)
0.017	101.3
0.09	5.1
0.56	2.03

Fuente: Energética del hidrógeno: contexto, estado actual y perspectiva de futuro.[7]

Como se puede observar la energía mínima requerida para una quema del hidrógeno es baja en comparación a otros combustibles donde la energía mínima de ignición bajo la presión de 101.3 [kPa] rodea el 0.25 [mJ] [8], debido a que este aporte energético puede ser entregada por distintas fuentes comunes, como por ejemplo: pequeño arco eléctrico, cerilla de fósforo, una superficie caliente, cigarrillo encendido, hasta electricidad estática del cuerpo humano, este último punto da énfasis a las medidas de seguridad que se deben aplicar para manipular este combustible y/o sistemas que operen con este gas.

1.2.3. Temperatura de autoignición

Se define temperatura de autoignición a la temperatura mínima necesaria para encender una mezcla de combustible y aire, a una presión determinada, la autoignición es dependiente de la presión existente, para una mezcla de hidrógeno-aire a una presión de 101.3 [kPa] (presión atmosférica a nivel del mar) es necesario una temperatura entre 773 [K] a 850 [K] [7], sin embargo, en un ambiente donde las presiones son mayores en comparación a la presión atmosférica las temperaturas de autoignición disminuyen.

1.2.4. Otras propiedades.

En la Tabla 1-3, propiedades físicas del hidrógeno, se puede apreciar algunas propiedades que posee el hidrógeno tales como: su poder calorífico, la temperatura que posee su combustión, la velocidad con la que detona y combustiona, la velocidad con la que se propaga el gas a través del aire, su peso molecular y punto de ebullición.

Tabla 1-3. Propiedades físicas del hidrógeno

Poder calorífico superior	141 MJ/kg
Poder calorífico inferior	119 MJ/kg
Temperatura de la llama	2318 K
Velocidad de detonación	1.48 - 2.15 km/s
Velocidad de combustión	265 - 325 cm/s
Velocidad de difusión en el aire	2 cm/s
Peso molecular	2.02 g/mol
Punto de ebullición	20.3 K

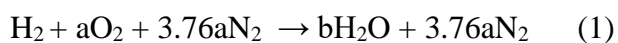
Fuente: agua, combustible alternativo. Una aplicación [5]

1.3. RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA AIRE/COMBUSTIBLE DEL HIDRÓGENO

La relación aire combustible (RAC) estequiométrica permite identificar la cantidad de aire que se necesita para realizar una combustión completa, es decir quemar toda la cantidad de combustible, lo que es útil para obtener un mejor provecho de la energía.

Esta RAC estequiométrica es una proporción de volumen o masa entre el aire y el combustible, donde se expresa la cantidad de aire que se necesita para realizar una combustión completa por unidad de combustible. Se denomina mezcla pobre al caso que se da cuando existe un exceso de oxígeno en la mezcla aire-combustible y rica cuando ocurre lo contrario, es decir, un déficit de oxígeno en comparación a la RAC estequiométrica.

El cálculo de la RAC estequiométrica del Hidrógeno está basado en la siguiente expresión:



donde:

H_2 = combustible.

$a\text{O}_2 + 3.76aN_2$ = Aire.

$b\text{H}_2\text{O} + 3.76aN_2$ = gases de escape.

RAC:

$$\text{RAC} = \frac{\text{aire}}{\text{combustible}} \quad (2)$$

$$\text{RAC} = \frac{\text{Oxígeno} + \text{Nitrógeno}}{\text{Hidrógeno}} \rightarrow \frac{34.64}{1}$$

La relación aire combustible estequiométrica del hidrógeno es de 34.64: 1, en otras palabras, quiere decir que para realizar una combustión completa es necesario 34.64 [kg] de aire por cada 1 [kg] de hidrógeno, dentro de este ensayo no pudo ser controlada la RAC, sin embargo, se utilizó el sistema de alimentación que posee el motor de forma estándar, el que está conformado por un carburador, éste aunque no puede controlar la cantidad de combustible que ingresa al motor es útil para controlar la aceleración del motor, mediante las regulaciones que posee.

Para poder controlar la RAC es necesario implementar un sistema de dosificación para gas, como son los aplicados para equipos de gas licuado de petróleo (GLP), donde el suministro puede ser mediante un sistema mecánico o de inyección electrónica, tal como se indica por BRANTT, FARÍAS [5].

1.4. CONSIDERACIONES PARA TRABAJAR CON HIDRÓGENO

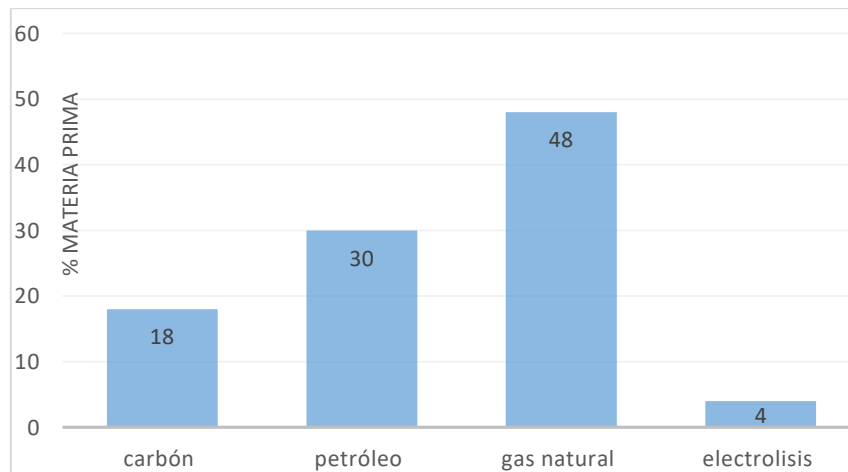
Con todo lo expuesto anteriormente, se debe tener en cuenta que el hidrógeno al mezclarse con el aire es explosivo; puede ser encendido con un bajo aporte energético, además de poseer un gran rango de inflamabilidad, por lo cual, es indispensable que no existan fugas, este elemento es indetectable para los sentidos humanos, debido a esto se recomienda utilizar un sensor que detecte concentración de hidrógeno. Se debe trabajar en espacios abiertos o ventilados donde no pueda ser acumulado el gas tras una posible fuga, considerando que por la baja densidad el hidrógeno tiende a acumularse en las partes superiores de una habitación; este combustible no es tóxico para el ser humano, sin embargo una gran concentración de hidrógeno genera un déficit de oxígeno, generando asfixia, considerando que una atmósfera que contenga cifras inferiores al 19.5 % de concentración volumétrica de oxígeno se considera ineficiente para respirar, todo esto está contemplado en la ISO/TR 15916 del año 2015 [4].

1.5. OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO

Como se mencionaba, el hidrógeno se encuentra unido a otros elementos, por lo que es necesario separarlo de estos para obtenerlo, esto se logra principalmente a través de los siguientes procesos:

- Reformado a vapor a partir de gas natural.
- Oxidación parcial catalítica de hidrocarburos.
- Electrólisis del agua.

El Gráfico 1-1. Materias primas utilizadas para la producción de hidrógeno, muestra el uso de las materias primas para la producción de hidrógeno, mostrando el porcentaje de uso de cada una, siendo la producción de hidrógeno a través del reformado a vapor a partir de gas natural el más utilizado y la electrólisis el menos utilizado. Estos datos son del año 2009, sin embargo, en la actualidad (2019) el escenario no ha cambiado de forma considerable



Fuente: evaluación técnico económica de una planta. [9]

Gráfico 1-1. Materias primas utilizadas para la producción de hidrógeno

1.5.1. Reformado de vapor a partir de gas natural

Este proceso es el más utilizado en la actualidad, consiste en exponer al gas natural, metano y etano, a vapor de agua a alta temperatura (700 – 1000 [°C]) [10], de lo cual se obtienen hidrógeno y dióxido de gas natural, gas de refinería. El proceso se lleva a cabo mediante dos reacciones, la primera es la reacción de reformado al vapor entre el agua y el metano: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{H}_2 + \text{CO}$ (3)

La primera etapa se desarrolla a altas temperaturas (700 – 1000 [°C]) y la segunda es un enfriamiento del gas resultante, lo que elimina el monóxido de carbono, luego se requiere realizar un procedimiento de limpieza, obteniendo como resultado hidrógeno puro (H_2). Esta forma de obtener hidrógeno libera altas cantidades de moléculas de carbono, debido que para su funcionamiento se requiere como materia prima la utilización de gas natural, el cual es un combustible fósil.

1.5.2. Oxidación parcial catalítica de hidrocarburos

Este proceso consiste en oxidar parcialmente gas natural, pueden ingresar otros hidrocarburos fósiles en presencia de catalizadores en donde el agente oxidante puede ser aire, aire enriquecido con oxígeno u oxígeno puro, este proceso se desarrolla a temperaturas entre 1300 y 1500 [°C] [10], tiene como ventaja que se pueden utilizar cualquier tipo de combustible fósil, ya sea líquido o gaseoso, al contrario del proceso de reformado del vapor de gas natural, sin embargo, al igual que el proceso descrito anteriormente, produce emisiones de dióxido y monóxido carbono.

1.5.3. Electrólisis del agua

Este procedimiento consiste en ingresar electricidad (corriente continua) al agua más un elemento ionizante que permita la conductividad eléctrica, lo que se denomina electrolito, provocando una reacción química que desarma la molécula del agua, generando H_2 y O_2 ($2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$) (4).

Es el proceso más sencillo de conseguir hidrógeno, debido a que se puede realizar con materiales accesibles, sin la necesidad de obtener complicadas tecnologías, sin embargo, se requiere una gran cantidad de energía eléctrica, aunque en procesos en donde

el agua se encuentra a elevadas temperaturas 700 °C- 1000 °C, la electrólisis posee un mayor rendimiento energético [11].

Para la electrólisis del agua se requiere un ánodo, un cátodo (una conexión negativa y una conexión positiva) y electrólito con buena conductividad iónica, como el agua salada, para que de esta forma exista un flujo de electricidad. Este procedimiento no causa emisiones de carbono a diferencia de los métodos explicados con anterioridad.

1.6. USOS DEL HIDRÓGENO

Uno de sus primeros usos, a nivel mundial, fue como relleno gaseoso para globos aerostáticos debido a la poca densidad del hidrógeno, lo cual tendía a escaparse de la gravedad de la tierra, haciendo elevar la nave; el hidrógeno era obtenido mediante la reacción de ácido sulfúrico-hierro. Sin embargo, los peligros de utilizar este gas se hicieron notar en el accidente producido el 6 de mayo de 1937 donde el Zeppelin alemán LZ Hidenburg sufrió una explosión producto de un incendio en el interior de él al momento de aterrizar, a partir de este momento se deja de utilizar el hidrógeno para el funcionamiento de los Zeppelines siendo remplazado por helio [12].

Actualmente el hidrógeno es utilizado en distintos procesos químicos, como la producción de amoníaco para fertilizantes, en refinerías de petróleo con el fin de purificar los combustibles, producción de ácido clorhídrico, la reducción de minerales metálicos. Y también es utilizado como el combustible para cohetes siendo este el uso más significativo; puede ser utilizado tanto como sólido o líquido, se prefiere este combustible en vez de otro debido a que 1 [kg] de hidrógeno posee un aporte energético mayor que 1 kg de algún derivado del petróleo, teniendo en cuenta que el poder calorífico inferior (energía liberada al oxidarse el combustible) del hidrógeno es de 119000 [kJ/kg] en cambio el del petróleo bruto es de 40895 [kJ/kg],

1.7. HIDRÓGENO Y APLICACIÓN VEHICULAR

El uso del hidrógeno como combustible es algo más antiguo de lo que parece, se remonta al año 1820, donde científicos buscaban un remplazo para el motor a vapor, el reverendo W. Cecil es uno de los primeros en desarrollar motores de combustión interna, [13] donde logro quemar un combustible gaseoso (hidrógeno) dentro de un cilindro empujando un émbolo, obteniendo de este modo energía mecánica, esta idea fue tomada

por otros investigadores teniendo como resultado el llamado “ciclo Otto”, siendo este el actual ciclo termodinámico aplicado en la mayoría de motores de combustión interna; la utilización del hidrógeno fue remplazada por la gasolina, ya que es más sencillo trabajar con ella y su acumulación (debido a presentarse en estado líquido a temperatura ambiente), además el fácil acceso a ella en comparación a la obtención de hidrógeno y los avances tecnológicos de la época llevaron a que la utilización de la gasolina fuera más segura que la del hidrógeno.

Sin embargo, con el correr del tiempo, a finales de los años 60 [14] la quema de gasolina en los motores de combustión interna produjo una gran contaminación ambiental, lo cual llevo a las compañías fabricantes a diseñar sistemas que redujeran las emisiones de gases contaminantes, esto se logró debido a la implementación de sistemas de inyección electrónica y procesos post combustión, reduciendo en gran cantidad los residuos de la combustión provenientes del motor, la que se ve reflejada en la tabla 1-4, norma de emisiones contaminante, donde se muestra la cantidad de emisiones permisibles para vehículos según los años de usos, a medida que va pasando el tiempo las tecnología sobre control de emisiones van mejorando, esto se puede evidenciar según la norma de emisiones[15]. Aunque la gran utilización de combustibles fósiles sigue aportando una cantidad considerable de contaminación al ambiente, lo que ha fomentado la investigación en búsqueda de una solución a este problema, y producto de esto es que se ha considerado la utilización del hidrógeno como combustible y el uso de motores eléctricos como sustitutos de los combustibles a base de carbono.

Tabla 1-4. Norma de emisiones aplicada en revisión técnica en Chile

Años de uso del vehículo	% máximo de CO	Contenido máximo de HC [PPM]
13 y mas	4.5	800
12 a 7	4.0	500
6 y menos	4.0	300

Fuente: DTO 131,TRANSPORTES Art. primero N° 1 D.O. 13.03.2002 [15]

La utilización del hidrógeno como combustible y los motores eléctricos han sido rechazadas en la antigüedad debido a la escasez de tecnología que existía, pero con los avances generados en la actualidad, se han vuelto a considerar como opciones factibles,

por una parte los motores eléctricos poseen la ventaja de tener una eficiencia muy alta, rodeando el 90% [16], a diferencia de un motor de combustión interna que posee un rendimiento energético entre un 20 % a un 30 % en el caso de motores ciclo Otto, en cambio motores ciclo Diesel poseen un rendimiento mayor entre un 30 % a un 45 % [17].

Por otro lado, la combustión de hidrógeno disminuye considerablemente las emisiones contaminantes, reduciendo a cero la cantidad de dióxido y monóxido de carbono liberado, aunque posee emisiones de nitróxidos, lo que no es problema para este sistema debido a que puede ser tratado con procesos hoy existentes de post combustión, sin embargo, se necesita un gran consumo de potencia eléctrica, lo que es explicado en el punto “3.8. rendimiento energético del generador seco de hidrógeno”, lo que hace que sea poco atractivo debido al costo requerido para manipular aquella tecnología de forma rentable. Sin embargo, se ha descubierto que realizar el proceso inverso de la electrolisis, es decir, ingresar hidrógeno y oxígeno dentro de una celda de combustible, produce electricidad, la cual puede ser utilizada en un motor eléctrico. Este procedimiento es la tecnología que actualmente se estudia [18], debido a que soluciona el problema de falta de autonomía que conlleva el uso de baterías en los vehículos eléctricos, además de eliminar el uso de estos acumuladores de electricidad, y con esto reducir la contaminación producto de su utilización, otra ventaja es que la celda de combustible no debe ser remplazada al contrario del caso de las baterías, que se desgastan según su uso [19].

1.8 ACUMULACIÓN DE HIDRÓGENO

Debido a la baja densidad que posee el hidrógeno la acumulación a presión atmosférica ocuparía un gran volumen, por lo que para realizar acumulación se almacena como gas comprimido o líquido criogénico, de esta forma aumenta la densidad de este elemento, provocando que se aproveche el espacio reduciendo el tamaño de los acumuladores.

Las tecnologías actuales permiten acumular el hidrógeno como gas comprimido entre presiones de 350 kPa a 700 kPa, se debe tener en cuenta que el hidrógeno a grandes presiones puede disolver el carbono que posee los metales, por lo que los estanques deben ser recubierto por fibra de vidrio, fibras de aramida o fibras de carbono sobre acero.

1.8.1. Acumulación de hidrógeno en vehículos

El vehículo Honda FCX Clarity [20], uno de los automóviles a hidrógeno más populares en la actualidad circula con hidrógeno puro, este combustible en vez de ser quemado es utilizado para generar electricidad mediante el uso de celdas de combustible, con lo que se alimenta un motor eléctrico.

Posee un tanque de combustible que almacena el elemento, aproximadamente 15 litros de hidrógeno que tiene de capacidad, proporcionando una autonomía de 435 kilómetros.

El sistema de seguridad que posee este automóvil trata del uso de sensores que advierten al percibir concentración de hidrógeno en caso fuga. Si esto llegase a ocurrir, el sistema de ventilación se activa, y se cierra las válvulas principales del suministro del tanque de hidrógeno.

Las líneas de alto voltaje están eléctricamente aisladas. Por lo cual, en caso de una colisión, el controlador del sistema corta automáticamente el suministro de hidrógeno y la corriente eléctrica.

1.9 ENSAYO ANTERIOR DE ADICIÓN DE HIDRÓGENO GASEOSO A MOTOR CICLO OTTO CON INYECCIÓN ELECTRÓNICA

Uno de los primeros trabajos desarrollados en la Sede José Miguel Carrera [21] tuvo como fin realizar pruebas de adición de hidrógeno a la mezcla aire-gasolina (97 octanos). Estas pruebas se enfocaron en observar las variables que genera la quema de hidrógeno y verificar si el uso de ambos combustibles trabajando en conjunto reduce el consumo de gasolina, además de identificar los efectos que conlleva operar con ambos combustibles de forma simultánea, para esto se utilizó un vehículo analizado a través de un freno dinamométrico, tipo rodillo, permitiendo ver torque, potencia y consumo de combustible.

Para poder realizar esta operación se debió realizar modificaciones en el sistema de adquisición de datos del motor, esto se logró alterando la señal del sensor MAP, variando la resistencia de éste para que de este modo la computadora se vea engañada,

obligándola a realizar dosificaciones menores de gasolina a las correspondientes, y así suplir la mezcla con el hidrógeno. El gas fue ingresado al motor mediante una conexión de vacío en el múltiple de admisión.

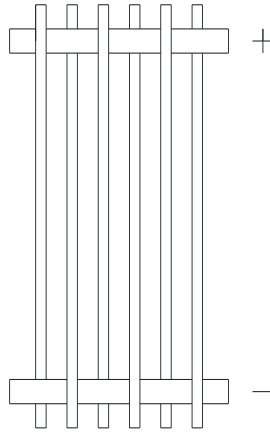
De este ensayo se pudo observar que la combinación de ambos combustibles, reducía las prestaciones del motor trabajando de forma estándar (con 97 octanos), debido a las diferencia de propiedades, principalmente por su inflamabilidad, y los distintos puntos de detonación que poseen, explicados anteriormente, teniendo en cuenta que se combustionan a temperaturas y presiones diferente, lo que genera que un combustible combustione antes que el otro provocando así varios frente de llamas dentro del cilindro; lo que se traduce en detonaciones, y conllevaría a un desgaste prematuro del motor, reducción de la potencia, disminución del torque, y aumento de emisiones contaminantes, lo que lleva a concluir que se debe descartar la utilización de ambos combustibles dentro de un motor de combustión interna.

1.10 INVESTIGACIÓN ANTERIOR SOBRE UTILIZACIÓN DE HIDRÓGENO COMO FUENTE DE COMBUSTIBLE PARA MOTOR DE COMBUSTION INTERNA

Otro trabajo desarrollado en la sede tuvo como objetivo experimentar utilizar hidrógeno como combustible para alimentar un motor de combustión interna [22] su objetivo principal fue comprobar la capacidad de un motor convencional de operar con hidrógeno remplazando la gasolina, para este ensayo se utilizó un motor generador Bauker modelo WH 950, el cual es un motor de dos tiempos en su ciclo de funcionamiento, y de 50 [cm³] de cilindrada.

1.10.1 Obtención de hidrógeno para el ensayo

Para este ensayo se fabricó un generador de hidrógeno húmedo, aplicando el principio de electrólisis del agua. En el cual se utilizaron 6 placas de acero inoxidable del tipo 304, con unas dimensiones de 7 [cm] x 15 [cm], con una disposición eléctrica que se indica en la figura 1-2, donde se muestra que las polaridades van alternadas, negativo-positivo, con un espacio entre placas por el cual es evacuado el gas generado.



Fuente: elaboración propia

Figura 1-2. Disposición eléctrica de generador húmedo de hidrógeno

Se trabajó con un amperaje de 30 [A] y 12 [V], siendo obtenidos de una batería común de uso automotriz, se realizaron ensayos con amperajes superiores de hasta 120 [A] sin embargo, el alto consumo produjo un exceso de calor lo que es peligroso para las pruebas y seguridad, debido a que aumentan los riesgos de derretimiento de los cables, placas, depósito del generador; con esto se concluyó que a mayor consumo de corriente, mayor es la producción de gas, como también son mayores los riesgos asociados, tales como el sobrecalentamiento y/o una explosión.

El electrólito utilizado fue agua obtenida del suministro domiciliario más 20 g de soda cáustica, lo cual ioniza el líquido para poder conducir la electricidad, a medida que es utilizado el generador, la mezcla de agua y soda cáustica comienza a poseer un color marrón, lo cual evidencia la oxidación producida por la electrólisis.

1.10.2 Producción de gas

Para cuantificar la producción de la celda se utilizó una botella de 500 [ml] y una bolsa en su interior, se determinó que la celda tardaba 100 [s] en llenar completamente la botella de gas (500 [ml]), lo que entrega una producción de 299.4 [ml/min].

1.10.3 Adición de hidrógeno a motor de combustión interna

Esta prueba buscaba comprobar que el hidrógeno puede operar en un motor de combustión interna, para poder suministrar este combustible al motor es necesario modificar el sistema de admisión de combustible, retirando todo contenido de gasolina,

desde su estanque hasta la cuba del carburador, para que dentro de la prueba solo exista el combustible gaseoso de hidrógeno.

Se debió eliminar el sistema de lubricación, debido que un motor de dos tiempos tiene como características de lubricarse con una mezcla de aceite y gasolina, la cual es dirigida hacia el interior del cilindro, donde se quema.

La producción de hidrógeno no era la necesaria como para que pudiera abastecer de forma continua al motor, por lo que se debió acumular el gas; para esto se utilizó un preservativo conectado a una manguera donde en su extremo se haya una válvula de paso, con el cual se puede controlar el suministro de hidrógeno, acumulando aproximadamente 1.5 [L] de gas en 5 [min], que fueron suministrados directamente en la admisión del motor. Esta cantidad de volumen logró hacer funcionar el motor por alrededor de 23 [s], a una velocidad de 3000 [RPM]. Con esto se demostró que el hidrógeno puede combustionar dentro de un motor de combustión interna.

Además, con el analizador de gases se pudo medir el nivel de concentración de emisiones, comparando estas en el motor utilizando hidrógeno versus usando gasolina, lo que se muestra en la Tabla 1-4.

Tabla 1-5. Comparación de emisiones de gases producida por el motor funcionando con gasolina vs hidrógeno

	RPM	HC [ppm]	CO%	CO ₂ %	O ₂ %	NO _x [ppm]
Motor trabajando con gasolina	4500	1413	0.67	0.77	19.81	6
Motor trabajando con hidrógeno	3000	-5	0.00	0.00	20.73	1

Fuente: Transformación de motor ciclo Otto de grupo electrógeno para operar con hidrógeno gaseoso [22]

El resultado de la combustión de hidrógeno da como resultado emisiones de vapor de agua, por lo que no se encuentra presente moléculas de carbono, sin embargo, tanto el hidrógeno como la gasolina generan nitróxidos, pero como se puede observar esta última lo hace en mayor cantidad.

Estas características son las que vuelve tan atractivo al hidrógeno para ser utilizado como combustible, debido a que su uso contribuye a disminuir la contaminación ambiental producida por la quema de hidrocarburos.

CAPÍTULO 2: OBTENCIÓN Y SUMINISTRO DEL HIDRÓGENO UTILIZADO
EN EL SISTEMA

2.1. OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO PARA EL SISTEMA

El combustible utilizado en este trabajo es el hidrógeno, el que se adquirió mediante el uso de la electrólisis, debido a que es la forma más sencilla y barata para obtener dicho gas prescindiendo de métodos industriales más sofisticados.

Este método se llevó a cabo a través de cuatro generadores de hidrógeno, se fabricaron dos de tipo húmedo y dos de tipo seco.

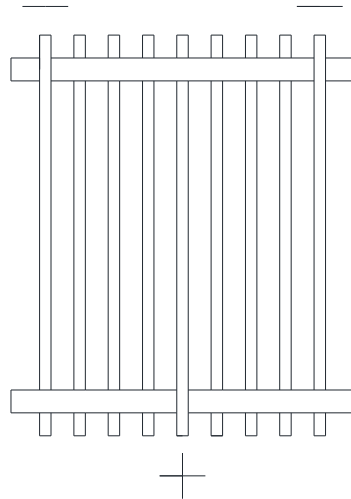
La diferencia que posee el húmedo del seco es que el electrolito se encuentra confinado dentro de un depósito junto con las placas que generan la electrólisis, mientras que el seco suministra el electrolito desde un depósito externo hacia las que realizan la electrólisis.

2.2. MATERIALES NECESARIOS PARA ELABORACIÓN DEL GENERADOR HÚMEDO

De forma general los materiales utilizados para fabricar el generador húmedo de hidrógeno son el depósito hermético, el conjunto de placas que consta de 9 placas de acero inoxidable 316L, batería de 55 [Ah] y agua de mar como electrolito. La lista de materiales para fabricar el generador se encuentra en el anexo 1.

2.2.1. Disposición eléctrica de las placas

A diferencia de lo expuesto en el trabajo “transformación de motor ciclo Otto de grupo electrógeno para operar con hidrógeno gaseoso”[22] donde se utiliza una disposición eléctrica de negativo-positivo mostrado en la Figura 1-2. Se utiliza una disposición eléctrica constituida por 9 placas, donde dos son negativas (a cada extremo), una es positiva (placa central) las placas sobrantes (6) son neutras o sin carga situadas entre negativas y positiva como se señala en la Figura 2-1, se utiliza este tipo de disposición inspirado en Aaron Chiapa, uno de los ganadores del concurso “desafío clave” [23], además de utilizar su versión de generador seco de hidrógeno.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-1. Disposición eléctrica utilizada

2.3. **EXPLICACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS**

A continuación, se explica por qué fueron seleccionados, y qué misión cumplen dentro del sistema.

2.3.1. **Depósito hermético**

El depósito del generador que se usó es hermético, para evitar posibles fugas que producirían un aumento en los riesgos de explosión y una disminución en la producción del combustible, otra característica que posee es ser aislante, es decir, que no conduzca el flujo eléctrico que es producido dentro de éste a través de las placas y el agua de mar, impidiendo así posibles descargas eléctricas y el aumento de consumo eléctrico.

2.3.2. **Placas de acero inoxidable 316L**

Las placas deben ser de este tipo de acero debido a que resisten la corrosión que causa el contacto directo con el agua, evitando así la oxidación producto de la alteración de su composición química.

2.3.3. Electrolito

El hidrógeno es extraído del agua, esta puede ser adquirida del suministro domiciliario, agregándole cloruro de sodio u otro elemento que sea conductor de electricidad como la soda cáustica, en este caso se utilizó agua de mar, la cual contiene minerales, sales, entre otros elementos que facilitan la conducción de la electricidad.

2.4. CONSIDERACIONES

Lo más importante que se debe considerar es la eliminación de posibles fugas, por lo que, cualquier trabajo realizado sobre el depósito, como lo son perforaciones para las conexiones eléctricas, y extracción del gas, deben estar correctamente aislados. Además de poseer una conexión eléctrica, segura y eficiente, por lo cual se deben utilizar terminales de ojos y estar bien sujetos a las conexiones, de esta forma eliminar posibles chispas, que podrían generar una explosión si se desarrolla una fuga del gas.

La seguridad es un factor importante al momento de trabajar con hidrógeno, y en la fabricación de los generadores, considerando lo estipulado por la norma ISO/TR 15916; 2015 [4], el sitio donde se realizará el trabajo debe ser ampliamente ventilado, ya sea un cuarto con ventilación o simplemente al aire libre para que en caso de una posible fuga el combustible no se acumule provocando algún tipo de accidente, principalmente incendios, explosiones o asfixia. Además, el lugar donde se realizarán las pruebas no debe contener puntos calientes, considerando que el hidrógeno se auto enciende a presión atmosférica entre 773 [K] a 850 [K] , ni sistemas eléctricos que puedan provocar una ignición en caso de una posible fuga del combustible, por otro lado, el operario debe utilizar implementos de seguridad como zapatos de seguridad, guantes, overol, antiparras y protectores auditivos.

2.5. ARMADO DE GENERADOR TIPO HÚMEDO

El generador está conformado por 9 placas de acero inoxidable de dimensiones 7 [cm] de ancho y 12 [cm] de largo, estas se encuentran agujeradas en dos extremos, como se indica en la Figura 2-2, donde están ubicados los pernos de Technyl que unirán las placas.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-2. Placas utilizadas en generador húmedo

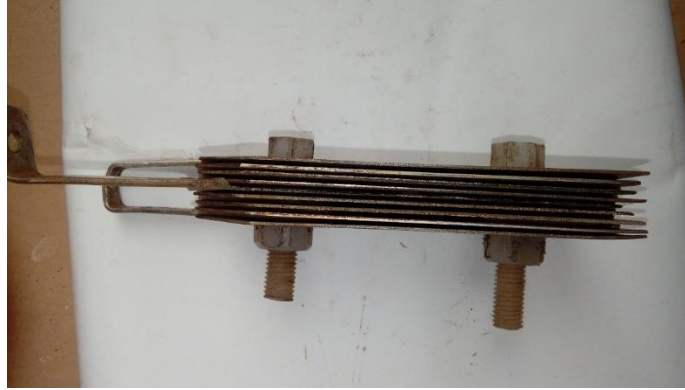
Entre cada una se encuentran situadas las golillas plásticas, cuya función es realizar la separación de 1 mm, de modo que no se conduzca la electricidad entre las placas y pueda ser evacuado el gas generado, en la figura 2-3 se muestra como deben ir instaladas las placas, de forma que tengan esta separación.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-3. Separación entre placas

La disposición eléctrica del generador está conformada por dos polos negativos y uno positivo, como se indica en la Figura 2-4, donde los negativos se encuentran en cada extremo del generador, y el positivo en medio de las 9 placas, dejando las demás sin carga eléctrica, éstas son llamadas placas neutras.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-4 disposición eléctrica de las placas

Las conexiones eléctricas deben estar conectadas a los terminales alojados en la tapa del depósito, estos terminales están sellados de modo que no se generen fugas de gas, en esta tapa se encuentra la conexión para la salida del gas del generador, la Figura 2-5 muestra el generador húmedo completo, se puede apreciar los terminales positivo y negativo de las placas y la conexión de salida del gas generado.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-5. Generador húmedo

2.6. GENERADOR DE HIDRÓGENO TIPO SECO

Se le denomina tipo seco, debido a que, a diferencia del húmedo, el líquido se encuentra en movimiento, su configuración es diferente al explicado anteriormente, debido a que las placas están situadas a la vista y no dentro de un depósito. La Figura 2-6 muestra la composición de un generador seco.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-6. Generador seco

2.6.1. Materiales necesarios para construir generador de hidrógeno tipo seco

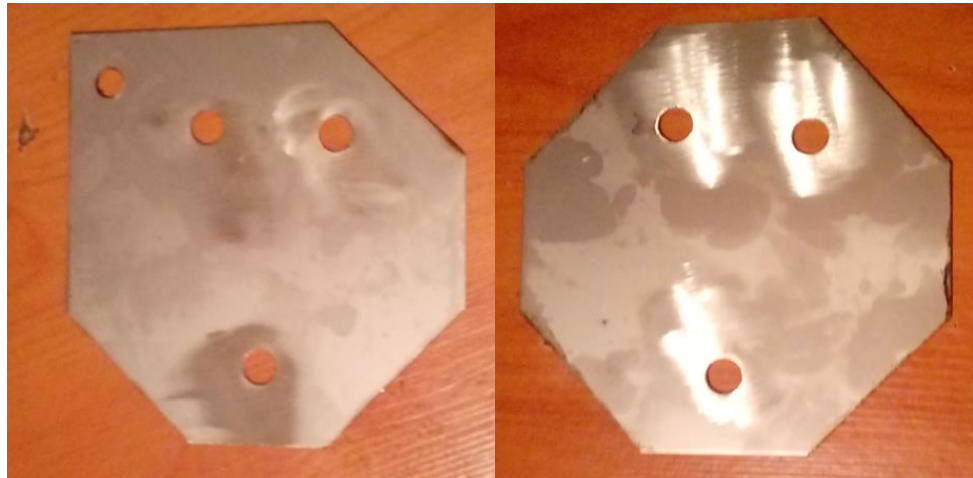
Los materiales utilizados son similares a los que posee el tipo húmedo, debido a que ambos trabajan con el principio de electrólisis, por lo cual las placas de acero inoxidable son del mismo tipo que las utilizadas anteriormente (316L), sin embargo, la diferencia radica en que este sistema posee un depósito de agua auxiliar al generador que suministra el agua a utilizar en el proceso de disociación de las moléculas del agua. la lista de completa de materiales se encuentra en el anexo 2.

2.7. ARMADO DE GENERADOR TIPO SECO

Al igual que el generador tipo húmedo posee 9 placas de acero inoxidable 316L, teniendo 6 placas neutras 1 positiva y 2 negativas; existen dos patrones para las formas de las placas, una para aquellas que poseen carga y otra para las neutras, las placas neutras tienen forma de hexágono esto debido a que en las esquinas estarán situados los pernos de sujeción. Para las placas que poseen carga se debe dejar un lado del cuadrado sin cortar, para así tener la conexión eléctrica al perno de sujeción.

Además, ambas configuraciones de placas deben poseer 3 agujeros, dos en la parte superior (extracción del gas) y uno en la parte inferior (flujo del líquido).

Las placas deben ser lijadas por ambas caras, para así aumentar el área de contacto con el agua, lo anterior se muestra de forma gráfica en la Figura 2-7.



Fuente: elaboracion propia

Figura 2-7. Placas utilizadas en generador tipo seco

Las tapas de acrílico deben ser agujeradas en las 4 esquinas de modo que los pernos y tuercas puedan sostener las placas de acero inoxidable, además deben ser atornillados los conectores para las mangueras, donde uno está situado en la mitad del acrílico (ingreso del líquido) y el otro en la parte superior del acrílico (salida del gas) de modo que el gas pueda ser evacuado con facilidad, estos conectores estan atornillados con teflon, para así evitar posibles pérdidas, la Figura 2-8 muestra como deben estar agujerados para la sujeción de las placas y las conexiones por las que se suministra el agua y libera el gas producido.



Fuente elaboración propia

Figura 2-8. Tapas de acrílico de generador tipo seco

Para armarlo se debe seguir el siguiente procedimiento: situar una de las tapas de acrílico con la conexión boca abajo, y montar la primera junta de goma la cual debe ser humedecida previamente para lograr un buen sellado entre placas, como se indica en la Figura 2-9.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-9. instalación de sello de goma sobre tapa de acrílico

Luego se monta la primera placa, la cual es una de las que suministra carga negativa a la celda, esta debe quedar conectada al perno de suministro negativo, evitando que la junta de goma obstruya algún agujero, (Figura 2-10).



Fuente: elaboración propia

Figura 2-10. Instalación primera placa negativa

Posteriormente se instala la siguiente junta de goma, y luego la primera placa neutra, procurando que los agujeros estén alineados, este procedimiento se repite con 3 placas neutras, hasta llegar a la placa positiva, la cual está situada en sentido contrario a la primera placa siendo conectada al perno de suministro positivo, para luego montar las siguientes 3 placas neutras con sus juntas de gomas y la segunda placa negativa, y para finalizar la otra tapa de acrílico, donde se apretaran los pernos para mantener todo fijo.

2.8. DEPÓSITO DE AGUA

A diferencia de las celdas húmedas, ésta necesita un depósito externo para el líquido, el cual está ubicado en la parte superior del generador de hidrógeno, para así suministrar el fluido mediante la gravedad a la celda, el depósito está conformado a partir de un tubo de PVC de 11 [cm] de diámetro y dos tapas para aquel tubo, en una de las tapas están situadas dos conexiones de manguera (Figura 2-11), con las cuales se suministrará el agua, y extraerá el gas generado.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-11. Tapa de depósito de agua

La otra tapa solo tendrá una conexión de manguera, con el cual se extrae todo el gas generado por la celda, para ser enviado al circuito y ser suministrado en el motor, en la Figura 2-12 se puede apreciar los elementos que en conjunto forma el depósito de agua del sistema.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-12. Depósito de agua del sistema

La Figura 2-13 muestra como luce el depósito de agua finalizado.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-13. Depósito de agua finalizado

2.9. MEDICIÓN DE CAUDAL DE LOS GENERADORES

Al no contar con instrumentos de alta precisión, como lo son el caudalímetro y manómetro, se realizó el ensayo de caudal volumétrico ingresando el gas generado a una botella de 500 [ml] la cual consta con una marca en los 250 [ml], el gas al entrar desplaza el agua desde la botella a un recipiente externo con agua, donde es cronometrado el tiempo en que el agua desciende hasta la marca, la Figura 2-14 muestra el elemento rudimentario utilizado para realizar medición de caudal.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-14. Elemento rudimentario para medición de producción

La tapa de la botella fue perforada en dos sitios, a un agujero se le introdujo una manguera como se muestra en la Figura 2-14, de manera que un extremo quedó situado en el fondo de la botella y el otro en la conexión del generador, la Figura 2-15 muestra las conexiones de la tapa por donde ingresa el gas y es expulsada el agua desde la botella hacia el recipiente.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-15. Vista superior elemento rudimentario para medición de producción

Para realizar la medición se debe llenar la botella con agua, y sumergirla dentro del recipiente de agua de forma vertical, el gas al ingresar dentro de la botella desplaza el volumen de agua desde la botella al recipiente, por lo cual el nivel de agua va disminuyendo dentro de la botella, se cronometró el tiempo que se demoraba en disminuir el agua desde el fondo de la botella hasta la marca, la primera medición del generador húmedo se realizó desde el momento en que se encendió hasta el momento en que el agua bajo hasta la marca, la medición fue de 59 [s], en esta medición se pudo apreciar que el circuito del generador tardaba 10 [s] en llenarse, por lo cual se probó comenzar la medición una vez lleno el circuito con la conexión de la botella desconectada, se midió desde el momento donde se conectó la manguera del generador a la botella, las mediciones fueron mejorando a medida que el agua del generador poseía más tiempo de uso siendo la mejor lectura de 13.15 [ml/s], para el generador húmedo, se realizó el mismo procedimiento con el generador seco siendo 8 [ml/s]. Al realizar la medición con ambos generadores trabajando entregó una medición de 19.2 [ml/s], la Tabla 2-1 ordena los datos obtenidos.

Además, se comprobó que la disposición eléctrica utilizada de dos placas negativas, seis neutras y una placa intermedia positiva posee mayor producción que con la polaridad invertida, es decir, con dos placas positivas, seis neutras y una placa negativa intermedia ya que con esta última se obtiene un caudal de gas de 4 [ml/s], mientras que con la utilizada en el generador se obtienen una producción de 12.5 [ml/s]. Se debe considerar que esta medición realizada no es un valor exacto, solo un aproximado para poder tener un valor de referencia que sirve para realizar comparaciones entre generadores, mejoras a éstos y para poder realizar ciertos cálculos. Para poder realizar una medición real es necesario utilizar un caudalímetro y un manómetro.

Tabla 2-1 datos de producción de ambos generadores

Generador	Producción de gas en Volumen
Húmedo	13.2 [ml/s]
Seco	8 [ml/s]
Húmedo + seco	19.2 [ml/s]

Fuente: elaboración propia

2.10. CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN MASA

Formula de los gases ideales:

$$P \times V = n \times R \times T \quad (5)$$

Variables:

P = Presión

V = Volumen

T = Temperatura

n = Moles de gas

R = Constante universal de los gases ideales

Datos:

$$V = 250 \text{ ml} = 0.25 \text{ L}$$

$$T = 20^\circ \text{ C} = 293 \text{ K}$$

$$P = 1 \text{ ATM}$$

$$R = 0.82 \text{ para unidades } \frac{\text{atm} \times \text{L}}{\text{mol} \times \text{K}}$$

$$\text{Peso molecular del H}_2 = 2 \text{ mol}$$

Reemplazo de datos:

$$n = \frac{p \times v}{R \times T} = \frac{1 \times 0.25}{0.82 \times 293} = 0.01 \text{ Mol} \times g$$

Formula de n:

$$n = \frac{MASA}{PM}$$

Despejando:

$$MASA = n \times PM = 0.01 \times 2 = 0.02 \text{ g}$$

El cálculo entrega 0.02 [g] de hidrogeno en 250 [ml] de gas generado a temperatura ambiente de 20 [°C] bajo la presión de 1 [atm], lo que en un litro es 0.08 [g]

2.11. COMPARACIÓN ENTRE GENERADORES

Para poder realizar comparaciones entre los generadores, se trabajó con ambos a la vez, controlando parámetros de: voltaje, amperaje, producción y temperatura. Se observó que a medida que el tiempo de prueba transcurría aumentaba el flujo volumétrico del gas, esto debido al aumento de la temperatura del electrolito.

Los datos obtenidos por el generador húmedo constan de un voltaje de 12 [V], un consumo de corriente que varía desde los 15 [A] (inicio de la prueba) hasta un máximo de 30 [A], además de constar con un valor variable de producción, siendo el mayor de 13.2 [ml/s], la medición de temperatura varía desde los 16 [°C] (temperatura ambiental) hasta los 105 [°C], donde se debió finalizar la prueba, producto del exceso de temperatura en el generador, que provocó un derretimiento en los puntos de apoyo de las placas a la tapa del recipiente, llevándolo a la destrucción, esto puede apreciarse de forma visual en la Figura 2-16.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-16. Puntos de sujeción y conexión de las placas dañado tras aumento de temperatura

Con respecto al generador seco se tiene que sus parámetros son un voltaje de 12 [V], un amperaje que varía de 3.2 [A] hasta 20 [A], una temperatura de trabajo de 42 [°C], la producción de gas es de 8 [ml/s]. Se debe tener presente que el generador húmedo posee un área de placas de 1512 [cm²] y el seco de 1020.75 [cm²], estos valores de áreas son útiles para poder tener un parámetro de comparación entre ambos generadores en función de la potencia requerida por 1 [cm²]. La Tabla 2-2 compara los datos obtenidos.

Tabla 2-2. Comparación de ambos generadores, primeras versiones.

Generador	Temperatura [°C]	Área de placas [cm ²]	Potencia [W]	Potencia/Área [W/cm ²]	Producción de gas [ml/s]
Húmedo	105	1512	360	0.23	13.2
Seco	42	1020.75	240	0.24	8

Fuente: elaboración propia

Como se puede apreciar en la Tabla 2-2, comparación de ambos generadores, primeras versiones, la potencia que se requiere por cm² son prácticamente iguales, considerando estos valores y el de producción deja mejor calificado al generador húmedo, sin embargo, la ventaja que posee el generador seco es que refrigera a través de sus placas con el contacto directo a la atmósfera, lo que lleva a disipar de forma más eficiente el exceso de temperatura, además, de que el electrolito no se encuentra estancado debido a que circula entre el depósito del agua y las placas del generador, evitando el exceso de acumulación de suciedad entre placas, todas estas ventajas fueron lo que llevó aumentar sus proporciones para que de esta forma se logre obtener una mayor producción de gas, esto es explicado en el punto 2.12 mejora del generador tipo seco.

Con respecto al generador húmedo se realizó una revisión para poder comprender a que se debió el aumento de temperatura que llevo a derretir el depósito, la revisión fue de carácter visual, donde se estimó que la falla fue provocado por la suciedad producida en la electrólisis (residuos del electrolito), que son situados entre las placas, provocando un mayor consumo de electricidad, además de impedir que se realice una correcta refrigeración, lo que finalmente conlleva a que se genere un sobrecalentamiento, por lo que se busca una solución a este problema en el punto 2.13. mejoras del generador tipo húmedo.

2.12. MEJORA DE GENERADOR TIPO SECO

Considerando las mayores prestaciones entregadas por el generador tipo seco (Figura 2-17), se decidió aumentar sus proporciones, para que de esta forma logre desarrollar una mayor producción, estos cambios son simplemente el aumento del área de contacto de las placas con el electrolito. Llevándolo desde 1020.75 [cm²] a 2835 [cm²], para esto se agregó una mayor cantidad de placas, llegando a poseer un total de 25, siendo 4 placas negativas y 3 positivas, alternadas por placas neutras, este generador logro tener una producción de 12.9 [ml/s] con un máximo consumo de corriente de 20 [A] y una temperatura de 42 [°C].



Fuente: elaboración propia

Figura 2-17. Generador tipo seco modificado para aumentar su producción.

2.13. MEJORAS DEL GENERADOR TIPO HÚMEDO

Este generador (Figura 2-18) posee cambios en su construcción comparado con la primera versión, debido al problema de sobrecalentamiento producido, principalmente se varió la distancia de separación entre placas, de 1 [mm] a 6 [mm], de esta forma se evita que la suciedad producto de la electrólisis del agua se deposite entre placas generando un aumento en el consumo de corriente y a su vez en la temperatura de trabajo. Esto evitó el sobrecalentamiento trabajando a una temperatura de 50 [°C]. Este generador posee una producción de 12.5 [ml/s].



Fuente: elaboración propia

Figura 2-18. Segunda versión de generador húmedo

2.14. COMPARACIÓN ENTRE GENERADORES, SEGUNDA VERSIÓN.

Luego de las mejoras realizadas a ambos generadores se vuelve a comparar según los parámetros de potencia, producción, temperatura, y área de placa. Lo cual se puede apreciar en la Tabla 2-3 comparación de ambos generadores, segundas versiones.

Tabla 2-3 comparación de ambos generadores, segundas versiones.

Generadores	Temperaturas [°C]	Área de placas [cm ²]	Watts [W]	Watts/Área [W/cm ²]	Producción de gas [ml/s]
Húmedo	50	1512	360	0.23	12.5
seco	42	2835	240	0.007	12.9

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 2-3 comparación de ambos generadores, segunda versión, las mejoras realizadas a los generadores provoca que la producción de gas sea similar, el aumento de área a las placas del generador seco permite que se pueda apreciar de mejor forma las ventajas que posee, debido a que la temperatura con la que trabaja es menor que la del húmedo y el consumo de corriente que utiliza fluctúa entre 3.2 [A] y 20 [A], además de la diferencia considerable de potencia por área entre ambos generadores, en resumen en la práctica se prefiere utilizar un generador seco a uno húmedo, esto debido a necesita un menor consumo para producir el gas, además de que es

más confiable ya que no tiende a elevar su temperatura, al contrario del caso del otro generador.

2.15. ALMACENAJE DE HÍDRÓGENO.

Este acumulador es inspirado en el principio que se utilizó para medir de forma casera la producción de gas de los generadores, está compuesto por 3 partes: un recipiente exterior construido con un tubo de PVC de 75 [mm] de diámetro con 1 [m] de largo y una tapa en uno de sus extremos, un recipiente interior que está hecho con un tubo de PVC de 50 [mm] de diámetro con 1 [m] de largo con una tapa en uno de sus extremos y una cañería de cobre que conduce el gas hacia el recipiente interno del acumulador, teniendo una longitud de 1 [m], en la Figura 2-19 se puede apreciar de forma gráfica los elementos que componen el acumulador de gas.



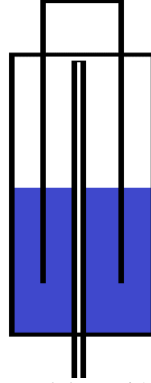
Fuente: elaboración propia

Figura 2-19. Elementos que componen el acumulador de gas

2.15.1 Explicación del funcionamiento del acumulador.

Como fue mencionado en el punto anterior el acumulador posee dos recipientes, uno dentro del otro, para que el sistema funcione debe ser llenado con agua, como se aprecia en la Figura 2-20 explicación del funcionamiento del acumulador de gas, esto con el fin de que trabaje como sello evitando que el gas se escape del acumulador, una vez que el gas ingresa al recipiente interno desplaza el volumen de agua hacia el recipiente externo haciendo que este primero comience a ascender, una vez que se encuentre lleno del gas

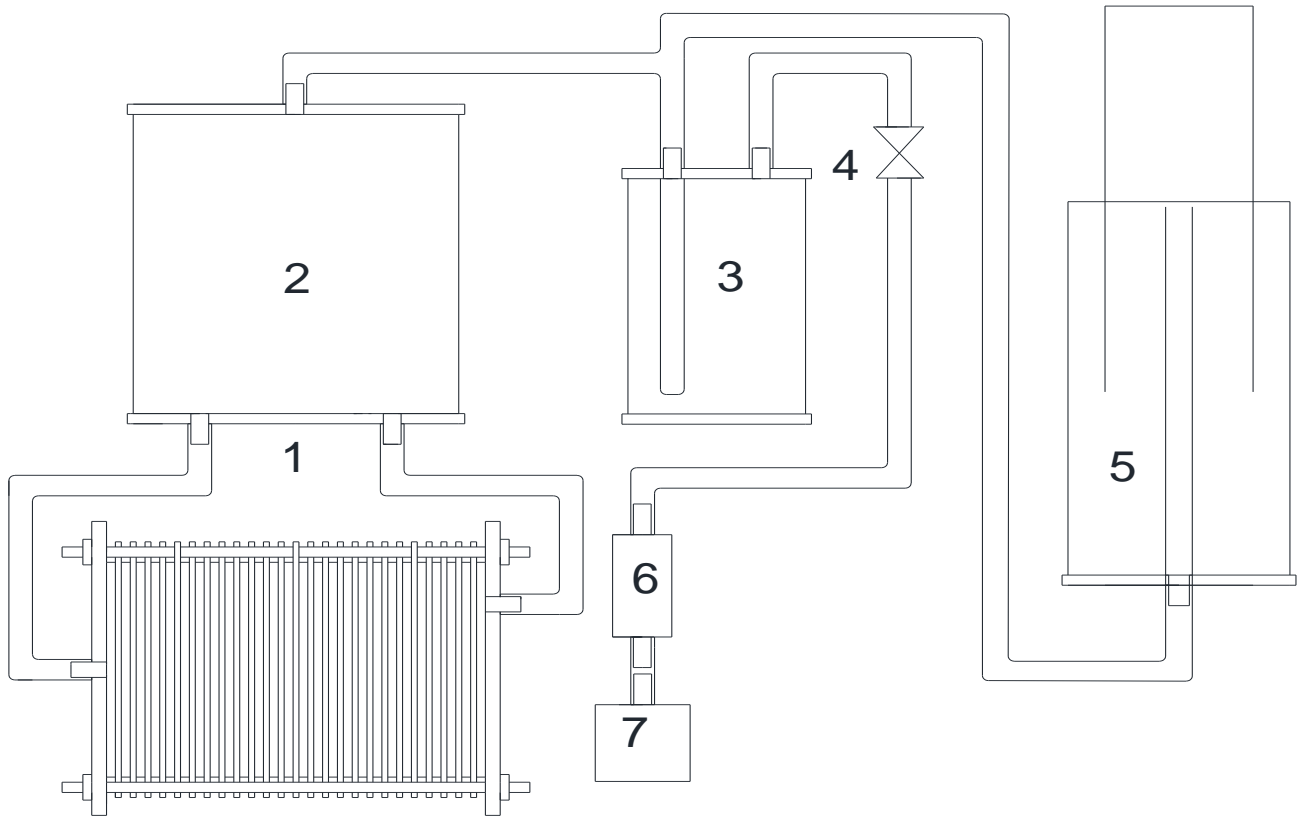
deja de acumular enviando lo sobrante a la atmósfera, es indispensable que el uso de este acumulador sea en espacios ventilados para evitar la acumulación de hidrógeno dentro de una habitación, donde puedan existir riesgos ya mencionados con anterioridad.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-20. Explicación del funcionamiento del acumulador de gas

2.16. EXPLICACIÓN DEL SISTEMA



Fuente: elaboración propia

Figura 2-21. Disposición general de los equipos; 1 generador de hidrogeno, 2 depósito de agua, 3 burbujeador, 4 válvula de paso de gas, 5 acumulador de gas, 6 arresta llama , 7 carburador.

La Figura 2-19 muestra el diagrama de producción y suministro de hidrógeno, en el cual están presentes; el generador, depósito de agua, burbujeador, arresta llama, válvula check, estanque de gasolina, válvulas de paso y el carburador.

1-. Generador de hidrogeno, encargado de realizar la electrolisis, éste envía la producción hacia el depósito de agua a través de la conexión superior de la celda.

2-. Depósito de agua, encargado de suministrar el fluido hacia el generador mediante gravedad; además de ingresar el gas y evacuarlo por la conexión superior el cual será dirigido hacia los sistemas de protección antes de ser utilizado.

3-. Burbujeador, este dispositivo consta de un depósito, en él se encuentra agua, a través de una manguera se dirige el gas del generador hacia el depósito, ésta debe

quedar sumergida en el líquido, para que así el gas sea filtrado a través de él, éste se eleva de forma natural hacia la tapa del depósito, donde se encuentra una conexión que libera el gas hacia el circuito, desplazándose hacia otros elementos de seguridad; el burbujeador es el último sistema de seguridad, en caso de que una llama logre atravesar los sistemas de seguridad anteriores, éste genera una pequeña explosión dentro de sí, extinguiendo la reacción de la llama, de este modo se evita que pueda ingresar al generador, se puede apreciar en la figura 2-22.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-22. Burbujeador, sistema de seguridad

4-. Válvula de paso para abrir y cerrar el suministro de gas, se puede apreciar en la Figura 2-23.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-23. Válvula de paso de gas

5-. Acumulador de gas, depósito que sirve para almacenar el hidrógeno producido para luego ser suministrado al motor, el cual se puede apreciar en la Figura 2-24.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-24. Acumulador de gas.

6-. Corta llama, Figura 2-25 y 2-26 otro sistema de seguridad que será utilizado, éste consiste en un depósito cilíndrico, posee lana de acero, este material reduce el volumen por donde el gas puede filtrarse, impidiendo que una posible llama se devuelva por el circuito, extinguiéndola en este sitio; éste será el segundo método de seguridad a utilizar.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-25. Corta llama



Fuente: elaboración propia

Figura 2-26. Interior corta llama

7-. Carburador, encargado de mezclar el combustible líquido con el aire, la referencia visual se encuentra en la figura 2-27.



Fuente: elaboración propia

Figura 2-27. Carburador

CAPÍTULO 3: ENSAYO Y RESULTADOS.

3.1. MOTOR SELECCIONADO

El motor utilizado corresponde al modelo JT152FMH que tiene como características principales constar con un ciclo de funcionamiento de cuatro tiempos, por lo cual no existe el problema presentado en el trabajo “transformación de motor ciclo Otto de grupo electrógeno para operar con hidrógeno gaseoso” [22], de utilizar un motor de dos tiempos, el cual se lubrica con una mezcla de combustible líquido y aceite.



Fuente: elaboración propia

Figura 3-1. Motor utilizado

3.2. ELECCIÓN DEL MOTOR

El motor seleccionado para este ensayo debe contar con dos características esenciales, que son: poseer un ciclo de funcionamiento de cuatro tiempos y una baja cilindrada, considerando que entre mayor es la cilindrada del motor mayor es la demanda de combustible.

Lo primero debido a que será sometido a una alimentación de combustible gaseoso, lo que sería imposible de lograr con un motor de dos tiempos, debido a que la eliminación del sistema de lubricación, lo que generará una destrucción del motor.

Lo segundo debido a que la producción de hidrógeno no se obtiene en grandes cantidades a través de este sistema, por lo que se debe contar con una baja demanda de combustible y de esta manera poder abastecer con el generador al motor.

3.3. PRUEBAS DE GENERADORES DE HIDRÓGENO

Las pruebas realizadas a los generadores están orientadas a la producción del gas, donde se realiza un registro del voltaje, amperaje, temperatura y producción. Además de realizar observaciones, las que se demuestran en la tabla 3-1.

Tabla 3-1. Datos de los generadores utilizados en el ensayo

Generador	Voltaje	Amperaje	Potencia	Temperatura	Producción
Seco	12 V	20 A	240 W	42 °C	12.9 ml/s
Húmedo	12 V	30 A	320 W	50 °C	12.5 ml/s
Seco + Húmedo	-	-	-	-	25.4 ml/s

Fuente: Elaboración propia

Luego de haber realizado las pruebas, se procedió a desarmar los generadores de hidrógeno para así observar el estado interno de ellos (placas), lo primero en encontrarse fue que el agua se tornaba de un color marrón, esto debido a que el procedimiento de electrolisis oxida el agua, con lo cual libera impurezas del líquido, siendo estos minerales, recordar que se utilizó agua de mar, en el generador húmedo debido a que el agua se encuentra en reposo esta oxidación del agua se vuelve una especie de gel, que se deposita entre placas, aumentando así el consumo de corriente, y su amperaje, además de aumentar la temperatura, lo que llevo a la destrucción del generador, como se mencionó en el capítulo anterior. Luego se analizó el estado de las placas del generador húmedo, estas al ser de acero inoxidable no se vieron alteradas en su composición, aunque como se puede observar en la Figura 3-2 si recibe cambios en su estado, siendo deteriorada por el paso de la corriente, como el flujo de corriente se da desde el negativo al positivo, las placas más cercanas a las positivas se encuentran con mayor deterioro, disminuyendo a medida que se acercan a la placa negativa, siendo estas las menos afectadas.



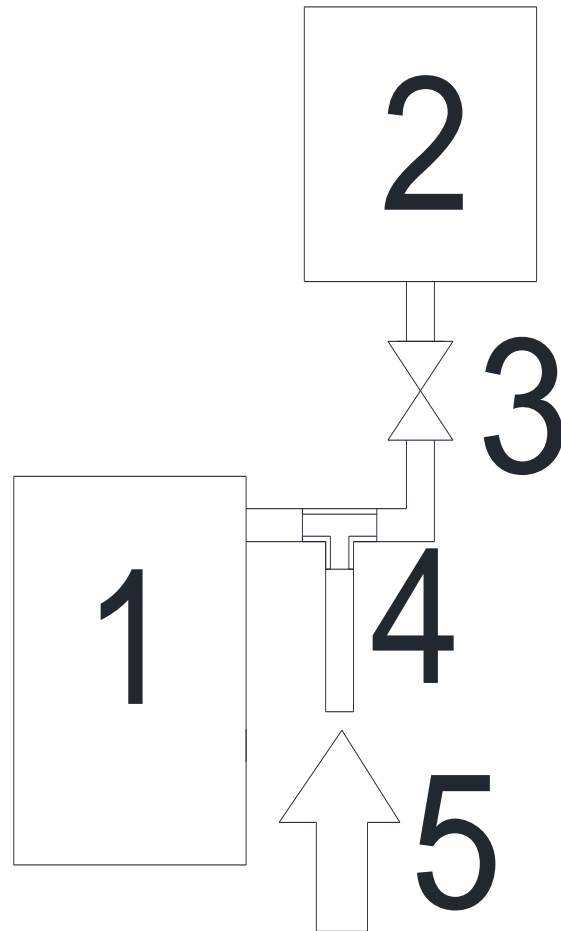
Fuente: elaboración propia

Figura 3-2. Placa positiva, generador húmedo

3.4. UTILIZACIÓN DEL CARBURADOR PARA DIRIGIR EL HIDRÓGENO HACIA EL INTERIOR DEL MOTOR

Se consideró utilizar el carburador del motor con el fin de poder ingresar el hidrógeno gaseoso a la combustión del motor, utilizando este dosificador se busca controlar el ingreso del aire hacia el motor a través de la mariposa del carburador, el combustible ingresa al motor según la diferencia de presión que genera la fase de admisión, desplazando el combustible de la cuba del carburador a la cámara de combustión del motor.

El gas fue dirigido al carburador mediante una conexión tipo “T”, como se observa en la figura 3-3, donde 1 es el carburador, 2 el depósito de gasolina, 3 válvula de paso de la gasolina, 4 conexión tipo “T”, 5 sentido de flujo del hidrógeno.



Fuente: elaboración propia

Figura 3-3. Conexión tipo “T” de gas y gasolina 93 octanos

La primera prueba realizada con esta forma de dirigir el combustible fue el desarrollo de potencia utilizando solo gasolina de 93 octanos, para llevar al motor a su temperatura de funcionamiento. Luego se procedió a dar el paso del combustible hidrógeno mediante la llave de paso, con lo cual el motor funcionó con ambos combustibles. Posteriormente se cortó el paso del combustible líquido (gasolina) de esta forma el motor funcionó sólo con hidrógeno, una vez que fue consumida toda la gasolina restante dentro de la cuba del carburador, el motor experimentó un aumento en sus revoluciones (velocidad del motor) producto del funcionamiento a base de hidrógeno, y posteriormente el motor dejó de funcionar, debido a que el suministro de gas no suplía la cantidad demandada por el motor.

Se experimentó dar partida al motor utilizando el combustible gaseoso, para esto se debió eliminar todo residuo de gasolina en el sistema, mediante el perno de vaciado de la cuba, señalado en la Figura 3-4, sin embargo, este no logró encender.



Fuente: elaboración propia

Figura 3-4. Perno de vaciado de la cuba

Analizando el procedimiento efectuado se concluye que la manera de ingresar el hidrógeno al motor genera fugas debido a la baja densidad del gas, éste se filtra a través del carburador, mediante las conexiones abiertas a la atmósfera que posee, por lo que el gas es evacuado al medio ambiente, es por esto que se pensó la siguiente forma de suministrar el combustible gaseoso, lo cual consiste en ingresar el gas generado directamente en la admisión del motor.

3.5. SUMINISTRO DE HIDRÓGENO EN COLECTOR DE ADMISIÓN

Debido al problema mencionado en el punto anterior se ideó una nueva forma de ingresar el combustible al motor, la cual consta de una toma de vacío en el colector de admisión situado entre la culata y el carburador como se muestra en la Figura 3-5, la ventaja de conectar el suministro de hidrógeno en la admisión es que debido a la succión propia que genera el motor provoca que el combustible ingrese de forma directa al cilindro, mediante la diferencia de presión existente.



Fuente: elaboración propia

Figura 3-5. Ingreso de combustible mediante vacío en colector de admisión

Para poder realizar la prueba se efectuó el vaciado de la cuba como fue descrito en el punto anterior para así eliminar cualquier resto de gasolina en el sistema, luego se procedió a encender el generador de hidrógeno para llenar el circuito del combustible, para posteriormente abrir el paso de la válvula de control del gas y se dio arranque. El motor combustiona, pero inmediatamente se detiene, obteniendo un resultado diferente a la experimentación anterior donde el combustible se dirigió hacia al carburador, para luego ser introducido dentro del motor.

Utilizando este método la succión del motor absorbe directamente el combustible, por lo que no puede ser controlado el ingreso de combustible, sin embargo esto fue un progreso debido a que con la forma anteriormente mencionada no se obtuvieron resultados, con esto se demostró que el gas generado puede combustionar dentro del motor, por lo que se tomó la decisión de aumentar la producción de hidrógeno, para así aumentar el tiempo de trabajo del motor, esto se logró bajo la implementación del generador húmedo.

3.5.1. Suministro de hidrógeno en el colector de admisión con producción de ambos generadores

Se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente, donde se encienden los generadores, se abre el paso de la válvula de gas y se procede a dar partida al motor, este enciende, sin embargo, luego de haber dejado de funcionar el motor de arranque se detiene casi de inmediato, obteniendo un resultado similar al de la prueba anterior. Posteriormente se realizó una acumulación de gas cerrando la llave de paso por 10 s, la cual fue abierta mientras se daba arranque al motor, este combustiona y funciona 3

segundos antes de detenerse, además se aprecia que el motor succiona el electrolito de los generadores, por lo que se puede inferir que se utiliza todo el gas producido.

3.6. MOTOR TRABAJANDO CON ACUMULACIÓN DE HIDRÓGENO.

En esta prueba se volvió a utilizar al carburador, cerrando el ducto creado para la prueba anterior, pero esta vez se eliminaron los lugares por donde se filtraba el combustible, se utilizó el acumulador de gas para poder almacenar el combustible y así lograr un mayor tiempo de funcionamiento del motor, el acumulador puede almacenar un volumen aproximado de 1.5 [L], con esta forma de ingresar el combustible se logró hacer funcionar el motor durante 8 [s], sin embargo para poder hacer funcionar el motor se debió encender con una pequeña cantidad de limpia carburador, el cual da la combustión inicial del motor, para que el motor pueda funcionar sin este apoyo inicial es necesario modificar el punto de encendido y la RAC, para poder lograr esto es necesario una mayor cantidad de hidrógeno para que funcione de forma seguida por el tiempo necesario para poder controlar la RAC y su sincronización.

3.7. CANTIDAD NECESARIA DE HIDRÓGENO PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

El correcto funcionamiento del motor se logra conociendo la cantidad de hidrógeno requerida, para esto se considera que la potencia del combustible estándar (gasolina 93 octanos) e hidrógeno son las mismas; $P_{\text{combustible gasolina}} = P_{\text{combustible hidrógeno}}$.

Con esta equivalencia se estima la cantidad necesaria de hidrógeno mediante el siguiente cálculo:

Datos:

$$b_e \text{ gasolina} = 367 \text{ [g/kWh]}$$

$$P_e = 5 \text{ [kw]}$$

$$PCI \text{ gasolina} = 44003 \text{ [kJ/kg]}$$

$$PCI \text{ hidrógeno} = 119000 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\rho \text{ hidrógeno} = 0.0899 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$P_{comb} = \dot{M} \times PCI \quad (6)$$

Donde:

P_{comb} = potencia del combustible.

\dot{M} = Flujo másico.

PCI = Poder calorífico inferior.

$$be = \frac{\dot{M}}{Pe} \quad (7)$$

Donde:

be = consumo específico de combustible

Pe = Potencia efectiva

Mencionada estas expresiones se plantea la equivalencia:

$$\dot{M}_{gasolina} \times PCI_{gasolina} = \dot{M}_{hidrógeno} \times PCI_{hidrógeno}$$

$$be_{gasolina} \times Pe \times PCI_{gasolina} = \dot{M}_{hidrógeno} \times PCI_{hidrógeno}$$

$$\dot{M}_{hidrógeno} = 678.53 \text{ [g/h]}$$

Se necesita una masa de 678.53 [g] para que el motor funcione durante 1 [h] entregando toda su potencia, lo que en volumen es:

$$\dot{M}_{hidrógeno} = \rho_{hidrógeno} \times \dot{v}_{hidrógeno}$$

$$\dot{v}_{hidrógeno} = 7540 \text{ [L/h]}$$

Por lo que se necesita un flujo volumétrico de 7540 [L/h] para poder mantener al motor funcionando a plena carga, sin embargo, el sistema desarrollado permite abastecer al motor con un flujo volumétrico de 91.44 [L/h], utilizando ambos generadores simultáneamente. Siendo esto insuficiente

3.8. RENDIMIENTO ENERGÉTICO DEL GENERADOR SECO DE HIDRÓGENO

Lo siguiente es un cálculo aproximado de la eficiencia que posee el generador seco, para esto se consideró utilizar la expresión:

$$\eta_{gen} = \frac{E_{sal}}{E_{ent}} \quad (8)$$

donde:

η_{gen} = rendimiento energético del generador seco

E_{sal} = Energía de salida

E_{ent} = Energía de entrada

Esta división compara la energía suministrada para efectuar la electrólisis en el generador seco de hidrógeno y la energía almacenada en el combustible producto de este proceso.

Datos de producción de hidrógeno utilizando generador seco:

Masa de hidrógeno generada: 0.02 [g] = 0.00002 [kg]

Tiempo de la prueba: 14 [s]

Voltaje: 12 [V]

Amperaje: 20 [A]

Watts: 240 W = 240 [J/s]

Poder calorífico inferior del hidrógeno 120 [MJ/Kg] = 120000000 [J/Kg]

Energía de entrada:

$$E_{ent} = \text{voltaje} \times \text{amperaje} \times \text{tiempo de prueba} \quad (11)$$

Energía de salida:

$$E_{sal} = \text{masa de hidrógeno} \times \text{poder calorífico inferior de hidrógeno} \quad (12)$$

Remplazando valores

$$\frac{0.00002 \text{ [kg]} \times 120000000 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]}{12 \text{ [V]} \times 20 \text{ [A]} \times 14 \text{ [s]}}$$

Energía salida / energía entrada:

$$\frac{2400 \text{ [J]}}{3600 \text{ [J]}}$$

Expresión porcentual:

$$0.6666 \times 100 \% = 66.66 \% \text{ de eficiencia}$$

Según las leyes de la termodinámica, la energía no se puede crear, solo se transforma. Es debido a esto que para ser utilizada en distintos procesos es necesario modificarla, en este caso se utiliza hidrógeno para alimentar un motor de combustión interna, obtenido bajo el proceso de electrólisis el cual varía la energía de eléctrica a energía química, (a través de todo aquél proceso se obtiene energía mecánica).

El generador fabricado para esta prueba posee una eficiencia de 66 % es decir de los 3600 [J] utilizados para generar el proceso se obtiene 2400 [J], teniendo una pérdida de 1200 [J], esta energía se disipa principalmente por temperatura.

3.9. INCONVENIENTES DEL SISTEMA

El principal inconveniente de este sistema es la falta de combustible, como pudo apreciarse en el punto 3.7, donde la producción del gas es de 91.44 [L/h] siendo necesario una cantidad de 7540 [L/h] para el correcto funcionamiento del motor utilizado en el ensayo, las pruebas realizadas considerando la acumulación de 1.5 [L] logran hacer funcionar el motor por 8 [s], lo que demuestra la insuficiente capacidad que posee el sistema de alimentar con combustible al motor utilizado, otro problema que se presenta, es la regulación de la RAC y el tiempo de encendido, esto debido a que el período de duración del motor funcionado no es el suficiente como para regularlas, además que no existe en el ensayo un sistema de dosificación de combustible que permita regular la cantidad de hidrógeno suministrado a la combustión.

Para esto, sin considerar el tema del suministro de combustible, se pueden considerar 3 posibles ideas con el fin de solucionar el inconveniente de baja alimentación de combustible:

1. La primera opción trata de cambiar el motor por uno más pequeño, donde la cilindrada sea menor al utilizado durante el ensayo (107 [cm³]) por ende una demanda menor de combustible y con esto poder abastecerlo con el combustible generado.

2. La segunda opción es aumentar las dimensiones de los generadores, o agregar una mayor cantidad de generadores al sistema, que permita una entrega mayor de combustible que pueda satisfacer la demanda del motor utilizado.
3. Por último, realizar una acumulación mayor a la realizada en el ensayo (1.5 [L]), que permita aumentar el tiempo de funcionamiento del motor en comparación a la duración del ensayo (8 [s]), idealmente mantener funcionando al motor durante 15 minutos ya que es el tiempo suficiente para desarrollar ensayos que permitan regular la RAC, el tiempo de encendido y la medición de torque y potencia.

3.9.1 Utilización de motor de menor cilindrada

Como fue mencionado en el punto anterior una de las posibles soluciones son utilizar un motor que posea una cilindrada inferior a la aplicada en el ensayo, una sugerencia es el motor utilizado en una moto-bomba [24] la que consta de un ciclo de funcionamiento de 4 tiempos y posee una cilindrada de 38 [cm³], este motor al ser de menor cilindrada que el utilizado en el ensayo requiere una menor alimentación de combustible, sin embargo, es posible que la demanda de combustible no pueda ser cumplida con los generadores sin considerar la acumulación.

3.9.2 Aumento de la producción de hidrógeno

Como fue demostrado durante el trabajo aumentar el área de contacto de las placas con respecto al el electrolito aumenta la producción del gas, sin embargo, para poder lograr suplir la demanda de combustible se debe amplificar de forma considerable los generadores, esto lleva a que el consumo de energía aumente al igual que el tamaño de los dispositivos.

3.9.3 Aumento de la acumulación de hidrógeno

El aumentar el tamaño del acumulador permite almacenar una mayor cantidad de combustible, lo que podría abastecer por una mayor cantidad de tiempo al motor de combustión.

El siguiente cálculo muestra la cantidad en volumen de hidrógeno para mantener al motor funcionando durante 1 minuto:

Datos:

$$Be = 7540 \frac{l}{h}$$

Conversión de unidades de L/h a L/min:

$$7540 \frac{L}{H} \times \frac{1 h}{60 min} = 125.6 \frac{L}{min}$$

Como se aprecia en la conversión de unidades se necesita un volumen de 125.6 [L] para abastecer al motor utilizado durante el ensayo por un minuto. Para poder almacenar tal cantidad se puede considerar un acumulador cilíndrico de 1 [m] de altura y un diámetro de 400 [mm]

3.10 ORIENTACIÓN A TRABAJOS FUTUROS

Se debe considerar la diferencia de producción realizada entre el trabajo de título de Torreblanca, Gonzáles [22] donde la producción del gas es de 300 [ml/min] con la de este trabajo desarrollado donde la producción es de 1524 [ml/min], si bien es un aumento considerable la producción de hidrógeno es insuficiente para poder operar en el motor de combustión interna, además se debe considerar la deficiente manera de suministrarlo al motor.

Por lo cual los siguientes trabajos relacionados con alimentar con hidrógeno a un motor de combustión deben estar enfocadas en presentar sistemas que permitan almacenar el combustible, teniendo siempre presentes las normas de seguridad, teniendo en cuenta que la acumulación de hidrógeno conlleva grandes riesgos de explosión, por lo que se debe estudiar en diseños que minimicen los riesgos.

Otro punto a desarrollar es el suministro de gas hacia el motor, en este trabajo se utilizó el carburador del motor, pero no es la manera apropiada de realizarlo, la mezcla no pudo ser controlada, por lo que se plantea el uso de un difusor de gas aplicado para motores de combustible gaseoso como un regulador de GLP, con los que se puede regular de mejor

forma, recordar que el carburador está diseñado para regular mezclas con un combustible líquido.

CONCLUSIONES

El desarrollo del trabajo estuvo enfocado en realizar un ensayo en donde un motor de combustión interna pueda operar con hidrógeno autogenerado, para esto se utilizó un motor de combustión interna de 4 tiempos en su ciclo de funcionamiento y de una cilindrada de 107 [cm³], el hidrógeno fue obtenido mediante 2 generadores, uno seco y el otro húmedo, donde el gas fue almacenado en un acumulador de 1.5 litros, el que pudo mantener funcionando al motor por alrededor de 8 [s].

Como resultado de los ensayos ejecutados, se obtuvo que la producción de hidrógeno puede ser lograda de manera sencilla a través de la electrolisis y basándose en las normas de seguridad. En el trabajo se probó en principio con un generador húmedo, el cual tiene una producción aproximada de 12.5 [ml/s], flujo que fue insuficiente para lograr combustionar dentro del cilindro, posteriormente se utilizó ambos generadores desarrollados (seco y húmedo) donde el caudal generado de hidrógeno gaseoso ascendió a un flujo aproximado de 25.4 [ml/s], este caudal permitió el arranque del motor, mas no mantenerlo en funcionamiento, no obstante la acumulación de gas mediante el cierre del paso de este en la línea de suministro permite mantener al motor funcionando por 3 [s], por lo que se concluye que la producción de combustible no es suficiente para abastecer al motor de combustión interna presentado en el trabajo, sin embargo, utilizando el acumulador creado con la finalidad de solucionar el problema de baja producción, permite que el tiempo de trabajo ascienda hasta los 8 [s] de funcionamiento, gracias a que con él se logra acumular aproximadamente 1.5 [L] de hidrogeno.

El principal problema que presenta este sistema es la dosificación del combustible, debido a que con los recursos disponibles en este trabajo, no se logra regular la relación aire/combustible, lo que hace necesario implementar un sistema que permita dosificar el gas, para esto se propone la utilización de un conjunto encargado de suministrar el combustible similar al utilizado en equipos que operan con gas licuado de petróleo (GLP), la implementación de estos componentes permitirán que exista un control sobre la cantidad de combustible utilizado y de este modo aprovechar de manera eficiente el hidrógeno generado. Otra dificultad existente es el tiempo que opera el motor con dicho combustible, dentro del trabajo se plantean tres tipos de soluciones, que pueden trabajar en conjunto, las que son el cambio de motor por uno de cilindrada inferior al utilizado, el aumento de la producción de hidrógeno y la acumulación del gas.

En cuanto a los generadores utilizados en este trabajo, si se comparan desde el punto en que ambos poseen la misma área de placas, el generador húmedo logra una producción mayor de gas que el generador seco, sin embargo, el generador húmedo requiere una mayor cantidad de amperaje que el tipo seco, 30 [A] y 20 [A] respectivamente. Además, el generador seco a diferencia del húmedo no presenta problemas de sobrecalentamiento ya que tiene como ventaja un consumo menor de corriente, y debido a que sus placas se encuentran en contacto directo con el aire puede refrigerarse, provocando que su temperatura se mantenga estable en 42 [°C], evitando así riesgos de derretimiento, quema de circuitos y hasta una posible explosión, debido a esto que se recomienda el uso de generadores tipo seco por ser más seguros.

Finalmente, la idea de implementar el hidrógeno como combustible en vehículos en reemplazo de los combustibles fósiles, es factible, ya que este combustible es una fuente inagotable de energía al contrario de los combustibles fósiles actualmente utilizados, asimismo la combustión de hidrógeno tiene como resultado vapor de agua y nitróxidos, siendo estos gases posibles de tratar para disminuirlos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] DIARIO LA INFORMACION El NOx contamina el aire, el CO2 altera el clima - España - [Online]. Available: https://www.lainformacion.com/economia-negocios-y-finanzas/petroleo-y-gases-primarios/el-nox-contamina-el-aire-le-co2-altera-el-clima_Dq7iBEXTE4eT2pfQwAdJu/. [consultada: 02 diciembre 2018].
- [2] SCIELO Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades [en línea] https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642017000100002 [consultada: 10 de junio 2018]
- [3] EL DIARIO La producción mundial de vehículos creció un 5 % en 2016, según la OICA [en línea] https://www.eldiario.es/economia/produccion-mundial-vehiculos-crecio-OICA_0_620138774.html. [consultada: 29 agosto 2018].
- [4] Norma ISO/TR 15916:2015. Consideraciones básicas para la seguridad de los sistemas de hidrógeno, Organización Internacional para la Estandarización (Suiza). <https://www.iso.org/standard/56546.html> [consultada: 30 agosto 2018].
- [5] BRANTT Brian Gabriel, FARÍAS Cristopher Yosimar. Agua, combustible alternativo. Una aplicación, Tesis (Técnico en Mecánica Automotriz) Viña del Mar, Chile; UTFSM, 2009.
- [6] FÁBREGA Marc Ramos. Hidrógeno aplicación en motores de combustión interna. Tesis (Ingeniería Técnica Naval) Barcelona, España; Facultad de Náutica de Barcelona, 2009
- [7] HORTAL Mario Aguer, BARRERA Angel Luis, El Hidrogeno: Fundamento de un futuro equilibrado, 2012.
- [8] SIERRA, Emilio Turmo, NTP 379: Productos inflamables: variación de los parámetros de peligrosidad nstituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1993.
- [9] PINEDA Daniel Alejandro, evaluación técnico económica de una planta de producción de hidrógeno mediante electrólisis de agua utilizando energía eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia, Tesis (ingeniero civil químico) Santiago, Chile; Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería química y biotecnología evaluación, 2009.
- [10] VILLAR Gimeno Joane, Oxidación parcial de metano sobre catalizadores NiAl₂O₄/CeO₂, Vizcaya, España; Universidad del país Vasco, 2016.
- [11] RODRÍGUEZ José Manuel Electrólisis a altas temperaturas, Tesis (Ingeniería de las Tecnologías Industriales) Sevilla, España; Universidad de Sevilla, 2016

- [12] HISTORIA GENERAL La tragedia del zeppelin Hindenburg.” [en línea] <https://historiageneral.com/2011/01/24/la-tragedia-del-zeppelin-hindenburg/> (consultado 02 de noviembre 2018)
- [13] MIELESEXPERTOMECHANICS Mecánica Automotriz : Reseña Histórica del motor de Combustión Interna. [en línea] <http://mielesexpertomechanics.blogspot.com/2015/08/resena-historica-del-motor-de.html>. [consultada 02 de noviembre 2018].
- [14] VIDASOSTENIBLE Historia de las tecnologías de reducción de emisiones contaminantes en vehículos [en línea] <http://www.vidasostenible.org/informes/historia-de-las-tecnologias-de-reduccion-de-emisiones-contaminantes-en-vehiculos/>. [consultada 26 de febrero 2019].
- [15] LEYCHILE DTO-4 29-ENE-1994 MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES - Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional [en línea] <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=7307>. [consultada 26 de Marzo 2019].
- [16] ELECTRICAPLICADA Eficiencia de un motor eléctrico y los valores más comunes [en línea] <https://www.electricaplicada.com/eficiencia-de-un-motor-electrico-y-los-valores-mas-comunes/>. [consultada 02 de diciembre 2018].
- [17] MOTORPASION El motor de combustión es el más eficiente hoy: FALSO [en línea] <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/el-motor-de-combustion-es-el-mas-eficiente-hoy-falso>. [consultado 04 diciembre 2018].
- [18] TOYOTA Toyota Mirai - Vehículo de hidrógeno - Concept Toyota [en línea] <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/new-toyota-mirai.json>. [consultado: 05 de diciembre 2018]
- [19] PEREIRA Jesús San Martín, autonomía de vehículos de hidrógeno por celda de combustible, Tesis (técnico universitario en mecánica automotriz), Talcahuano, Chile; UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA, 2012.
- [20] AUTOMOBILES Honda Clarity Fuel Cell 2018 Auto a hidrógeno [en línea] <https://es.automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell#run-out-of-fuel>. [consultado 02 de noviembre 2018].
- [21] BRUCE Pruzzo, Piero. PICÓN Gutierrez, Guillermo. Estudio y evaluación de adición de hidrógeno gaseoso autogenerado para un motor de ciclo Otto de cuatro tiempos con inyección. Tesis (Técnico Mecánica Automotriz) Viña del Mar, Chile; UTFSM. Sede Viña del Mar, 2010.
- [22] TORREBLANCA Bernal Williams, GONZÁLES Alcaino Ignacio. Transformación de motor ciclo Otto de grupo electrógeno para operar con hidrógeno gaseoso. Tesis (Técnico Mecánica Automotriz) Viña del Mar, Chile; UTFSM Sede Viña del Mar, 2011..

- [23] REVISTA ELÉCTRICA, Antofagastino creó una cocina de hidrógeno que saca la energía del agua [en línea] <http://www.revistaei.cl/2013/11/11/antofagastino-creo-una-cocina-de-hidrogeno-que-saca-la-energia-del-agua/> [consultada: 20 de septiembre 2017].
- [24] TODOALCOSTO [motobomba-1-38cc-4t](https://www.todoalcosto.cl/motobomba/382-motobomba-1-38cc-4t.html) [en línea] <https://www.todoalcosto.cl/motobomba/382-motobomba-1-38cc-4t.html>.
[consultado: 02 de Febrero 2019].

ANEXOS

ANEXO 1: **LISTA DE MATERIALES UTILIZADOS PARA**
ELABORACIÓN DE GENERADOR DE HIDRÓGENO TIPO
HÚMEDO

9 placas de acero inoxidable, de 3 x 5 pulgadas
2 pernos y 2 tuercas de technyl M10
Agua de mar
18 golillas de plástico de espesor de 1mm
Deposito hermético
1 metro de manguera
1 conector para manguera
2 pernos de acero inoxidable
4 tuercas
2 terminales de ojo
1 metro de cable
1 interruptor
Batería de 12 volt 55 AH

ANEXO 2: **LISTA DE MATERIALES UTILIZADOS PARA**
ELABORACIÓN DE GENERADOR DE HIDRÓGENO TIPO
SECO

9 placas de acero inoxidable 316L de dimensiones 5 x 5 pulgadas.
4 pernos M8 de 12 cm de largo.
8 tuercas M8 respectivas para los pernos.
2 tapas de acrílico de 14 x 14 cm.
5 conectores para mangueras.
1 tubo de PVC de 17 cm de largo y 11 cm de diámetro.
2 tapas para el tubo de PVC de 11 cm de diámetro.
10 juntas de gomas.

ANEXO 3: DATOS TECNICOS DEL MOTOR A UTILIZAR

Datos técnicos motor JT152FMH
Tipo de motor: monocilíndrico, 4 tiempos, 2 válvulas, refrigeración por aire
Potencia: 5.0/8000 [kW/RPM]
Torque: 6.9/6500 [Nm/RPM]
Consumo de combustible (93 octanos): 367 [g/kWh]
Diámetro x carrera: 52.4 x 49.5 [mm]
Cilindrada: 107[cc]
Relación de compresión: 9:1
Ignición: CDI
Lubricación: por presión
Partida: motor de arranque
Transmisión automática
Capacidad de lubricante: 900[cc]

ANEXO 4: COSTOS

9 placas de acero inoxidable, de 3 pulgadas x 5 pulgadas	\$ 20,000
2 pernos de tehnyl M10	\$ 1,000
2 tuercas de tehnyl M10	\$ 1,000
2 interruptores on/off	\$ 5,000
3 metro de manguera	\$ 6,200
2 pernos	\$ 200
4 tuercas	\$ 200
4 terminales de ojo	\$ 1,000
1 metro de cable	\$ 1,500
1 interruptor	\$ 700
Batería de 12 volt	\$ 40,000
Motor de motocicleta	\$ 80,000
Aceite motor 20w50 1lt	\$ 5,000
Reparación del motor	\$ 30,000
25 placas de acero inoxidable	\$ 40,000
3 Relé 30 A	\$ 10,000
Válvula de paso de gas	\$ 7,000
Tubos de PVC	\$ 10,000
Total	\$ 258,000

ANEXO 5: PROBLEMAS Y SOLUCIONES PARA EL CORRECTO FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA OPERANDO CON HIDRÓGENO.

- **Problema de autoencendido**

El principal desafío para poder trabajar de forma eficiente con el hidrógeno en un motor de combustión interna es el autoencendido del combustible, esto se debe a que la mezcla del hidrogeno con el oxígeno es inflamable y solo necesita un pequeño aporte energético para que este combustione como ya se ha mencionado anteriormente. El fenómeno de auto encendido se genera producto de temperaturas elevadas, provocadas por defectos en la cámara de combustión, bujías calientes, puntos incandescentes como la carbonilla y gases de escapes que no han sido evacuados.

Existe mayor probabilidad de un autoencendido cuando el hidrógeno es mezclado con el aire antes del cilindro (múltiple de admisión), como es en el caso de utilización de sistemas de carburador o inyección indirecta.

- **Fallos en sistema de lubricación**

Como bien ha sido mencionado con anterioridad, la densidad del hidrógeno es baja, por lo que al ser comprimida en un motor de combustión interna tiende a filtrarse entre los anillos y el cilindro, de esta forma mezclando el hidrógeno con el lubricante.

Además, los desechos de la combustión producto del hidrógeno generan grandes cantidades de agua, las que pueden situarse en el lubricante, disminuyendo la efectividad de lubricar las piezas móviles del motor.

Otro punto por considerar es que la utilización del hidrógeno dentro de esta clase de motor busca la eliminación de gases contaminantes. Se debe tener en cuenta que los lubricantes están compuestos por hidrocarburos y que son quemados en pequeña cantidad dentro del cilindro, estos aportan gases contaminantes tales como el CO, CO₂ y el HC.

- **Aumento de presión de cárter**

Como se describe en el punto anterior, la fuga de la compresión en el cilindro y sobre todo del hidrógeno genera una presión mayor de cárter que la que se genera en un motor de combustión interna trabajando con gasolina, siendo esta la presión atmosférica; esto conlleva a diversos problemas tales como una posible explosión por acumulación de hidrógeno en un ambiente de alta presión que puede aportar la cantidad de energía para que el gas combustione, fugas de aceite debido a que retenes o empaquetaduras no soporten las altas presiones produciendo una disminución del aceite que podría dejar sin lubricación al motor, mayor consumo de lubricante dentro del cilindro y hasta destrucción de piezas del motor tales como anillos.

- **Presencia de agua en línea de escape**

Como se dijo con anterioridad la combustión por hidrógeno genera grandes cantidades de agua que serán expulsadas como vapor por las temperaturas existentes en la combustión y en el cilindro. A medida que los gases son expulsados del motor mediante la línea de escape las temperaturas descienden, generando que el vapor de agua se condense y vuelva a ser líquido, si este fluido fuera estancado dentro del sistema de escape puede producir corrosión en él dañando la línea.

- **Emisiones de NOx**

Se tiene conocimiento de que el nitrógeno no participa en la combustión debido a que es un gas inerte, sin embargo, las combustiones a elevadas temperaturas producen una reacción entre el oxígeno y el nitrógeno formando una molécula que resulta ser contaminante, el NOx es una molécula que provoca problemas a la salud y al medio ambiente.

Motores que trabajan con mezclas pobres de combustibles están propensos a emitir cantidades considerables de NOx. Sin embargo, utilizando esta mezcla se obtiene un mejor provecho del combustible, que se ve reflejado en un menor consumo de hidrógeno, quema completa del gas y desarrollo de toda la energía acumulada en el combustible. El hidrógeno posee un rango de inflamabilidad bastante amplio que le permite trabajar con mezclas pobres.

- **Producción de hidrógeno**

Como bien se ha mencionado durante el trabajo, la obtención de hidrógeno es bastante compleja, obtener la cantidad necesaria de este combustible para suplir la demanda del motor conlleva a un gran consumo de energía, en este caso electricidad, el problema de todo esto es que lo vuelve ineficiente debido al poco provecho que se obtiene del proceso de la obtención de la electricidad utilizada para desarrollar la conversión de energía eléctrica en energía química acumulada en el hidrógeno, la que posteriormente es quemada en un motor de combustión interna convirtiendo la energía química en mecánica.

Además, cabe destacar el deterioro de las placas de los generadores de hidrógeno encargados de llevar a cabo la electrólisis, que demuestran que deberán ser remplazados según el tiempo de uso que tenga el sistema

- **Solución de autoencendido**

El sistema utilizado para evitar este conflicto es la inyección directa en la cabeza del pistón, este método evita el autoencendido fuera del cilindro, además puede suministrar el hidrógeno en estado líquido lo cual libera mayor cantidad de energía al ser oxidado, debido a la baja temperatura del hidrógeno generando un mejor llenado del cilindro y reducir la temperatura del cilindro evitando puntos calientes.

Otra forma de evitar el autoencendido es la utilización de válvulas refrigeradas por sodio, bujías con un coeficiente alto de conductividad térmica, cambios estructurales en las culatas que lleven a tener una circulación del líquido refrigerante en zonas cercanas a las bujías y a las válvulas, con el fin de ayudar a liberar la temperatura del cilindro hacia el ambiente.

- **Solución de filtrado de hidrógeno hacia el cárter**

Para poder controlar o disminuir la cantidad de hidrógeno que se filtra a través de los anillos y el cilindro hacia el cárter se debe tener en cuenta una tolerancia minuciosa entre anillo, pistón y cilindro, con el fin de mantener una pequeña distancia impidiendo que el hidrógeno pueda circular desde la cámara de combustión al cárter. Se debe considerar materiales que no varíen de forma notoria sus dimensiones dependiendo de las temperaturas existentes, hoy en día el elemento más utilizado en motores diseñado para trabajar con hidrógeno son las aleaciones de aluminio.

- **Liberación de presión de cárter**

Como se mencionó con anterioridad, la presión de cárter es mayor en un motor que trabaja con hidrógeno que uno que trabaja con gasolina, por lo cual se deben tomar medidas para evitar esta acumulación de presión dentro del motor, la idea más simple es instalar una válvula limitadora de presión, la que tendrá la misión de mantener una presión óptima dentro del cárter de esta forma evitando la acumulación de presión y los riesgos antes mencionados que conlleva.

- **Presencia de agua en línea de escape**

La fabricación de líneas de escape debe estar orientado a la expulsión total del agua producto de la combustión del hidrógeno, se debe tener en cuenta una pendiente de forma que el agua pueda fluir gracias a la fuerza de la gravedad hacia la salida de la línea, además no debe poseer obstrucciones en el flujo del agua en el diseño de la línea de escape y de los seleccionadores. El material que se recomienda utilizar para la fabricación del sistema de evacuación de gases es el acero inoxidable, debido a que, si existen problemas de acumulación de agua, la línea pueda soportar el líquido sin deteriorarse.

- **Emisiones de NO_x**

Las mezclas pobres de aire/combustible y la utilización del aire como oxidante resultan generar nitróxidos dentro de sus residuos de combustión, estas dos circunstancias se encuentran presentes en un motor de combustión interna alimentado con hidrógeno, una forma de eliminar este gas contaminante es utilizar oxígeno como único oxidante en vez de aire, como es utilizado en un cohete espacial, sin embargo este método es muy

costoso, por lo cual se puede disminuir las concentraciones de nitróxidos con sistemas de control de emisiones, el avance que se ha tenido con los motores de combustión interna ha llevado a generar procesos que reducen los gases contaminantes. Una de ellas es la utilización del sistema EGR (recirculación de gases de escape), este proceso tiene como principio reincorporar gases de escape a la combustión, de esta forma disminuye la temperatura alcanzada en esta reacción reduciendo la producción de NOx, otra forma de tratar este gas son con tratamientos postcombustión que puedan reducir la concentración de este gas, como por ejemplo catalíticos orientados al control de NOx.

- **Producción de hidrógeno**

La mayor dificultad que se encuentra al momento de utilizar el hidrógeno es la obtención de este, además debe considerarse que la utilización de hidrógeno está orientada a generar procesos de conversión de energías libres de emisiones contaminantes, por lo cual la obtención de hidrógeno debe estar dada por el proceso de electrólisis, la electricidad que se suministra debe ser obtenida de energías renovables como lo es la solar, debido que de esta forma no se utiliza derivados del petróleo.

La forma más eficiente de trabajar el hidrógeno dentro de un motor de combustión es de forma líquida, por lo cual para que este sistema pueda ser implementado sacando el mejor rendimiento, deben implementarse plantas de generación de este elemento a partir de energía solar o eólica, la que posteriormente será almacenada en forma líquida, siendo transportada a centros de carga para los vehículos.

Los vehículos deberán contar con todos los implementos para permitir acumular hidrógeno en forma líquida.