

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SEDE RODRIGO FACIO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

Tesis de grado

**UTILIZACIÓN DEL OXIHIDRÓGENO COMO ADITIVO  
PARA INCREMENTAR EL DESEMPEÑO DE UN MOTOR  
DE COMBUSTIÓN INTERNA**

Trabajo Final de Graduación sometido a consideración del Tribunal  
Examinador para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Agrícola

Juan Carlos Sánchez Jalet

Agosto, 2016

Esta tesis fue aceptada por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.

---

Dra. Kattia Solís Ramírez

Directora, Equipo Asesor

---

Dr. Pedro Casanova Treto

Miembro, Equipo Asesor

---

Ing. Geovanni Carmona Villalobos

Miembro, Equipo Asesor

---

Ing. Edwin Solórzano Campos, M.Sc

Presidente, Tribunal Examinador

---

Ing. Hubert Morris Grainger

Miembro, Tribunal Examinador

---

Juan Carlos Sánchez Jalet

Estudiante

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi familia que incondicionalmente me han apoyado y fomentado el deseo de superación profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por darme la salud y permitirme llegar a este momento tan especial de mi vida, a mi familia por haberme forjado como la persona que soy y apoyarme durante esta etapa.

A Pedro Casanova y Kattia Solís por todo el apoyo, horas de trabajo y valiosa ayuda para realizar un trabajo de calidad. Agradezco a todas las personas que contribuyeron para la realización del proyecto, en especial a Oscar Badilla y Pedro Rojas por toda la ayuda brindada y finalmente a mis compañeros Diego Fallas, José Quirós y Royner Abarca por ser un apoyo incondicional a través de todos estos años.

# Índice

<b>ÍNDICE DE CUADROS.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xi</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>Planteamiento del problema. ....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>Objetivo General.....</b>	<b>3</b>
<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 El motor de combustión interna .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 La celda electrolítica .....</b>	<b>9</b>
1.2.1 Definición de celda electrolítica .....	9
1.2.2 Tipos de celdas electrolíticas .....	9
1.2.3 Partes de la celda electrolítica.....	10
1.2.4 Placas .....	10
1.2.5 Electrolito.....	11
1.2.6 Electrólisis .....	12
1.2.7 Ley de Faraday.....	12
1.2.8 Gas de Brown (Oxihidrógeno).....	14
1.2.9 Eficiencia de la celda electrolítica. ....	15
<b>1.3 Aplicación del oxihidrógeno en motores de combustión interna.....</b>	<b>16</b>
1.3.1 Flujos de oxihidrógeno .....	16
1.3.2 Concentraciones de electrolitos .....	17
1.3.3 Corriente suministrada .....	19

1.3.4 Aumento de potencia y torque .....	19
1.3.5 Disminución de gases contaminantes .....	21
1.3.6 Disminución del consumo de combustible .....	22

**CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA, SELECCIÓN DE MATERIALES ARMADO Y  
FUNCIONAMIENTO DE LA CELDA ELECTROLÍTICA .....24**

<b>2.1 Materiales .....</b>	<b>24</b>
2.1.1 Aislante .....	24
2.1.2 Acero inoxidable 316L .....	27
2.1.3 Acrílico .....	27
2.1.4 Agua destilada.....	28
2.1.5 Tornillería .....	28
2.1.6 Depósito/Burbujeador .....	28
2.1.7 Tuberías .....	28
2.1.8 Cable eléctrico .....	30
2.1.9 Relevador .....	30
2.1.10 Fusible.....	30
<b>2.2 Métodos.....</b>	<b>30</b>
2.2.1 Preparación de las placas de acero inoxidable 316L .....	31
2.2.2 Armado de celda electrolítica .....	34
2.2.3 Configuración del armado de la celda .....	38
2.2.4 Conexión eléctrica .....	41
2.2.5 Medición de la producción de oxihidrógeno .....	41
2.2.6 Análisis teórico de la producción de HHO .....	42
2.2.7 Variabilidad en la eficiencia del sistema según la temperatura de funcionamiento .....	46
2.2.8 Tasa de evaporación de agua por presión de vapor .....	46
2.2.9 Medición de potencia y torque en dinamómetro .....	49
2.2.10 Medición de gases.....	50

<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1 Producción de oxihidrógeno .....</b>	<b>51</b>
3.1.1 Variabilidad en la producción de gas como función de la concentración del electrolito utilizado .....	51
3.1.2 Variabilidad de la cantidad de gas producido en función a la corriente suministrada .....	55
<b>3.2 Eficiencia de la celda.....</b>	<b>58</b>
<b>3.3 Medición de potencia, torque y REAC en la empresa AUTOCOM .....</b>	<b>61</b>
3.3.1 Relación Estequiométrica Aire/Combustible.....	63
3.3.2 Potencia y torque .....	64
3.3.3 Torque.....	66
<b>3.4 Análisis de gases contaminantes .....</b>	<b>68</b>
3.4.1 Monóxido de carbono .....	71
3.4.2 Dióxido de carbono.....	72
3.4.3 Hidrocarburos .....	74
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>76</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>83</b>
Anexo A. Ficha técnica de neopreno. ....	83
Anexo B. Modelo de celda 4N/5E/21P.....	84

# ÍNDICE DE CUADROS

## CAPÍTULO 1

Cuadro 1. 1. Electrolitos utilizados en electrólisis.....	11
Cuadro 1. 2. Propiedades del hidrógeno vs gasolina.....	14
Cuadro 1. 3. Propiedades de los combustibles y el hidrógeno .....	15
Cuadro 1. 4. Resumen de flujos utilizados en motores de combustión interna reportados en la literatura.....	17
Cuadro 1. 5. Resumen de resultados de análisis de gases contaminantes reportados en la literatura.....	22
Cuadro 1. 6. Resumen de resultados de análisis de consumo específico de combustible (bsfc) reportados en la literatura.....	23

## CAPÍTULO 3

Cuadro 3.1. Producción de oxihidrógeno entre arreglos 5N/3E/13P y 4N/5E/21P donde se varía la concentración.....	52
Cuadro 3. 2. Comparación para el factor: Concentración electrolito (%). .....	53
Cuadro 3. 3. Comparación para el factor: Concentración electrolito (%) con 8 A.....	54
Cuadro 3. 4. Comparación para el factor: Concentración electrolito (%) con 6 A.....	54
Cuadro 3. 5. Comparación para el factor: Concentración electrolito (%) con 4 A.....	54
Cuadro 3. 6. Producción de oxihidrógeno entre arreglos 5N/3E/13P y 4N/5E/21P al variar la corriente.....	56



Cuadro 3. 7. Comparación para el factor: Corriente (A). .....	57
Cuadro 3. 8. Comparación para el factor: Corriente (A) con 1 % de concentración de electrolito.....	57
Cuadro 3. 9. Comparación para el factor: Corriente (A) con 0,5 % de concentración de electrolito.....	57
Cuadro 3. 10. Comparación para el factor: Corriente (A) con 0,25 % de concentración de electrolito.....	58
Cuadro 3. 11. Comparación para el factor: Corriente (A) con 0,125 % de concentración de electrolito.....	58
Cuadro 3. 12. Resumen de producción teórica de oxihidrógeno para la configuración 4N/5E/21P. ....	59
Cuadro 3. 13. Eficiencia de la celda para el caso específico 4N/5E/21P 1 % a diferentes corrientes. ....	59
Cuadro 3. 14. Valores de voltaje entre placas adyacentes para 1 y 0,5 % de concentración de KOH.....	61
Cuadro 3. 15. Especificaciones técnicas del vehículo de prueba para potencia, torque y REAC. ....	62
Cuadro 3. 16. Especificaciones técnicas del vehículo de prueba para análisis de gases. ....	68

# ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1

Figura 1. 1. Diagrama de sistema. ....	8
Figura 1. 2. Diagrama de sistema generador de oxihidrógeno. ....	9
Figura 1. 3. Conductividad eléctrica de electrolitos según su concentración. ....	18

## CAPÍTULO 2

Figura 2. 1. Resistencia de diferentes empaques al hidróxido de potasio. ....	26
Figura 2. 2. Empaque de neopreno hecho a mano. ....	26
Figura 2. 3. Medidas y especificaciones del corte para placa electrodo neutro. ....	32
Figura 2. 4. Medidas y especificaciones del corte para placa electrodo vivo. ....	32
Figura 2. 5. Placa limada y lijada, lista para el lavado. ....	33
Figura 2. 6. Limpieza de placas con ácido acético. ....	34
Figura 2. 7. Distribución de agujeros, acrílico frontal. ....	35
Figura 2. 8. Distribución de agujeros, acrílico posterior. ....	35
Figura 2. 9. Distribución de agujeros en acrílicos, vista 3d. ....	36
Figura 2. 10. Preparación del acrílico. ....	36
Figura 2. 11. Marcado y perforación del acrílico frontal. ....	37
Figura 2. 12. Diagrama tridimensional celda electrolítica. ....	38
Figura 2. 13. Disposición de placas y empaques. ....	39
Figura 2. 14. Explosión de todos los elementos que conforman la celda. ....	39

Figura 2. 15. Vistas de la celda electrolítica .....	41
Figura 2. 16. Celda electrolítica terminada.....	40
<b>CAPÍTULO 3</b>	
Figura 3. 1. Medición de voltaje entre celdas adyacentes. ....	60
Figura 3. 2. Tacómetro digital modelo MGT-300 de la marca <i>BrainBee</i> .....	63
Figura 3. 3. Medidor digital de relación Aire/Combustible de la marca <i>Innovate Motorsports</i> modelo LM-1.....	63
Figura 3. 4. Relación Aire/Combustible en motor diesel con y sin HHO. ....	64
Figura 3. 5. Comparación de curvas de potencia a diferentes flujos de HHO.....	65
Figura 3. 6. Comparación de curvas de torque a diferentes flujos de HHO.....	67
Figura 3. 7. Analizador de gases <i>Tecnotest 488</i> . ....	70
Figura 3. 8. Conexión de la sonda a la salida del escape.....	70
Figura 3. 9. Emisiones de CO en función de las rpm cuando se usan diferentes flujos de HHO. ....	72
Figura 3. 10. Emisiones de CO <sub>2</sub> en función de las rpm al utilizar diferentes flujos de HHO. ....	73
Figura 3. 11. Emisiones de HC en función de las rpm utilizando diferentes flujos de HHO. ....	74

## RESUMEN

En la presente investigación, se construye una celda electrolítica capaz de generar oxihidrógeno. Se completa el desarrollo del sistema, al construir y acondicionar el resto de componentes que lo conforman para poder ser instalado y monitoreado.

Se establecen las condiciones base midiendo los parámetros de CO, CO<sub>2</sub>, HC, potencia, torque y REAC con el vehículo funcionando solamente con combustible.

Se prescriben los diferentes flujos producidos por dos configuraciones de celdas 5N/3E/13P y 4N/5E/21P; con esto se obtienen flujos máximos y determinan la concentración de KOH más eficiente para la producción de HHO. Esta concentración es de un 1% que permite un rango de corrientes amplio y un flujo alto de HHO.

Para la configuración 5N/3E/13P, el flujo máximo alcanzado es de 11,67 mL/s a una concentración del 1% y una corriente de 10 A. Para la configuración 4N/5E/21P, el flujo máximo alcanzado es de 27,18 ml/s a una concentración del 1% y una corriente de 25 A.

Se instala el sistema en el vehículo de prueba, tanto para la prueba de potencia en la empresa AUTOCOM, como para las pruebas de gases contaminantes en las instalaciones del INA.

El comportamiento del gas CO no es predecible en el caso estudiado, como referencia los valores promedio para ralentí, 1500, 2000 y 2500 rpm son 3,75, 3,86, 2,59, y 2,30 % vol respectivamente, sin embargo, se obtiene una baja considerable en el caso específico de las 1500 rpm con un flujo de 6,64 mL/s para una reducción del 12,18 %. El CO<sub>2</sub> se mantiene muy estable durante las pruebas. Como referencia los valores promedio para ralentí, 1500, 2000 y 2500 rpm son 9,73, 12,48, 12,23, y 11,91 % vol respectivamente. El CO<sub>2</sub> solo varía en un 1 %, en la mayoría de los casos y presenta un incremento en ralentí con un flujo de 22,39 mL/s, para un valor de 10,27 % vol, equivalente a un aumento del 5,55 % con respecto a la prueba sin HHO. Las variaciones más representativas se presentan en el

análisis de los hidrocarburos, como referencia los valores promedio para ralentí, 1500, 2000 y 2500 rpm son 1501,50, 331,77, 1117,25, y 1533,50 ppm vol respectivamente, estos muestran una baja de hasta el 32,67 % cuando se suministra un flujo de 22,39 mL/s y muestran un mejor desempeño cuando se utilizan flujos de HHO altos.

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de potencia, torque y REAC, se obtienen como resultado un incremento en la generación de potencia y torque para todos los flujos de HHO utilizados.

Para el análisis de REAC, con regímenes de giro del motor a 850, 1000, 1500 y 2000 rpm, se registra un cambio de 2,6, 1,8, 1,9 y 2,1 (moléculas de oxígeno por cada molécula de combustible).

La potencia y el torque generados se alcanzan a regímenes de giro menores en cuanto se aumenta la cantidad de HHO. Como referencia el valor máximo de potencia alcanzado fue de 88,27 Hp y de 143,39 lb-ft de torque. En promedio se obtiene una ganancia de 226,87 rpm para un flujo de 22,39 mL/s y, una ganancia de 103,71 rpm para un flujo de 9,19 mL/s, con incrementos de hasta el 14,52 % en potencia y 6,65 % de torque.

# INTRODUCCIÓN

## **Planteamiento del problema.**

El alto precio de los combustibles fósiles es un factor emergente que impulsa el aumento en el costo de los alimentos. Este factor está cada vez más correlacionado con el precio de los productos agrícolas; esto debido a la automatización e implementación de equipo mecánico en la agroindustria.

El petróleo, como principal fuente de combustible, incrementa su valor económico debido a su escasez y alto impacto ambiental. No obstante, tiene dos principales consecuencias: la primera, la acumulación de gas efecto invernadero en la atmósfera y, la segunda, el aumento en los costos de las actividades productivas. Los responsables de este efecto, son en gran medida, los motores de combustión interna porque emiten gases como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre otros.

Por su parte, el hidrógeno es un elemento gaseoso reactivo, insípido e incoloro. Además, es un gas diatómico altamente inflamable; es el más ligero portador de energía y el más abundante en el universo (75 %). Se presenta en el agua, en mayor porcentaje, y es considerado como una solución futura para reemplazar a los combustibles convencionales, (Ramirez & Cujilema, 2011). Sin embargo, mediante una celda electrolítica es posible generar un gas con características inflamables, llamado gas de Brown (oxihidrógeno); éste es una mezcla de hidrógeno diatómico y oxígeno en una proporción de dos a uno, descubierto por el búlgaro Yull Brown; con este gas se pretende mejorar la combustión interna del motor de un vehículo al utilizarlo como aditivo en la combustión.

Los motores de combustión interna han evolucionado en todos sus ámbitos, siempre enfocados a obtener un mayor rendimiento y eficiencia. Las políticas ambientales han llevado este desarrollo a distintos niveles tecnológicos, donde el objetivo principal de las

compañías es fabricar motores amigables con el ambiente, para bajar las emisiones y aumentar el rendimiento de sus máquinas. Esta investigación estudia el comportamiento de los motores de combustión interna a gasolina y se implementa una co-alimentación de oxihidrógeno-gasolina.

El desarrollo de la utilización de energías alternativas permite aumentar el ahorro de combustible y reducir las emisiones nocivas de los motores de combustión interna. Se plantea el agua como fuente de obtención de un aditivo y la construcción de una celda generadora de gas; esta celda descompone el agua en sus átomos constitutivos. Mediante un proceso de electrólisis se tiene hidrógeno como combustible y oxígeno como comburente.

El hidrógeno es el compuesto que almacena la mayor cantidad de energía por unidad de peso 120 MJ/kg; comparado con 54,4 MJ/kg del gas natural, 46,8 MJ/kg de la gasolina y 19,7 MJ/kg del etanol (Al-Rababah & Bhuyan, 2014). Su combustión con el oxígeno del aire produce agua y obtiene un residuo no contaminante. El oxihidrógeno (HHO) es una mezcla de hidrógeno diatómico y oxígeno en una proporción de 2:1; misma proporción del agua. Cuando esta mezcla se enciende, la combustión produce 142,35 MJ/kg (Méndez, 2013). Sin embargo para obtener este combustible es necesario emplear energía a través de la celda mediante un proceso de electrólisis.

El agua pura tiene una conductividad eléctrica alrededor de una millonésima parte de la del agua de mar debido a las sales disueltas; cuando se utiliza agua destilada es necesario adicionar un electrolito (ya sea una sal, un ácido o una base) para mejorar dicha conductividad (Méndez, 2013).

El agua destilada ordinaria en equilibrio con dióxido de carbono en el aire tiene una conductividad aproximada de  $10 \times 10^{-6} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  (20 dS/m). Sin embargo, es insuficiente para lograr un proceso de electrólisis debido a que la corriente eléctrica se transporta por medio de iones en solución (Rossum, 1975). La adición de un electrolito permite elevar la conductividad del agua destilada al punto donde es posible llevar a cabo el proceso de separación de la molécula de agua sin afectar la composición del gas obtenido.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Aumentar la eficiencia y disminuir las emisiones de un motor de combustión interna mediante el uso de oxihidrógeno como aditivo.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar y construir una celda de oxihidrógeno apropiada para las características del motor de combustión interna.
- Instalar el sistema de producción de oxihidrógeno en el vehículo que garantice las normas de seguridad requeridas.
- Analizar y comparar el comportamiento del motor de combustión interna antes y después de la instalación del sistema.



# CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

## 1.1 El motor de combustión interna

Un motor de combustión interna convierte una parte del calor producido por la combustión del combustible en trabajo, conocido termodinámicamente como el ciclo de Otto. Los motores Otto son máquinas térmicas que convierten la energía calórica de un combustible en energía mecánica, mediante la combustión dentro de un cilindro donde se llevan a cabo explosiones que permiten el movimiento de un pistón y como consecuencia el movimiento rotativo del cigüeñal.

La combustión es una reacción química de componentes en la que se desprende una gran cantidad de calor. En toda combustión existen dos elementos; uno que se quema, llamado combustible (gasolina) formado por hidrocarburos y otro que produce la combustión llamado comburente, que es oxígeno procedente del aire atmosférico (composición en volumen 21 % de O<sub>2</sub> y 79 % de N<sub>2</sub>) (Ramirez & Cujilema, 2011).

Los motores de combustión interna constan de una cámara formada por uno o más cilindros. Dentro del cilindro se desliza un pistón que realiza las cuatro fases: admisión, compresión, explosión y escape. Además, cuentan con una entrada de mezcla aire-combustible y una salida de los gases producidos por la combustión.

La eficiencia es el término más usado en motores de combustión interna. La eficiencia se mide por la relación que existe entre la entrada de energía del combustible y la salida de potencia mecánica. La entrada de energía puede ser calculada y la salida de potencia puede ser medida. Dicha potencia generalmente se mide en el eje del motor y se le llama potencia de freno y se calcula mediante la ecuación (1).

$$BP = \frac{2\pi NT}{60000} (kW) \quad (1)$$

Donde:

N: revoluciones del motor (rpm).

T: torque (Nm).

El consumo específico de combustible SFC (por sus siglas en inglés) se define como la tasa de flujo de combustible por unidad de potencia de salida, esto permite medir la eficiencia del motor para producir trabajo (Al-Rababah & Bhuyan, 2014). Se representa mediante la siguiente ecuación.

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{BP} \quad (2)$$

Donde:

$\dot{m}_f$ : tasa de flujo de masa (kg/s).

Si se trabaja con gasolina se tiene:

$$\dot{m}_g = \frac{\gamma_g * V}{t} \quad (3)$$

Donde:

$\gamma_g$ : gravedad específica (0,770 para la gasolina).

V: volumen de gasolina (m<sup>3</sup>).

t: tiempo (s).

Según Al-Rababah & Bhuyan (2014) la tasa para hidrógeno, se obtiene de la ecuación:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{\rho_{H_2} * \dot{V}_{HHO} * 0,55 * 60}{1000} \quad (4)$$

Donde:

$\rho_{H_2}$ : 0,084 kg/m<sup>3</sup>.

0,55: constante (concentración de hidrógeno en el HHO).

$\dot{V}_{HHO}$ : tasa de flujo de oxihidrógeno (L/min).

La relación que existe entre la potencia producida y la energía del combustible quemado, para producir potencia, se conoce como la eficiencia térmica del motor. A partir de los valores anteriores se expresa mediante la ecuación:

$$\eta_{th} = \frac{BP}{m_f * C_v} \quad (5)$$

Donde:

$C_v$ : valor calorífico del combustible.

$C_{vg}$ : 42000 kJ/kg (gasolina).

$C_{vH_2}$ : 120000 kJ/kg (hidrógeno).

Para la combinación se puede obtener un valor determinado mediante la ecuación:

$$C_{vmix} = C_{vg} * [gasolina] + C_{vH_2} * [H_2] \quad (6)$$

Donde:

[gasolina]: porcentajes de concentración de gasolina.

[H<sub>2</sub>]: porcentaje de concentración de hidrógeno.

La relación Aire/Combustible Real se define como la masa de aire por unidad de masa de combustible presente en la mezcla.

$$F = \frac{m_c}{m_a} \quad (7)$$

Donde  $m_c$  y  $m_a$  representan la cantidad de combustible y aire respectivamente.

La relación estequiométrica Aire/Combustible se define como la proporción de combustible y aire químicamente perfecta que permite un proceso de combustión completa.

$$F = \frac{m_{ce}}{m_{ae}} \quad (8)$$

Dos variantes a esta relación ideal en la proporción de aire-combustible pueden ocurrir, una llamada mezcla rica y la otra mezcla pobre. Por un lado, la mezcla rica es la relación de aire-combustible que varía de 14,7 a 1 y se concentra en relaciones de 14,6, 14,5, 14,4 hasta poder encontrar relaciones de 13,0 por una parte de combustible; por otro lado, las mezclas pobres a partir de 14,8, 14,9, 15,0 o más partes de aire por una fracción de combustible.

Los motores donde el control en la alimentación de combustible es electrónico, basan su programación para mantener al motor trabajando con una relación ideal (estequiométrica).

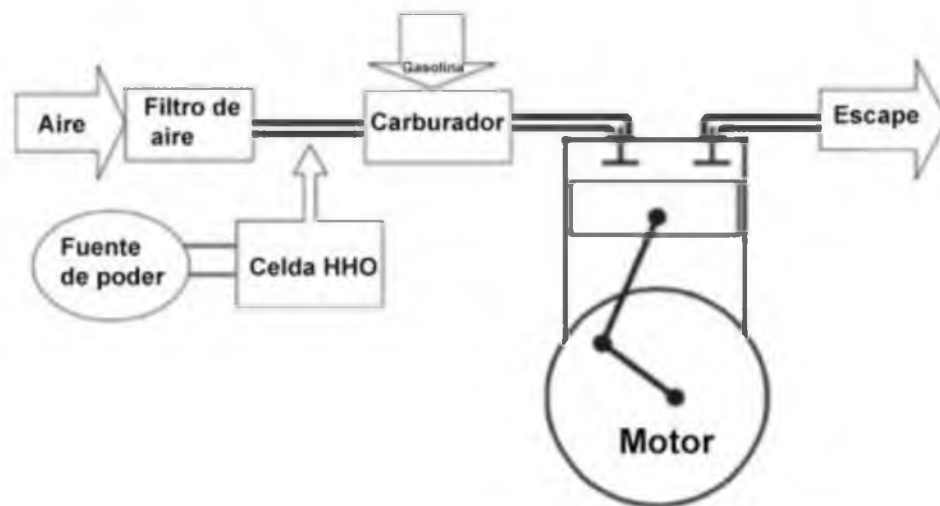
El factor lambda ( $\lambda$ ) se conoce como la relación entre la cantidad de aire necesaria para producir la combustión completa, en relación estequiométrica y la cantidad de aire real succionada por el motor (Guevara, 2010).

Un valor lambda en la prueba de emisiones contaminantes por debajo de uno confirma que el motor está trabajando con una mezcla rica; mientras que un valor por encima de uno será indicativo que se está trabajando con una mezcla pobre; un valor de uno señala una mezcla óptima, así se confirma o descarta que el motor tenga un consumo excesivo de combustible (Molina, 2007).

Los gases emitidos por un motor de combustión interna a gasolina son, principalmente, de dos tipos: inofensivos y contaminantes. Los primeros, están formados, fundamentalmente, por nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. Los segundos son el dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y plomo (Ramirez & Cujilema, 2011).

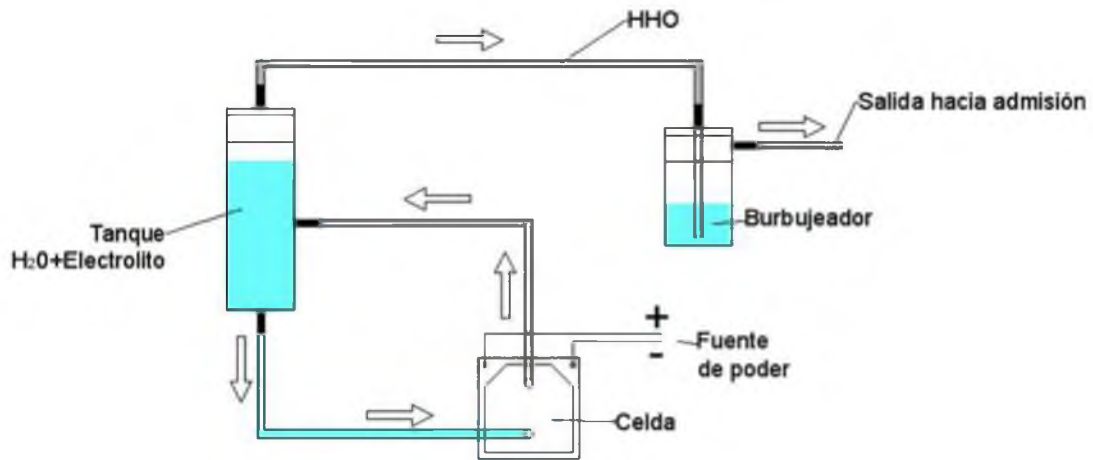
En un sistema híbrido de co-alimentación o *Dual-Fuel* ingresan a las cámaras de combustión dos clases de combustibles -premezclados en la admisión del motor- y luego se inyecta la mezcla en las cámaras de combustión. De acuerdo con el motor que se utilice se trabaja con gasolina o diesel y como alternativo el etanol, GLP o hidrógeno, entre los más utilizados.

Con base en Benítez & Ramos (2013), al instalar un sistema *Dual-Fuel* el motor no sufre ninguna modificación para la adaptación del sistema. Los diferentes componentes del mismo se montan externamente como se observa en las Figuras 1.1 y 1.2. Todas las características técnicas del motor permanecen inalterables luego de la instalación del sistema.



**Figura 1. 1.** Diagrama de sistema.

Fuente: (Al-Rousan, 2010).



**Figura 1. 2.** Diagrama de sistema generador de oxihidrógeno.

## 1.2 La celda electrolítica

### 1.2.1 Definición de celda electrolítica

Una celda electrolítica es un dispositivo capaz de separar la molécula de agua mediante el fenómeno de la electrólisis. Se obtiene hidrógeno y oxígeno en una relación de 2:1, dos moléculas de hidrógeno por cada molécula de oxígeno, o mejor conocido como oxihidrógeno o Gas de Brown.

### 1.2.2 Tipos de celdas electrolíticas

De acuerdo con Méndez (2013), existen dos tipos de celdas electrolíticas, las celdas húmedas o sumergibles y las celdas secas. Ambas trabajan bajo el mismo principio, sin embargo, sus configuraciones son distintas. Por un lado, las celdas húmedas pueden ser fabricadas mediante espirales, placas o tubos completamente sumergidos en un contenedor lleno de agua + electrolito. Por otro lado, las celdas secas conformadas por placas metálicas forman su propio contenedor al rodearse por la solución y herméticamente selladas mediante empaques a presión.

La configuración de placas tiende a ser distinta. En las celdas húmedas las placas son conectadas en serie (+-+-+-+); mientras que las celdas secas utilizan placas neutras entre los cátodos y los ánodos (-NNN+NNN-). La utilización de las placas neutras se debe a un problema en el consumo de corriente, debido a la gran cantidad de energía que demanda la celda a la fuente de alimentación. No obstante, este problema es solucionado al implementar un modulador de ancho de pulso PWM (por sus siglas en inglés Pulse-Width Modulator), con este modulador es posible modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica, a través de un canal de comunicaciones para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

### **1.2.3 Partes de la celda electrolítica**

La celda electrolítica está conformada por diferentes elementos y materiales específicamente seleccionados para trabajar bajo las condiciones degradantes que produce la electrolisis en un medio alcalino. Por ello, es muy importante seleccionar los materiales con los que se constituye la celda electrolítica. Entre las partes principales están las placas, empaques, electrolitos, tornillería, fitinería, mangueras, entre otros.

### **1.2.4 Placas**

Las placas son las encargadas de conducir la electricidad para que se produzca la electrolisis. En el arreglo de una celda electrolítica se colocan los electrodos positivos y negativos, así como placas neutras. El electrodo positivo se denomina ánodo, y en su interacción con el electrolito se produce oxígeno. El electrodo negativo se denomina cátodo y es el encargado de producir el hidrógeno.

Un material accesible para elaborar las placas es el acero inoxidable. Existen diferentes grados de calidad de este material; el grado 316L tiene un excelente desempeño en la utilización de celdas electrolíticas. Es posible utilizar placas de acero inoxidable grado 302 y 304 para los electrodos negativos, sin embargo es fundamental utilizar el grado 316L para los ánodos, esto con el fin de obtener un desempeño óptimo.

### 1.2.5 Electrolito

El electrolito es el encargado de aportar los iones al agua para facilitar el paso de corriente eléctrica a través de la solución. El electrolito debe mezclarse con agua hasta diluirse y formar una solución conductora, para obtener un producto con las mínimas impurezas posibles y que permita un buen flujo de corriente eléctrica. Es pertinente seleccionar un electrolito adecuado, la mala elección podría generar subproductos que deterioran los componentes de la celda o bien una baja eficiencia en cuanto a la generación de oxihidrógeno.

Según Méndez (2013), los mejores electrolitos utilizados en la electrolisis se observan en el Cuadro 1.1:

**Cuadro 1. 1.** Electrolitos utilizados en electrólisis

Químico electrolito	Composición	Aplicación
Sulfato de magnesio. Se puede adquirir en supermercados locales. Es comestible, y se utiliza por muchos como un baño relajante, o un laxante.	MgSO <sub>4</sub>	Alto/bajo voltaje. Bajo amperaje. Temperatura baja.
Hidróxido de potasio. Potasa cáustica es usada en la fabricación de jabón.	KOH	Alto/bajo voltaje. Alto amperaje. Temperatura alta.
Hidróxido de sodio. Se puede adquirir en ferreterías locales. Es usado para remover suciedad de coladeras tapadas.	NaOH	Alto/bajo voltaje. Alto amperaje. Temperatura media.
Sulfato de sodio.	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Bajo voltaje. Bajo amperaje. Temperatura media.
Ácido sulfúrico diluido.	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Bajo voltaje. Medio amperaje. Temperatura media.

Fuente: (Méndez, 2013).



Moore, Kituuma, Morales, & Zink (2010) consideran diferentes electrolitos con el fin de determinar su reacción en una celda electrolítica, analizan tres electrolitos: cloruro de sodio (NaCl); hidróxido de potasio (KOH) y bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>). Se determina que el NaCl es inadecuado para esta aplicación, ya que mediante la electrólisis se produce una reacción química que libera gases de cloro extremadamente tóxicos. El NaHCO<sub>3</sub> se descompone en hidróxido de sodio durante la electrólisis, al hacerlo se produce dióxido de carbono y una cantidad letal de monóxido de carbono. Mientras que con el hidróxido de potasio se determina que es el más adecuado para esta aplicación debido a su capacidad para permanecer sin cambios durante la electrólisis.

### **1.2.6 Electrólisis**

Con base en Diaz del Castillo (2008), las celdas generadoras de oxihidrógeno, funcionan mediante un principio llamado electrólisis. Este proceso electrolítico consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de un electrolito entre dos electrodos conductores denominados ánodo y cátodo. Cuando se conectan los electrodos con una fuente de energía, el electrodo que se une al polo positivo es el ánodo y el electrodo que se une al polo negativo es el cátodo. Una reacción de electrólisis se considera como el conjunto de dos medias reacciones, una oxidación anódica y una reducción catódica.

### **1.2.7 Ley de Faraday**

La ley de Faraday constituye el principio fundamental de la electrólisis y se rige por dos leyes.

Primera Ley: La masa de un elemento depositada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución del electrolito.

Segunda Ley: Las cantidades de diferentes sustancias producidas por la misma cantidad de electricidad son proporcionales a los equivalentes químicos de dichas sustancias.

Al aplicar lo descubierto por Michael Faraday se puede calcular la cantidad de oxihidrógeno desprendido de un reactor mediante la siguiente ecuación.

$$No\ Faraday = \frac{I * t}{96500} (mol\ e^{-1}) \quad (9)$$

Donde:

I: corriente (A).

t: tiempo (s).

Cuando se obtiene el *No Faraday* es necesario conocer que 1 mol H<sub>2</sub>O (líquido) = 1mol H<sub>2</sub>(gas) + 1/2 mol O<sub>2</sub>(gas) (Méndez, 2013). Para obtener la producción en litros de oxígeno e hidrógeno se tiene que:

$$Eq\ químico = \frac{masa\ atómica}{Valencia} \quad (10)$$

$$Peso\ prod_{O_2} = Faraday * Eq_{químico} \quad (11)$$

Teniendo en cuenta que 1 mol de hidrógeno u oxígeno ocupa 22,4 litros, se obtiene la cantidad de litros producidos. Estos cálculos son válidos a una temperatura de 0 grados y 1 atmósfera, por lo que es necesario utilizar la ecuación general de los gases.

$$P * V = n * R * T \quad (12)$$

Donde:

P: presión (Pa).

V: volumen (m<sup>3</sup>).

n: moles de gas (numero de moles) .

R: constante universal de los gases ideales ( $J K^{-1} mol^{-1}$ ).

T: temperatura absoluta (K).

### 1.2.8 Gas de Brown (Oxihidrógeno)

A temperatura y presión normales (1 atm y 25°C), el oxihidrógeno se enciende cuando contiene entre un 4 y 94 % de hidrógeno en volumen. La energía mínima necesaria para encender una mezcla de este tipo con una chispa es de 20  $\mu J$ .

Según Narayan, Vanangamudi, & Naveenchandran (2014), este gas tiene la capacidad de dispersarse en el aire de una forma más rápida y uniforme que la gasolina, lo que le da dos ventajas. En primer lugar, añade la capacidad de mezcla con el combustible y el aire, así permite mejorar la homogeneidad de la mezcla; en segundo lugar, debido a su baja densidad puede ayudar a dispersar rápidamente en el ambiente la mezcla de combustible, baja la concentración en volumen de la gasolina en el aire, y disminuye las posibilidades de explosión debido a una fuga. La comparación entre las propiedades del hidrógeno con la gasolina y el diesel se observa en las Cuadros 1.2 y 1.3.

**Cuadro 1. 2.** Propiedades del hidrógeno vs gasolina

Propiedades	Hidrógeno	Gasolina
Relación estequiométrica para combustión completa.	34:1	15:1
Temperatura de autoignición (°C).	585	260-460
Temperatura de llama (°C).	2207	2307
Distancia de extinción (mm).	0,64	2
Energía de Ignición (mJ).	0,02	0,24
Velocidad de la llama (m/s).	3,46	0,42

Fuente: (Moore et al., 2010).

**Cuadro 1. 3.** Propiedades de los combustibles y el hidrógeno

Propiedades	Diesel	Gasolina sin plomo	H <sub>2</sub>
Temperatura de autoignición (K)	530	533-733	858
Energía mínima de ignición (mJ)	-	0,24	0,02
Límites de flamabilidad (% de volumen en el aire)	0,7-5	1,4-7,6	4-75
Relación estequiométrica aire-combustible en base de masa	14,5	14,6	34,3
Límites de flamabilidad (relación de equivalencia)	-	0,7-3,8	0,1-7,1
Densidad a 16 °C y 1,01 bar ( kg/m <sup>3</sup> )	833-881	721-785	0,0838
Valor neto de calentamiento (MJ/kg)	42,5	43,9	119,93
Velocidad de llama (cm/s)	30	37-43	265-325
Brecha de extinción en aire NTP (cm)	-	0,2	0,064
Difusividad en el aire (cm <sup>2</sup> /s)	-	0,08	0,63
Número de octano de investigación	30	92-98	130
Número de octano de motor	-	80-90	-

Fuente: (Yilmaz, Uludamar, & Aydin, 2010).

### 1.2.9 Eficiencia de la celda electrolítica.

Cada electrón que se pasa a través del agua en una celda electrolítica libera un átomo de hidrógeno, por consiguiente, dos electrones producen una molécula de hidrógeno (H<sub>2</sub>). Dado que cada electrón produce un átomo de hidrógeno, la eficiencia de un dispositivo de electrólisis se puede determinar mediante la medición de la tensión eléctrica necesaria para hacer funcionar la celda. Una celda que funciona a la tensión teórica de 1,23 V es 100 % eficiente. La cantidad de tensión por encima de 1,23 V requerida para operar la celda se desperdicia. Por tanto, el objetivo, entonces, es hacer que una celda opere lo más cercano posible a ese voltaje. Equipos de electrólisis comercial oscilan en la eficiencia de 40 a 80 % (Sankar, 2014).

Según Moore et al. (2010) si la caída de tensión medida entre dos electrodos vecinos es de más de 2,3 V, entonces se produce calor excesivo y se comienza a vaporizar el agua, con lo que se obtiene una eficiencia baja por el equipo.

### **1.3 Aplicación del oxihidrógeno en motores de combustión interna**

#### **1.3.1 Flujos de oxihidrógeno**

La cantidad de oxihidrógeno que se debe utilizar en un motor de combustión interna no está estrictamente restringida a un valor único. Las características de los motores son infinitamente variables y cada sistema trabaja de forma diferente, lo que conlleva a que en cada sistema se pueden obtener resultados diferentes. Resultados positivos se han obtenido en diferentes estudios publicados, como se observa en el Cuadro 1.4.

**Cuadro 1. 4.** Resumen de flujos utilizados en motores de combustión interna reportados en la literatura.

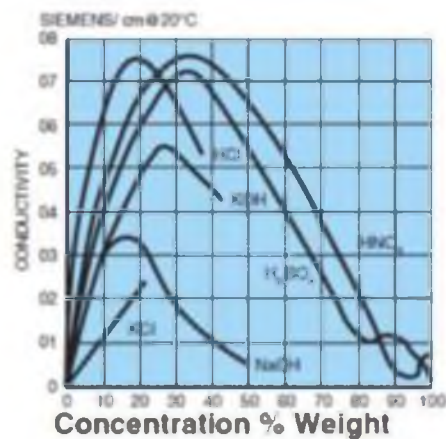
Investigadores	Motor	Cilindrada (cc)	Flujo HHO (mL/min)	Flujo HHO/1000 cc (mL/min)
Yilmaz et al., 2010.	Diesel	3567	5000	1428,57
Bari & Mohammad, 2010.	Diesel	16000	5000-35000	2187,50
Karagoz & Orak, 2011.	Gasolina	1124	3-6 % del flujo total de aire	
Pattanachak, Pattanasethanon, & Sangiamvibool, 2011.	Diesel	2500	500-800	320,00
Wang, Cheng, Lin, & Chen, 2012.	Diesel	5880	10000-70000	11904,76
Ström & Johansson, 2012.	Diesel	418	1000	2392,34
Benítez & Ramos, 2013.	Gasolina	1300	1000	769,23
Premkartikkumar, Annamalai, & Pradeepkumar, 2013.	Diesel	660	4600	6969,70
Sankar, 2014.	Diesel	661	800	1210,29
Falahat, Hamdan, & Yamin, 2014.	Gasolina	197	1000-2000	10152,28
Al-Rababah & Bhuyan, 2014.	Gasolina	197	1000-2000	10152,28

### 1.3.2 Concentraciones de electrolitos

La concentración del electrolito permite aumentar la capacidad de conducción de electricidad a través de la celda electrolítica; cuanto mayor sea la concentración, entonces

se aumenta la capacidad de consumo eléctrico. Esto conlleva a una mayor producción de gas; sin embargo, debido a la variabilidad entre las celdas electrolíticas, en cuanto a diseño y materiales, la concentración óptima se convierte en una variable dependiente del diseño y las características de la celda.

Para una disolución en agua se tiene un valor teórico máximo de conductividad eléctrica, en el gráfico de la Figura 1.3 se muestra la conductividad máxima para distintos valores de concentración de diferentes electrolitos. Sin embargo, estudios de diferentes autores revelan un mejor comportamiento en cuanto a la producción de oxihidrógeno en celdas electrolíticas con valores de concentraciones distintos de hidróxido de potasio. Primero, Pattanachak et al. (2011) señala que la concentración ideal está entre un 2 y un 5 % de KOH para obtener una producción de 320 mL/min. Segundo, Moore et al. (2010) determinan un mejor aprovechamiento de su sistema al utilizar 10% con mejorías notables en la cantidad de burbujas y sin disminución en la producción de HHO. Finalmente, otras concentraciones más altas también han sido utilizadas, como es el caso de López (2012), quien utiliza concentraciones de entre 25 y 40 % de KOH.



**Figura 1. 3.** Conductividad eléctrica de electrolitos según su concentración.  
Fuente: (Moore et al., 2010).

### **1.3.3 Corriente suministrada**

La corriente demandada por una celda electrolítica está en función de sus características físicas y la concentración del electrolito utilizado. Es pertinente controlar la cantidad de corriente consumida por la celda porque la energía empleada para separar la molécula de agua, está siendo extraída de una fuente intrínseca al sistema (en la mayoría de los casos el alternador del vehículo).

Con base en lo anterior, la implementación de un modulador de ancho de pulso PWM (por sus siglas en inglés), permite modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica, a través de un canal de comunicaciones; con el objetivo de controlar la cantidad de energía que se envía a una carga, así la celda electrolítica, independientemente de sus características de diseño, recibe una cantidad de corriente constante durante su funcionamiento. Por tanto, valores de corriente de 15 A utilizados por Moore et al. (2010) como también de 10 A por Yilmaz et al. (2010) permiten generar una base para determinar valores de funcionamiento reales debido a los buenos resultados obtenidos en sus investigaciones.

### **1.3.4 Aumento de potencia y torque**

Desde el punto de vista termodinámico, siempre se ha querido que la eficiencia de un motor sea lo más alta posible. Dicha eficiencia es la relación entre la potencia útil que el motor entrega y la cantidad de energía total empleada para el funcionamiento del motor de combustión interna. Por ello, se debe conocer la potencia útil entregada por los motores en estudio.

Según Merchán (2004) el par motor o torque -calidad de generar potencia- es la tendencia que tiene la fuerza a hacer girar un cuerpo sobre el que actúa, o la capacidad para vencer una carga externa. El torque se mide en Newton-metro en el sistema métrico y en libras-pies en el sistema inglés. El torque es la magnitud de la fuerza de rotación ejercida por el cigüeñal y varía según las revoluciones por minuto.



Los caballos de vapor (cv) expresan la potencia o capacidad de un motor de realizar un trabajo. En el sistema métrico, se mide en kilowatt (kW). Un caballo de vapor es igual a 33.000 pies-libras de trabajo por minuto. Otra unidad muy utilizada es el caballo de fuerza (hp) equivalente a 1,014 cv.

Algunas de las definiciones más utilizadas de potencia son:

- Potencia al freno: es la potencia disponible en el eje de una máquina.
- Potencia indicada: es la potencia desarrollada al interior del cilindro del motor producida por la expansión de los gases de la combustión.
- Potencia por pérdidas mecánicas: es la potencia que se pierde por fricción.
- Potencia neta: es la potencia máxima disponible procedente del motor con todos los accesorios activados.
- Potencia bruta: es la potencia disponible por cortos períodos de tiempo.

Autores como Karagoz & Orak (2011), Falahat et al. (2014), y Benítez & Ramos (2013) han obtenido en sus investigaciones aumentos de potencia de 7,5 %; 12,6 %; y 2,4 %, respectivamente. Por último, Yilmaz et al. (2010) obtienen 19,1% de aumento en el torque.

Existen diferentes métodos para la medición de la potencia y torque generados por un motor. Sin embargo, los más utilizados son los métodos directos, mediante la implementación de dinamómetros de rodillos. Los tres tipos de dinamómetros existentes son:

- Dinamómetros por fricción.
- Dinamómetros hidráulicos.
- Dinamómetros eléctricos.

### **1.3.5 Disminución de gases contaminantes**

Los contaminantes gaseosos más comunes producto de la combustión en los motores diesel y gasolina son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); el monóxido de carbono (CO); los hidrocarburos; los óxidos de nitrógeno (NO); los óxidos de azufre (SO), entre otros.

El CO es uno de los productos de la combustión incompleta. Se caracteriza por ser inodoro e incoloro. Se diluye muy fácilmente en el aire ambiental y en un medio cerrado. Altas concentraciones lo hacen muy tóxico, incluso mortal para las personas y animales. Los motores de combustión interna de los automóviles emiten monóxido de carbono a la atmósfera por lo que en las áreas muy urbanizadas tiende a haber una concentración excesiva de este gas hasta llegar a tasas que son peligrosas para la salud de las personas.

La concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera está aumentando de forma constante. Este aumento se debe al uso de carburantes fósiles como fuente de energía; es posible demostrar que este hecho es el causante de producir un incremento de la temperatura de la tierra, efecto invernadero.

Los hidrocarburos (HC) son gases venenosos sin quemar, combustibles en su estado puro, se miden en partículas por millón (ppm). La causa más común, de exceso de emisiones de hidrocarburos, son las fallas de encendido que se producen debido a problemas de ignición, suministro de combustible o de aire. Por consiguiente, un mal estado de un motor de combustión interna genera mayores volúmenes de gases contaminantes, sin embargo los motores que están en perfectas condiciones también aportan en menores cantidades dichos gases.

Varios estudios confirman una disminución importante de estos gases al suministrar oxihidrógeno en la admisión del sistema. Se confirma que no solamente se incrementa la potencia y el torque del sistema, sino que también la eficiencia de quemado del combustible fósil aumenta de forma tal que se ve reflejado en el análisis de gases emitidos. En el

Cuadro 1.5 se resumen los resultados obtenidos por diferentes autores, en cuanto a la disminución de gases contaminantes.

**Cuadro 1. 5.** Resumen de resultados de análisis de gases contaminantes reportados en la literatura.

Investigadores	Motor	Disminución gases
Yilmaz et al., 2010.	Diesel	HC 5% CO 13,5%
Wang et al., 2012.	Diesel	HC 9,5% CO 7,2% CO <sub>2</sub> 4,4% Nox +9,9%
Premkartikkumar et al., 2013.	Diesel	CO 23% CO <sub>2</sub> +12% Nox+19,5% HC 25%
Benítez & Ramos, 2013.	Gasolina	CO 2% HC 51%

### 1.3.6 Disminución del consumo de combustible

Según Benítez & Ramos (2013) el consumo específico es la relación entre el flujo de combustible ( $\dot{m}_c$ ) y la potencia efectiva del motor.

Desde esta perspectiva, el consumo específico es la cantidad de combustible que necesita un motor de combustión interna para proporcionar una unidad de potencia en una unidad de tiempo. El consumo específico expresa la eficiencia de un motor, al relacionar el consumo de combustible con la potencia generada. Cuanto menor sea el consumo específico de un motor, que conserve la potencia, mejor es su eficiencia.

Por consiguiente, al introducir el gas de oxihidrógeno, en la cámara de combustión, se eleva la cantidad de energía disponible en el combustible y se tiene como resultado una

combinación de dos combustibles mezclados uniformemente con un valor energético mayor. Esto permite aumentar la eficiencia de cada ciclo termodinámico que conlleva a una disminución en la cantidad de combustible requerido para generar la misma potencia requerida.

Finalmente, disminuciones de un 20 hasta un 30 % en el consumo específico de combustible fueron obtenidos por Al-Rousan (2010); Benítez & Ramos (2013) obtuvieron un ahorro de un 23,5 %; y otros autores obtuvieron valores entre un 8 % y un 16,9 %. Dicho comportamiento se muestra en el Cuadro 1.6.

**Cuadro 1. 6.** Resumen de resultados de análisis de consumo específico de combustible (bsfc) reportados en la literatura.

<b>Autor</b>	<b>Motor</b>	<b>Ahorro de combustible % bsfc</b>
Yilmaz et al., 2010.	Diesel	14
Bari & Mohammad, 2010.	Diesel	8,1
Pattanachak et al., 2011.	Diesel	10
Wang et al., 2012.	Diesel	12,6
Benítez & Ramos, 2013.	Gasolina	23,5
Falahat et al., 2014.	Gasolina	16,9

## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA, SELECCIÓN DE MATERIALES ARMADO Y FUNCIONAMIENTO DE LA CELDA ELECTROLÍTICA**

La evaluación de diferentes materiales para la construcción de la celda electrolítica se llevó a cabo en la Sede Rodrigo Facio de la Universidad de Costa Rica. La cantidad de HHO producido se obtuvo mediante el método de desplazamiento de agua, los resultados fueron analizados mediante un análisis de varianza con el fin de determinar si existen diferencias significativas al variar la corriente y la concentración del electrolito utilizados. Pruebas de potencia, torque y análisis de gases con y sin el uso de HHO, son evaluadas en vehículos de prueba, con el fin de determinar si existe un impacto en el rendimiento del motor de combustión interna.

### **2.1 Materiales**

Para el armado de la celda se utilizan placas metálicas de acero inoxidable 316L; empaques de neopreno hechos a mano; tapas de acrílico transparente; fitinería plástica y tornillería de acero. El sistema se monta en una base de madera con el fin de poder movilizarla e instalarla externamente a varios vehículos. Se utilizan varios electrolitos, así como diferentes concentraciones de los mismos.

#### **2.1.1 Aislante**

El empaque tiene la función de separar las placas y crear una cavidad entre ellas, para albergar a la solución. En esta investigación se usan polímeros debido a sus favorables propiedades aislantes, tanto térmicas como eléctricas. Se clasifican de forma general en:

- Termoplásticos.
- Termoestables.
- Elastómeros.

Entre estos se ha seleccionado un elastómero, por su fácil manejo y predisposición para conservar su forma. Por su parte, los polímeros termoplásticos reblandecen con el calor y los termoestables son muy frágiles y difíciles de manipular, características que no favorecen a las celdas generadoras y por esto se descartan. Dentro de los elastómeros, y debido a sus propiedades, se ha escogido el policloropreno, conocido como neopreno. Según Benítez & Ramos (2013) las características relevantes para el trabajo son:

- Resistencia a la degradación por agentes ambientales.
- Buena resistencia al envejecimiento.
- Dificulta el crecimiento de hongos y bacterias.
- Tiene muy buena resistencia al ataque de solventes y agentes químicos.
- Posee un coeficiente de transmisión de calor muy bajo, mejor que el de los aislantes tradicionales, lo que permite el uso de aislantes de menor espesor.
- Alta durabilidad.

Existen dos tipos de neopreno:

- Industrial. Se utiliza en la fabricación de neumáticos, juntas, o-rings, entre otros.
- Celular. Se utiliza en trajes de buceo y otras prendas de vestir.

No se tiene problema con el deterioro del aislante, si se utiliza una base o un ácido como electrolito. Sin embargo, se selecciona el polímero más resistente, sin dejar de lado costos y disponibilidad.

Se analizan diferentes tipos de hule como neopreno, nitrilo y hule natural con el fin de elegir el mejor material para los empaques. Estos tipos de hule se someten a disoluciones de KOH para simular el ambiente interno de la celda electrolítica, como se puede observar en la Figura 2.1.



**Figura 2. 1.** Resistencia de diferentes empaques al hidróxido de potasio.

Se elige el neopreno para el modelo definitivo por su alta resistencia a degradarse en una solución de KOH. Mediante la ficha técnica brindada por *Garlock Sealing Technologies* se especifican las características del neopreno utilizado, y se garantiza la calidad del mismo (Anexo A). En la Figura 2.2 se observa los empaques de neopreno listos para ser instalados en la celda.



**Figura 2. 2.** Empaque de neopreno hecho a mano.

### **2.1.2 Acero inoxidable 316L**

De acuerdo con la norma UNE-EN 10020-20 (2001) los aceros se clasifican según la composición química en:

- Aceros no aleados.
- Aceros inoxidables.
- Otros aceros aleados.

Dentro de la familia de los aceros inoxidables existen tres tipos.

- Austenítico (resistente a la corrosión).
- Ferrítico (bajo costo).
- Martensítico (dureza elevada).

Su característica principal les permite un uso específico con respecto a la necesidad del usuario.

Por sus propiedades, se selecciona el acero inoxidable austenítico. El acero inoxidable 316 y 316L respectivamente, garantizan un excelente comportamiento ante la corrosión.

Con base en lo anterior, una de las principales características que diferencian estas dos calidades es que el 316L presenta un bajo contenido de carbón en 0,03% máx. lo que la hace más difícil a una corrosión intergranular.

### **2.1.3 Acrílico**

El polimetilmetacrilato o acrílico, es un polímero conocido por sus siglas PMMA. Se obtiene mediante la polimerización del metacrilato de metilo. Se pretende usar este material como sello externo o carcasa de la celda.

El acrílico se destaca frente a otros polímeros como el policarbonato (muy utilizado para



techos transparentes), el polietileno utilizado en tablas de picar alimentos o el poliestireno en cuanto a resistencia a la intemperie, transparencia y resistencia a bases y ácidos, además de su bajo peso y fácil manejo (Benítez & Ramos, 2013).

#### **2.1.4 Agua destilada**

La destilación es una técnica muy importante para la purificación de líquidos o separación del soluto y del disolvente de una disolución. Se utiliza para separar componentes de una mezcla homogénea en función de sus distintos puntos de ebullición para tener como resultado agua purificada. Por ende, es necesario utilizar agua destilada para la medición de datos en el proceso electrolítico, ya que se eliminan las posibles variables que puedan afectar la eficiencia de la celda debido a la infinidad de minerales que contiene el agua de la red nacional.

#### **2.1.5 Tornillería**

Los pernos y tuercas son cortados a la medida, según la configuración de la celda (cantidad de placas utilizadas). Se utilizan pernos y tuercas de acero convencional debido a su bajo precio y fácil disponibilidad.

#### **2.1.6 Depósito/Burbujeador**

El depósito utilizado cumple también la función de burbujeador y tiene una capacidad de almacenaje de 500 mL. Cuenta con tres orificios roscados lo que permite la recirculación y evacuación del gas producido.

#### **2.1.7 Tuberías**

Las tuberías que se utilizan para el transporte de fluidos tienen un diámetro de 1 cm, se verifica que el flujo sea uniforme mediante el cálculo de la velocidad del fluido y así se determina si es un flujo laminar o turbulento.

Datos del sistema:

Diámetro de tubería.

$D = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm}$ .

Caudal máximo teórico.

$Q = 1500 \text{ cm}^3 / \text{min} = 25 \text{ cm}^3 / \text{s}$ .

Cálculo de la velocidad del fluido a través de la tubería ( $V$ ).

$$V = \frac{Q}{A} \quad (13)$$

$$V = 31,83 \text{ cm/s}$$

Cálculo del número de Reynolds.

Se toman los valores de densidad y viscosidad dinámica a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\mu} \quad (14)$$

$$Re = \frac{1,09 * 0,01 * 0,3183}{1,95 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 177,92$$

$$177,92 < 2000$$

Como  $Re$  es menor que 2000 se tiene un flujo laminar.

### **2.1.8 Cable eléctrico**

Proveen la trayectoria para el flujo de la corriente en las instalaciones eléctricas. Normalmente se clasifican por su diámetro denominado calibre. El calibre define el tamaño de la sección transversal del conductor, puede estar expresado en  $\text{mm}^2$  o bajo la normalización americana en AWG (American Wire Gauge). Cuando se expresa en AWG, el más grueso es el 4/0 y se sigue en orden descendente 3/0, 2/0, 1/0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 14, 12, 16 y 18.

### **2.1.9 Relevador**

Es un interruptor electromecánico que permite abrir o cerrar un circuito de altos voltajes por medio de una corriente eléctrica aplicada a este. Está formado por una bobina y contactos los cuales pueden conmutar corriente continua o bien corriente alterna. El fin de este dispositivo en el sistema es poder interrumpir el paso de corriente hacia la celda cuando el motor no está en funcionamiento.

### **2.1.10 Fusible**

Para proteger las celdas generadoras de oxihidrógeno, de posibles sobrecargas y cortocircuitos, se coloca un fusible de 30 A.

## **2.2 Métodos**

Se realizan dos ensayos generales. En uno se utiliza solamente combustible (gasolina o diesel); en el otro se combinan el combustible y oxihidrógeno. Se analizan variables como revoluciones del motor; temperatura de funcionamiento de la celda; consumo de

electricidad, entre otros. Estos procedimientos se ejecutan dentro y fuera de las instalaciones de la Universidad de Costa Rica, Sede Rodrigo Facio.

Se realizan todos los ensayos posibles por triplicado (tres repeticiones) con el fin de mitigar posibles errores de medición; y se analizan estadísticamente mediante ANOVA (Analysis Of Variance por sus siglas en inglés). Por consiguiente, se puede determinar si las diferencias entre las variables presentan o no diferencias significativas.

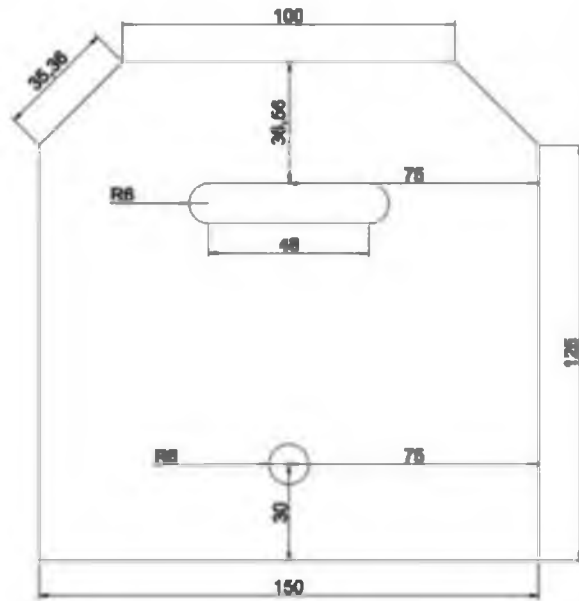
### **2.2.1 Preparación de las placas de acero inoxidable 316L**

Con el fin de obtener placas libres de impurezas que puedan reaccionar con el proceso de la electrólisis, es necesario someterlas a una serie de procedimientos para asegurarse una superficie limpia y evitar resultados producidos por agentes externos.

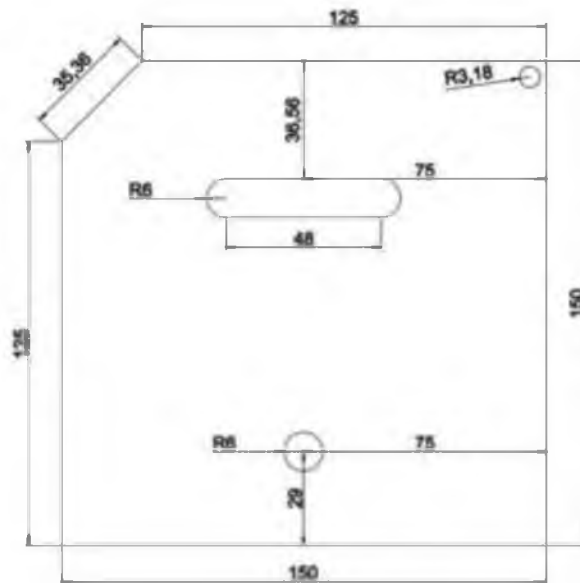
Para llevar a cabo la preparación de las placas de acero inoxidable 316L se siguen las normas de la ASTM A380/A380M *Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems* (ASTM International, 2013).

#### 2.2.1.1 Corte de lámina

Las placas de acero 316L son cortadas mediante la técnica de corte con láser. El corte es elaborado por la empresa Capris; las medidas y especificaciones del corte son diseñadas en AutoCAD como se muestra en las Figuras 2.3 y 2.4. No obstante, el resultado del corte es áspero.



**Figura 2. 3.** Medidas y especificaciones del corte para placa electrodo neutro.



**Figura 2. 4.** Medidas y especificaciones del corte para placa electrodo vivo.

### 2.2.1.2 Limado de orillas y cortes internos.

Se utiliza una lima metálica de diferentes tamaños para obtener una superficie, en los cortes, lisa, uniforme y sin asperezas

### 2.2.1.3 Lijado de superficie

El lijado permite deshacerse de cualquier tipo de impureza adherida a la superficie de las placas. Además, aporta un factor extra que disminuye la superficie de contacto entre las burbujas y las placas. Las superficies de las placas al ser completamente lisas permiten que las burbujas de oxihidrógeno producidas se adhieran, lo que dificulta la liberación de las mismas. Por tanto, se hace un lijado cruzado a 90 grados para generar una superficie ideal para el desprendimiento de las burbujas como se observa en la Figura 2.5.



**Figura 2. 5.** Placa limada y lijada, lista para el lavado.

### 2.2.1.4 Limpieza con detergente y ácido acético

Las grasas que adquieren las placas en su proceso de elaboración industrial, transporte y manipulación deben ser eliminadas. Es necesario hacer un lavado con detergente con la finalidad de que la reacción de la electrólisis sea lo más eficiente posible. Posterior a la eliminación de las grasas, se procede a hacer una disolución de ácido acético al 20 %; esta

disolución se emplea para eliminar el hierro y otros contaminantes metálicos, películas de óxido y contaminantes similares como se observa en la Figura 2.6.

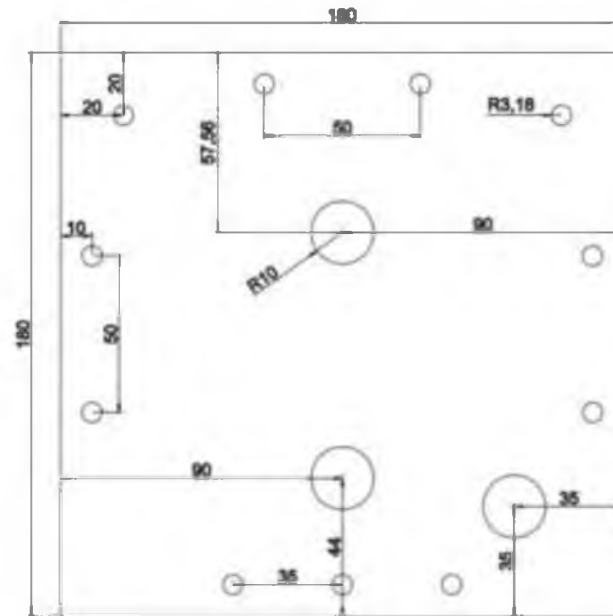


**Figura 2. 6.** Limpieza de placas con ácido acético.

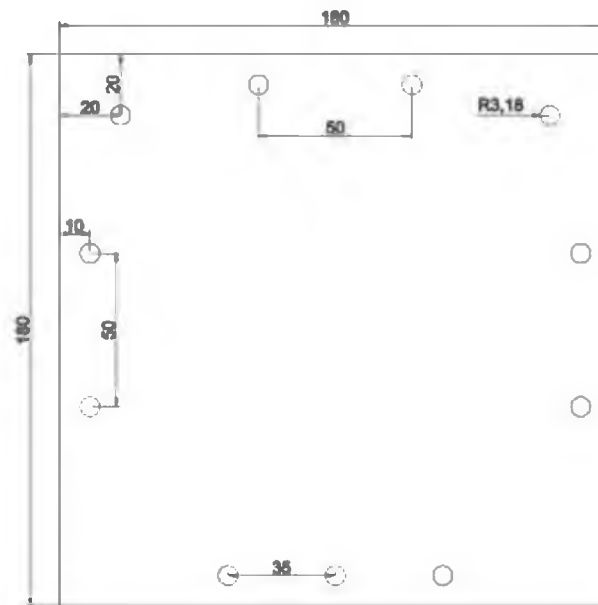
## **2.2.2 Armado de celda electrolítica**

### **2.2.2.1 Preparación de los acrílicos**

La fijación de la celda se realiza mediante el acrílico y la tornillería de acero. En total se realizan once agujeros alrededor del acrílico; dos de ellos también cumplen con la función de transmitir la corriente a través de los cátodos y ánodos. El acrílico frontal cuenta con tres agujeros de 1,27 cm roscados para la alimentación de agua; liberación de oxihidrógeno y drenaje de la celda en caso de limpieza o cambio de concentración del electrolito. Las dimensiones y especificaciones de los acrílicos, tanto el frontal como el posterior se observan en las Figuras 2.7, 2.8 y 2.9.

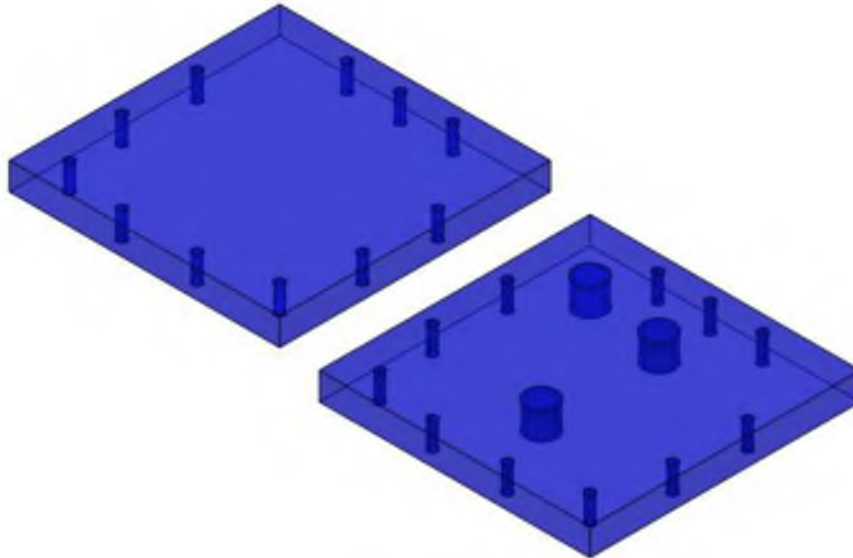


**Figura 2. 7.** Distribución de agujeros, acrílico frontal.



**Figura 2. 8.** Distribución de agujeros, acrílico posterior.





**Figura 2. 9.** Distribución de agujeros en acrílicos, vista 3d.

Se elabora a mano todo el marcado y perforación de los acrílicos como se muestra en las Figuras 2.10 y 2.11.



**Figura 2. 10.** Preparación del acrílico.



**Figura 2. 11.** Marcado y perforación del acrílico frontal.

#### 2.2.2.2 Ensamblaje

Se analizan dos configuraciones de celda para determinar su comportamiento en cuanto a la producción de oxihidrógeno. La primera configuración cuenta con un total de dos celdas en serie y un total de 13 placas: 2 cátodos, 1 ánodo y 10 placas neutras (5 para cada celda), llamada 5N/3E/13P. Para la segunda configuración se emplean un total de 21 placas: 5 utilizadas como electrodos y 16 placas neutras; cada celda conectada en serie contiene un total de 4 placas neutras, por ello, se denomina la configuración 2 como 4N/5E/21P y cada placa está separada por un empaque hecho a la medida.

#### 2.2.2.3 Fitinería y mangueras

Debido al electrolito disuelto en el agua, toda la conducción de fluidos debe de ser de un material no oxidable; por ende, la fitinería y tubería de conducción debe ser plástica.

#### 2.2.2.4 Tensión de la tornillería

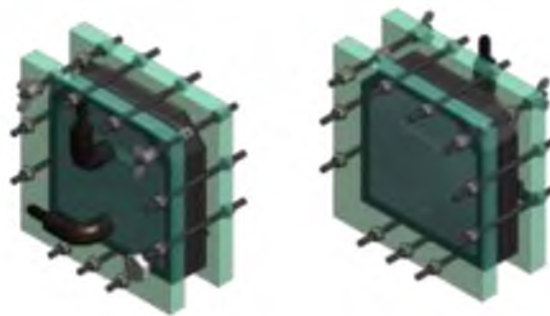
Para asegurar la uniformidad de la tensión en todos los tornillos, se mide la distancia entre acrílicos, para esto se utiliza un vernier lo que permite dejar uniformidad en la presión emitida por los tornillos sobre el acrílico.

#### 2.2.2.5 Prueba de fugas

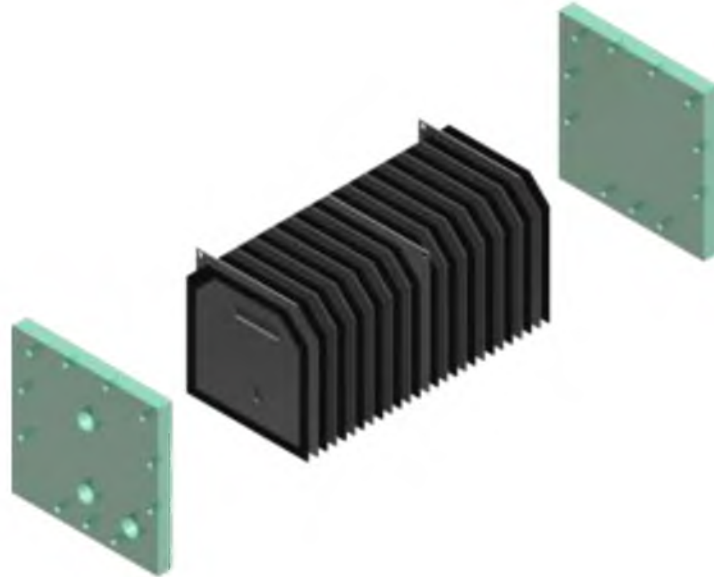
Los tres agujeros roscados del acrílico frontal son sellados con teflón. Una vez concluido el ensamblaje se llena la celda con agua destilada y se coloca sobre una superficie seca por 24 horas, para determinar si existen fugas.

### 2.2.3 Configuración del armado de la celda

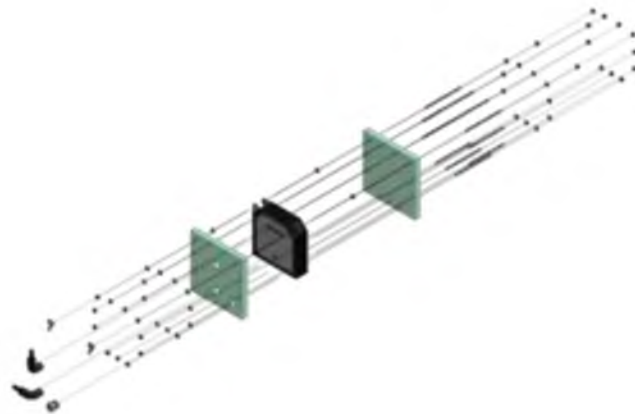
La modelación digital de la celda ayuda a tener una mejor visualización del producto terminado. En las Figuras 2.12, 2.13, 2.14 y 2.15 se detalla el armado, disposición y dimensiones de la celda para la configuración 5N/3E/13P. La configuración 4N/5E/21P de la celda se observa en el Anexo B.



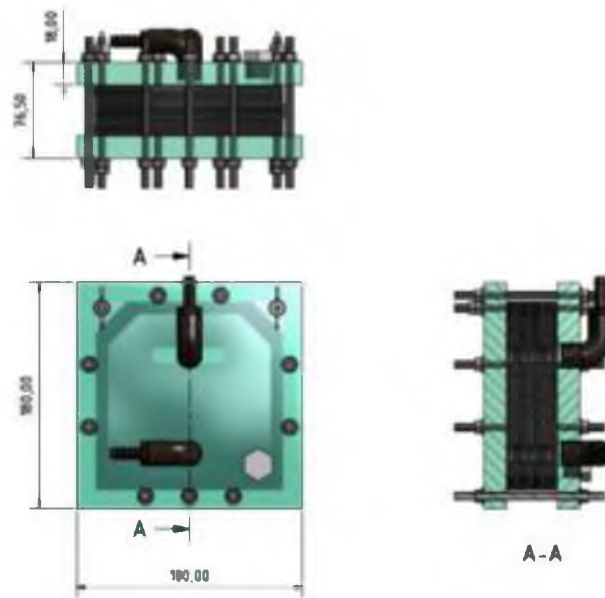
**Figura 2. 12.** Diagrama tridimensional celda electrolítica.



**Figura 2. 13.** Disposición de placas y empaques.



**Figura 2. 14.** Explosión de todos los elementos que conforman la celda.



**Figura 2. 15.** Vistas de la celda electrolítica.

La celda electrolítica ensamblada y lista para probar se observa en la Figura 2.16.



**Figura 2. 16.** Celda electrolítica terminada.

#### **2.2.4 Conexión eléctrica**

Mediante un arnés sencillo se transmite electricidad, del alternador a la celda. Este arnés cuenta con un componente de seguridad (fusible de 30 amperios) y un interruptor con su relevador para el paso y corte de corriente. La conexión del alternador pasa por el modulador PWM y, posteriormente, a la celda electrolítica.

#### **2.2.5 Medición de la producción de oxihidrógeno**

Se realizan distintas concentraciones de diferentes electrolitos y se mide la cantidad de gas producido mediante el método de desplazamiento de líquido. Los electrolitos utilizados son el hidróxido de potasio; sulfato de magnesio; sal sintética marina; y agua de mar; con concentraciones desde el 15 % hasta la menor cantidad posible que genere la cantidad de gas necesario.

Se realiza una mezcla de 1 litro para preparar la disolución. Se utiliza agua destilada y la cantidad necesaria del electrolito, según la concentración deseada, el electrolito se pesa en una balanza electrónica. Cada vez que se cambia la concentración de la disolución o el electrolito utilizado, es necesario hacer un lavado de la celda con agua destilada para asegurarse que la nueva disolución no esté afectada por la anterior.

Se realizan mediciones del flujo de gas producido en función de la corriente suministrada. La variación se realiza mediante un modulador de ancho de pulso y se mide por medio de la instalación de un amperímetro de corriente directa. Las variaciones de corriente están sujetas a la concentración y tipo de electrolito.

Por medio del método de desplazamiento líquido, se mide la cantidad de oxihidrógeno producido por la celda. Para ejecutar esta medición, se coloca una probeta verticalmente invertida sobre el tanque de agua y se introduce la manguera dentro de la probeta para extraer el aire; cuando la probeta está totalmente llena de agua, entonces se le inyecta oxihidrógeno, el cual desplaza el agua. Se toma el tiempo que dura en desplazarse 1000 mL, para obtener la producción en mililitros por unidad de tiempo.

### 2.2.6 Análisis teórico de la producción de HHO

Es necesario realizar los siguientes pasos para determinar la cantidad teórica que se puede producir de HHO.

Datos de las placas:

Placas positivas y negativas:

- Número de placas positivas: 2
- Número de placas negativas: 3
- Ancho: 15 cm
- Alto: 15 cm
- Espesor: 0,15 cm

Placas neutras:

- Número de placas neutras: 16
- Ancho: 15 cm
- Alto: 15 cm
- Espesor: 0,15 cm

Empaque:

- Espesor: 0,15 cm
- Total de intermedios: 20

Áreas:

- Área de placas positivas y negativas:  $A_{p\pm} = 213,55 \text{ cm}^2$
- Área de placas neutras:  $A_{pn} = 210,43 \text{ cm}^2$
- Área de empaque:  $A_{emp} = 53,41 \text{ cm}^2$
- Área de contacto con la solución:  $A_{sol} = 210,43 - 53,41 = 157,02 \text{ cm}^2$

Con un voltaje de 13,8 V y un amperaje de 4 A, se obtiene los siguientes resultados:

Entalpía de formación del agua ( $\Delta H_f^\circ$ ).

$$\Delta H_f^\circ = -285,84 \frac{KJ}{mol} = -28584 \frac{J}{mol} \quad (15)$$

En el caso del proceso de electrólisis se consume energía; por lo tanto, la energía necesaria para descomponer un mol de agua es:

$$\Delta H_f^\circ = 285,84 \frac{KJ}{mol} = 28584 \frac{J}{mol}$$

La constante de Faraday es la cantidad de carga eléctrica en un mol de electrones; por lo tanto se necesita 96485,34 C (Culombio) por cada mol de agua.

$$F = 96485,34 \frac{C}{mol} \quad (16)$$

Con base en la primera ley de Faraday se determina la cantidad de hidrógeno y oxígeno que se libera de la celda producto de la electrólisis. En esta ley la masa de sustancia que se deposita o se libera en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de corriente eléctrica que circula por el electrolito.

Por medio de la siguiente ecuación se obtiene la masa de la sustancia producida en el electrodo.



$$m = \frac{Q M}{qv N_A} = \frac{I * t * M}{F * v} \quad (24)$$

Donde:

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

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

q: carga del electrón  $1,602 \times 10^{-19}$ .

v: número de valencia de la sustancia, como ion en la solución (electrones por ion).

F: constante de Faraday.

M: masa atómica del elemento (gramos por mol).

$N_A$ : número de Avogadro (iones por mol).

I: corriente eléctrica (A).

t: tiempo transcurrido (s).

Se calcula la masa de hidrógeno por minuto

$$m_H = \frac{4 * 60 * 1,0079}{96500 * 1}$$

$$m_H = 25,07 \times 10^{-4} \text{ g}$$

Se calcula la masa de oxígeno por minuto

$$m_O = \frac{4 * 60 * 16}{96500 * 2}$$

$$m_O = 19,89 \times 10^{-3} \text{ g}$$

El volumen se obtiene cuando se conoce la densidad del hidrógeno y el oxígeno

$$v = \frac{m}{d} \tag{25}$$

$$v_H = \frac{0,000002507}{0,0899} = 27,89 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$v_H = 27,89 \text{ cm}^3$$

$$v_O = \frac{0,000019896}{1,429} = 13,92 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$v_O = 13,92 \text{ cm}^3$$

Según Litherland (1919) cuando se colocan placas neutras en una celda electrolítica la cara de la placa neutra que se encuentra de frente al cátodo se comportará como tal, y liberará hidrógeno, mientras que la cara opuesta que mira hacia el ánodo liberará oxígeno.

Multiplicando por el total de cátodos

$$v_H = 27,89 * 11 = 306,79 \text{ cm}^3$$

Multiplicando por el total de ánodos

$$v_O = 13,92 * 10 = 139,20 \text{ cm}^3$$

Caudal total teórico de HHO.

$$Q_{THHO} = 306,79 + 139,20 = 445,99 \text{ cm}^3 / \text{min}$$

$$Q_{THHO} = 7,43 \text{ mL/s}$$

### **2.2.7 Variabilidad en la eficiencia del sistema según la temperatura de funcionamiento**

El funcionamiento del sistema varía según la temperatura ambiente. Si la celda está montada en un banco de trabajo, entonces suele trabajar más fría que cuando se está instalada junto a un motor de combustión interna. La temperatura alta tiende a aumentar la producción de gas debido a la energía interna que tienen las moléculas de agua.

Para dicha medición se coloca un termómetro digital y se registran las temperaturas según el tiempo de funcionamiento, ubicación de la celda y condiciones ambientales. Se debe considerar la producción vapor de agua según la temperatura del agua.

### **2.2.8 Tasa de evaporación de agua por presión de vapor**

Se debe tomar en cuenta la producción de vapor de agua dentro de la celda electrolítica. Debido a que no solamente se está generando HHO por medio de la electrólisis, sino que

también hay una producción de vapor de agua por medio de la difusión del gas, efecto de la presión de vapor, ejercida por el líquido.

Debido a su importancia práctica, la difusión del vapor de agua en el aire ha sido el tema de varios estudios. Asimismo, se han desarrollado algunas fórmulas empíricas para el coeficiente de difusión  $D_{H_2O\text{-aire}}$ . Según Cengel & Ghajar (2011) se propone la ecuación descrita por Marrero & Mason (1972) para el cálculo de la difusión de vapor de agua en el aire.

$$D_{H_2O\text{-aire}} = 1,87 \times 10^{-10} \frac{T^{2,072}}{P} \quad (m^2/s), \quad 280 K < T < 450 K \quad (26)$$

Donde:

P: presión total en atm

T: temperatura en K.

Para determinar el flujo molar se tiene la siguiente ecuación propuesta por Cengel & Ghajar (2011):

$$\dot{N}_A = \frac{D_{AB}A}{R_u T} \left( \frac{P_{A,0} - P_{A,L}}{L} \right) \quad (27)$$

Donde:

$\dot{N}_A$ : flujo molar ( $kmol s^{-1}$ ).

R: constante de gases ( $J K^{-1} mol^{-1}$ ).

$D_{AB}$ : difusión de vapor de agua en el aire ( $m^2 s^{-1}$ ).

A: área de la sección transversal en contacto con el aire ( $m^2$ ).

T: temperatura (K).

$P_{A,0}$ : presión de saturación del agua a la temperatura dada en una ubicación 0 (Pa).

$P_{A,L}$ : presión de saturación del agua a la temperatura dada en una ubicación L (Pa).

L: columna de aire promedio sobre el líquido (m).

La temperatura ambiente reportada durante las pruebas es de 32 °C con una presión atmosférica de 90150 Pa. El agua dentro de la celda se encuentra a una temperatura promedio de 45 °C lo que determina una presión de vapor del agua de 9593 Pa.

Se asume que la masa inicial de líquido para la celda es de un litro, equivalente a 1 kg.

Se calcula la difusión de vapor de agua:

$$D_{H_2O-air} = 1,87 \times 10^{-10} \frac{318,15^{2,072}}{0,89}$$

$$D_{H_2O-air} = 3,22 \times 10^{-5} m^2/s$$

Se calcula el flujo molar:

$$\dot{N}_A = \frac{3,22 \times 10^{-5} * 0,01}{8,314 * 305,15} \left( \frac{9,59 - 0}{0,05} \right)$$

$$\dot{N}_A = 2,44 \times 10^{-8} \text{ kmol/s}$$

El tiempo que tardaría en evaporarse el litro completo de agua se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\dot{N}_{\text{vapor}} = \frac{m_{\text{vapor}}}{\Delta t \times M_{\text{vapor}}} \quad (28)$$

$$\Delta t = \frac{m_{\text{vapor}}}{\dot{N}_{\text{vapor}} \times M_{\text{vapor}}}$$

$$\Delta t = \frac{1}{2,44 \times 10^{-8} \times 18}$$

$$\Delta t = 2,28 \times 10^6 \text{ s}$$

Lo que equivale a un flujo de  $4,39 \times 10^{-4} \text{ mL/s}$  de  $\text{H}_2\text{O}$  en forma de vapor en la mezcla de HHO.

### 2.2.9 Medición de potencia y torque en dinamómetro

Es necesario un banco de pruebas (dinamómetro) para la medición de la potencia y torque de un vehículo. Este banco tiene rodillos en el piso, conectados a sensores de fuerza, capaces de medir el torque y potencia del vehículo a una determinada velocidad. Las

ruedas del vehículo transmiten la dinámica del motor a los rodillos del dinamómetro, por consiguiente, estos actúan como freno y simulan la resistencia que el vehículo recibe cuando circula en la vía pública.

Todas las mediciones son registradas por un sistema de cómputo, las cuales grafican curvas de torque y potencia. Las pruebas se realizan con y sin oxihidrógeno para comparar valores de torque y potencia generada. El sistema de producción de oxihidrógeno es conectado externamente al vehículo utilizado. Se analizan flujos de oxihidrógeno de 9,19 mL/s y 22,39 mL/s producidos a 10 y 20 A respectivamente. Por último, se compararan con los valores producidos por el vehículo sin la utilización del gas.

#### **2.2.10 Medición de gases**

Si se utiliza un analizador de gas es posible determinar la cantidad de gases contaminantes que un vehículo emite luego de realizar la combustión. Se necesitan hacer varias mediciones, donde se varíe la cantidad de oxihidrógeno y revoluciones del motor para determinar si el oxihidrógeno tiene un impacto en la disminución de los gases emitidos. Para ello, se coloca el motor a unas revoluciones fijas por unos segundos hasta que el analizador de gases se estabilice. Luego se anota la medición y se repite el procedimiento para diferentes flujos y revoluciones.

Los regímenes de giro del motor a evaluar son el ralentí, 1500, 2000 y 2500 rpm. Los flujos de oxihidrógeno a analizar son 6,64, 15,46 y 22,39 mL/s, los cuales son generados por corrientes de 8, 15 y 20 A respectivamente.

## **CAPÍTULO 3. RESULTADOS**

### **3.1 Producción de oxihidrógeno**

La variabilidad en la producción de oxihidrógeno está sujeta principalmente a tres variables controlables en el modelo establecido. La primera, es la cantidad de celdas que se colocan en un arreglo en serie; la segunda, es la concentración del electrolito utilizado y la tercera la corriente suministrada. Para conocer la capacidad de producción del modelo se miden dos arreglos de celdas: el primero con dos celdas en serie y el segundo con cuatro celdas en serie.

#### **3.1.1 Variabilidad en la producción de gas como función de la concentración del electrolito utilizado**

La concentración del electrolito (KOH) se maneja para que no exceda la capacidad máxima del modulador de ancho de pulso, el cual tiene una capacidad máxima de 30 A. Al cambiar la concentración de la disolución de KOH se varía la capacidad de la celda de separar la molécula de agua en sus moléculas constituyentes de hidrógeno y oxígeno. También es importante considerar que al disminuir la cantidad de KOH, entonces se disminuye la capacidad de transportar corriente a través de los electrodos.

En el Cuadro 3.1 se observa el comportamiento de ambos arreglos de celda, donde se deja fija una corriente y se varía la concentración.



**Cuadro 3.1.** Producción de oxihidrógeno entre arreglos 5N/3E/13P y 4N/5E/21P donde se varía la concentración.

<b>5N/3E/13P</b>		<b>4N/5E/21P</b>	
<b>8 A</b>		<b>8 A</b>	
Concentración %	Flujo mL/s	Concentración %	Flujo mL/s
20	-	1	6,63
15	-	0,5	6,93
7	-	0,25	8,18
3	4,17	0,125	8,55
2	5,83		
1	8,33		
0.5	8,33		
<b>10 A</b>		<b>10 A</b>	
Concentración %	Flujo mL/s	Concentración %	Flujo mL/s
20	-	1	9,19
15	1,67	0,5	9,61
7	5,00	0,25	10,36
3	5,83	0,125	-
2	8,33		
1	11,67		
<b>15 A</b>		<b>15 A</b>	
Concentración %	Flujo mL/s	Concentración %	Flujo mL/s
20	-	1	15,46
15	4,13	0,5	15,86
7	-	0,25	-
3	-	0,125	-
2	-		
1	-		
<b>20 A</b>		<b>20 A</b>	
Concentración %	Flujo mL/s	Concentración %	Flujo mL/s
20	-	1	22,39
15	-	0,5	-
7	-	0,25	-
3	-	0,125	-
2	-		
1	-		

Se observa un aumento en la producción de oxihidrógeno para ambos arreglos de celda, al disminuir la concentración del electrolito y mantener la corriente constante. En la celda 5N/3E/13P se utilizan concentraciones más altas, debido a que la demanda de corriente no supera los 30 A limitados por el PWM. A concentraciones por encima del 20 %, la producción de HHO es despreciable; la máxima concentración utilizada en esta configuración es de 15 % con un consumo máximo de 16 A y una producción de 5 mL/s. Para la configuración 4N/5E/21P la concentración máxima utilizada es de 1 %, ya que por encima del 2 % se sobrepasan los 30 A. En ambas configuraciones la concentración con mejores resultados en cuanto a producción de HHO fue del 1 %.

Al disminuir la concentración del electrolito en la disolución y mantener la corriente, entonces la celda es capaz de producir una mayor cantidad de oxihidrógeno; no obstante, se compromete la capacidad máxima de transportar corriente.

Por un lado, para la configuración 5N/3E/13P el flujo máximo alcanzado es de 11,67 mL/s a una concentración del 1 % y una corriente de 10 A; mientras que para la configuración 4N/5E/21P el flujo máximo alcanzado es de 27,18 mL/s a una concentración del 1 % y una corriente de 25 A.

El análisis estadístico determina que hay diferencias significativas en cuanto a la variación de la concentración del electrolito utilizado, al comparar los valores de 1, 0,5, 0,250 y 0,125 % con respecto a diferentes valores de corriente constantes. Los resultados se observan en los Cuadros 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5.

**Cuadro 3. 2.** Comparación para el factor: Concentración electrolito (%).

<b>Comparación</b>	<b>Dif de medias</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,050</b>
0,125 vs. 1,000	108,333	4	123,329	<0,001	Yes
0,125 vs. 0,500	87,778	4	99,928	<0,001	Yes
0,125 vs. 0,250	26,667	4	30,358	<0,001	Yes
0,250 vs. 1,000	81,667	4	92,971	<0,001	Yes
0,250 vs. 0,500	61,111	4	69,57	<0,001	Yes
0,500 vs. 1,000	20,556	4	23,401	<0,001	Yes

Para una corriente de 8, 6, y 4 A se tienen los resultados del análisis de varianza como se muestra a continuación.

**Cuadro 3. 3.** Comparación para el factor: Concentración electrolito (%) con 8 A.

<b>Comparación</b>	<b>Dif de medias</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
0,125 vs. 1,000	115,000	4	75,586	<0,001	Yes
0,125 vs. 0,500	96,667	4	63,536	<0,001	Yes
0,125 vs. 0,250	21,667	4	14,241	<0,001	Yes
0,250 vs. 1,000	93,333	4	61,345	<0,001	Yes
0,250 vs. 0,500	75,000	4	49,295	<0,001	Yes
0,500 vs. 1,000	18,333	4	12,05	<0,001	Yes

**Cuadro 3. 4.** Comparación para el factor: Concentración electrolito (%) con 6 A.

<b>Comparación</b>	<b>Dif de medias</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
0,125 vs. 1,000	125,000	4	82,158	<0,001	Yes
0,125 vs. 0,500	83,333	4	54,772	<0,001	Yes
0,125 vs. 0,250	25,000	4	16,432	<0,001	Yes
0,250 vs. 1,000	100,000	4	65,727	<0,001	Yes
0,250 vs. 0,500	58,333	4	38,341	<0,001	Yes
0,500 vs. 1,000	41,667	4	27,386	<0,001	Yes

**Cuadro 3. 5.** Comparación para el factor: Concentración electrolito (%) con 4 A.

<b>Comparación</b>	<b>Dif de medias</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
0,125 vs. 1,000	85,000	4	55,868	<0,001	Yes
0,125 vs. 0,500	83,333	4	54,772	<0,001	Yes
0,125 vs. 0,250	33,333	4	21,909	<0,001	Yes
0,250 vs. 1,000	51,667	4	33,959	<0,001	Yes
0,250 vs. 0,500	50,000	4	32,863	<0,001	Yes
0,500 vs. 1,000	1,667	4	1,095	0,865	No

El aumento en la producción de HHO, al variar la concentración del electrolito, se refleja en la diferencia de las medias. Los valores más altos son los comparados entre las concentraciones de 1 y 0,125 %.

Para el arreglo 4N/5E/21P, y una corriente fija de 8 A, se obtiene una diferencia en la producción de HHO de un 28,87 % al pasar de un 1 a un 0,125 % de KOH. Para el mismo caso, pero a corrientes de 6 y 4 A se obtiene una diferencia porcentual de 49,69 y 61,41 respectivamente.

Para el arreglo 5N/3E/13P y una corriente fija de 8 A se obtuvo una diferencia en la producción de HHO de un 42,86 % al pasar de un 2 a un 0,5 % de KOH. Para el mismo caso, pero a corrientes de 6 y 4 A se obtienen diferencias de más del 200 %.

### **3.1.2 Variabilidad de la cantidad de gas producido en función a la corriente suministrada**

La variación de la corriente mediante el PWM permite evaluar la cantidad de HHO producida con relación a los amperios suministrados por la fuente de corriente. En el Cuadro 3.6 se muestra la variación de producción en ambos arreglos. Primero, para la celda 5N/3E/13P con una disolución al 1 % se obtiene un aumento promedio del 123,7 % por cada amperio suministrado. Segundo, para una disolución al 0,5 % se obtiene un aumento promedio del 126,7 % por cada amperio suministrado. Tercero, para la celda 4N/5E/21P con una disolución al 1 % se obtiene un aumento promedio del 132,6 % por cada dos amperios suministrados. Finalmente, para una disolución al 0,5 % se obtiene un aumento promedio del 140,7 % por cada dos amperios.

**Cuadro 3. 6.** Producción de oxihidrógeno entre arreglos 5N/3E/13P y 4N/5E/21P al variar la corriente.

5N/3E/13P		4N/5E/21P	
KOH al 1%		KOH al 1%	
Corriente A	Flujo mL/s	Corriente A	Flujo mL/s
8	8,33	8	6,64
10	11,67	10	9,19
15	-	15	15,46
20	-	20	22,39
KOH al 0.5%		KOH al 0.5%	
Corriente A	Flujo mL/s	Corriente A	Flujo mL/s
8	8,33	8	6,944
10	-	10	9,611
15	-	15	15,86
20	-	20	-
KOH al 0.25%		KOH al 0.25%	
Corriente A	Flujo mL/s	Corriente A	Flujo mL/s
8	-	8	8,19
6	-	10	10,36
4	-	15	-
20	-	20	-
KOH al 0.125%		KOH al 0.125%	
Corriente A	Flujo mL/s	Corriente A	Flujo mL/s
8	-	8	8,556
10	-	10	-
15	-	15	-
20	-	20	-

Todas las pruebas se realizan a una temperatura ambiente de 32,4 °C, presión atmosférica de 901,5 hPa y humedad relativa de 43 %. Los artículos consultados no presentan estudios sobre la producción de HHO con respecto a la variación de corriente y concentración del electrolito; por consiguiente, no se pueden comparar los resultados obtenidos en este estudio.

Con el fin de determinar si las variaciones de corriente representan cambios representativos en la producción de HHO, entonces se someten los valores obtenidos a un análisis de varianza, en este análisis se comprueba que existen diferencias significativas de HHO. A continuación se presentan los valores obtenidos del análisis estadístico en los Cuadros 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11.

**Cuadro 3. 7.** Comparación para el factor: Corriente (A).

<b>Comparación</b>	<b>Dif de medias</b>	<b>p</b>	<b>Q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,050</b>
8,000 vs. 4,000	282,083	3	370,808	<0,001	Yes
8,000 vs. 6,000	136,667	3	179,653	<0,001	Yes
6,000 vs. 4,000	145,417	3	191,155	<0,001	Yes

Para una concentración de 1, 0,5, 0,250 y 0,125 se tienen los resultados del análisis de varianza como se muestran a continuación.

**Cuadro 3. 8.** Comparación para el factor: Corriente (A) con 1 % de concentración de electrolito.

<b>Comparación</b>	<b>Dif de medias</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
8,000 vs. 4,000	260,000	3	170,889	<0,001	Yes
8,000 vs. 6,000	146,667	3	96,399	<0,001	Yes
6,000 vs. 4,000	113,333	3	74,490	<0,001	Yes

**Cuadro 3. 9.** Comparación para el factor: Corriente (A) con 0,5 % de concentración de electrolito.

<b>Comparación</b>	<b>Dif de medias</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
8,000 vs. 4,000	276,667	3	181,844	<0,001	Yes
8,000 vs. 6,000	123,333	3	81,063	<0,001	Yes
6,000 vs. 4,000	153,333	3	100,781	<0,001	Yes

**Cuadro 3. 10.** Comparación para el factor: Corriente (A) con 0,25 % de concentración de electrolito.

<b>Comparación</b>	<b>Dif de medias</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
8,000 vs. 4,000	301,667	3	198,276	<0,001	Yes
8,000 vs. 6,000	140,000	3	92,017	<0,001	Yes
6,000 vs. 4,000	161,667	3	106,258	<0,001	Yes

**Cuadro 3. 11.** Comparación para el factor: Corriente (A) con 0,125 % de concentración de electrolito.

<b>Comparación</b>	<b>Dif de medias</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
8,000 vs. 4,000	290,000	3	190,607	<0,001	Yes
8,000 vs. 6,000	136,667	3	89,826	<0,001	Yes
6,000 vs. 4,000	153,333	3	100,781	<0,001	Yes

El aumento en la producción de HHO al variar la corriente se refleja en la diferencia de las medias. Los valores más altos son los comparados entre las corrientes de 8 y 4 A.

### 3.2 Eficiencia de la celda

La eficiencia de la celda en cuanto a producción de HHO varía con respecto a la corriente, concentración y temperatura utilizadas. En el Cuadro 3.12 se resumen, para diferentes valores de corriente, la producción de HHO teórica, producida por la celda, basada en las leyes de Faraday y calculadas en la sección 2.2.6.

Donde:

QTH: caudal teórico de hidrógeno.

QTO: caudal teórico de oxígeno.

QTHHO: caudal teórico de HHO.

QP: caudal práctico.

**Cuadro 3. 12.** Resumen de producción teórica de oxihidrógeno para la configuración 4N/5E/21P.

<b>Producción teórica HHO</b>			
Corriente A	QTH mL/s	QTO mL/s	QTHHO mL/s
4	5,11	2,32	7,43
6	7,67	3,48	11,15
8	10,22	4,64	14,86
10	12,78	5,80	18,58
12	15,34	6,96	22,30
14	17,89	8,12	26,01
16	20,45	9,28	29,73
18	23,00	10,44	33,45
20	25,56	11,60	37,16

En el Cuadro 3.13 se observa la eficiencia de la celda para diferentes valores de corriente, que se basa en la producción de HHO teórica.

**Cuadro 3. 13.** Eficiencia de la celda para el caso específico 4N/5E/21P 1 % a diferentes corrientes.

<b>Eficiencia</b>			
4N/5E/21P 1%			
Corriente A	QTHHO mL/s	QP mL/s	Eficiencia %
4	7,43	2,31	31,03
6	11,15	4,19	37,62
8	14,86	6,64	44,66
10	18,58	9,19	49,48
12	22,30	11,19	50,20
14	26,01	13,00	49,97
16	29,73	14,92	50,18
18	33,45	18,42	55,08
20	37,16	22,39	60,25

La eficiencia promedio para el rango de corriente analizado fue de un 47,61 %. Para concentraciones de 0,5, 0,250 y 0,125 % de KOH se obtuvo eficiencias promedio de 47,76,



53,06 y 54,65 % respectivamente. Según Sankar (2014), equipos de electrólisis comercial cuentan con eficiencias que oscilan entre un 40 a 80 %. Autores como Benítez & Ramos (2013) consiguieron resultados de un 60 % de rendimiento en sus modelos, sin embargo en su estudio no se detalla el comportamiento de la eficiencia al variar la concentración de electrolito y la corriente suministrada.

Según las leyes de Faraday la eficiencia de una celda electrolítica se puede obtener mediante la medición de la caída de voltaje entre dos placas adyacentes. El voltaje necesario para separar las moléculas de hidrógeno y oxígeno, mediante electrólisis, es de 1,23 V con lo que se obtiene una celda 100 % eficiente. Autores como Moore et al. (2010) sugieren voltajes menores a 2,3 V, ya que por encima de ese valor se produce calor y vapor de agua como consecuencia.

En la Figura 3.1 se ilustra la medición de la caída de voltaje entre placas adyacentes para la celda cuando se utiliza un multímetro digital.



**Figura 3. 1.** Medición de voltaje entre celdas adyacentes.

La eficiencia de la celda se disminuye con respecto al aumento en la corriente suministrada; sin embargo, los valores no sobrepasan los 2,3 V en un rango importante de uso para la concentración de 1 % en KOH. Para la concentración de 0,5 % hay una menor eficiencia en todo el rango de prueba. En el Cuadro 3.14 se muestran los valores de caída de voltaje entre placas adyacentes, obtenidos por la celda en la configuración 4N/5E/21P.

**Cuadro 3. 14.** Valores de voltaje entre placas adyacentes para 1 y 0,5 % de concentración de KOH.

<b>Corriente</b>	<b>1%</b>	<b>0,50%</b>
A	V	V
18	2,289	2,335
17	2,275	2,330
16	2,256	2,299
15	2,210	2,266
14	2,178	2,233
13	2,149	2,211
12	2,118	2,182
11	2,091	2,146
10	2,063	2,115
9	2,032	2,090
8	2,011	2,051
7	1,977	2,022
6	1,945	1,980
5	1,913	1,964
4	1,852	1,901

### **3.3 Medición de potencia, torque y REAC en la empresa AUTOCOM**

Para verificar la funcionalidad del sistema generador de oxihidrógeno, así como para determinar los efectos que tiene sobre el vehículo de prueba, se han desarrollado una serie de pruebas que permiten analizar cada uno de los beneficios que este ofrece.

Las pruebas de potencia, torque y relación estequiométrica aire/combustible (REAC), fueron llevadas a cabo en la provincia de Cartago a una altitud de 1435 msnm, en la empresa privada AUTOCOM, con la colaboración del propietario el Señor Esteban Madriz.

En el Cuadro 3.15 se presenta la ficha técnica del vehículo de prueba.

**Cuadro 3. 15.** Especificaciones técnicas del vehículo de prueba para potencia, torque y REAC.

<b>Especificaciones técnicas del vehículo de prueba</b>	
Marca	Land Rover
Modelo	Defender 90
Motor	200 Tdi
Año de Fabricación	1997
Cilindraje	2495 cc
Número de cilindros	4
Combustible	Diesel
Transmisión/número de velocidades	Manual/5v
Tracción	4wd
Potencia máxima	107 Hp @ 3900
Torque máximo	188 lb*ft @ 1800
Relación de Compresión	19:01
Diámetro (Bore)	90,47 mm
Recorrido (Stroke)	97 mm

Se realizan tres pruebas consecutivas; una sin el uso del oxihidrógeno y las restantes con dos flujos de gas diferentes para las pruebas de potencia y torque. Además, se hacen cuatro ensayos para el análisis de REAC, cada uno con y sin oxihidrógeno. Sus resultados se presentan a continuación:

En la Figura 3.2 se ilustra un tacómetro digital, necesario para el control del régimen de giro del motor. Con este instrumento es posible mantener las revoluciones del motor en un valor fijo.



**Figura 3. 2.** Tacómetro digital modelo MGT-300 de la marca *BrainBee*.

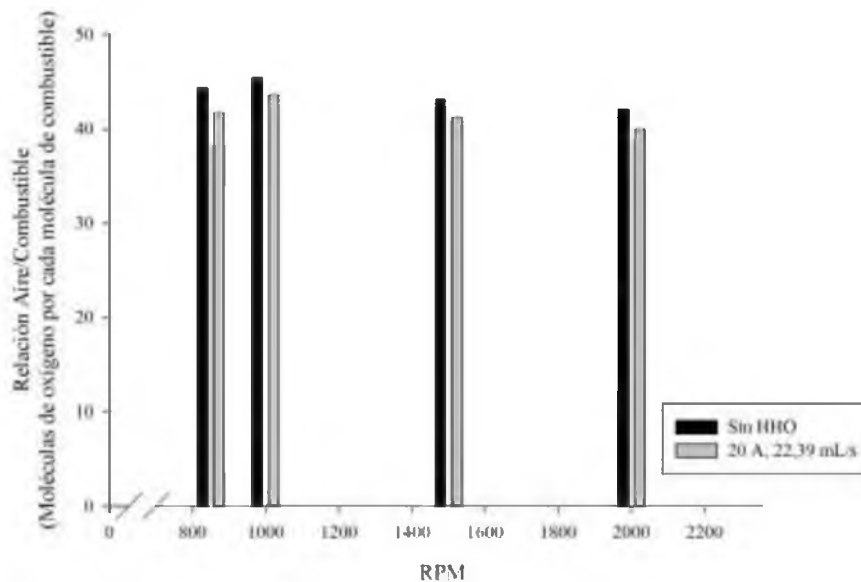
### **3.3.1 Relación Estequiométrica Aire/Combustible**

Mediante una prueba de relación aire/combustible se puede determinar si el oxihidrógeno, suministrado por la celda, tiene algún efecto sobre el comportamiento del motor de combustión interna. Para ello, se utiliza un medidor digital de relación Aire/Combustible de la marca *Innovate Motorsports* modelo LM-1, se muestra en la Figura 3.3.



**Figura 3. 3.** Medidor digital de relación Aire/Combustible de la marca *Innovate Motorsports* modelo LM-1.

Se realizan cuatro pruebas a diferentes velocidades, como se muestra en la Figura 3.4. Los regímenes de giro del motor evaluados son 850, 1000, 1500 y 2000 rpm, con lo que se produce un cambio de 2,6, 1,8, 1,9 y 2,1 (moléculas de oxígeno por cada molécula de combustible) respectivamente, utilizando un flujo de 22,39 mL/s generado a una corriente de 20 A y una concentración del 1 % de KOH. Estos datos muestran una mezcla más rica, una vez inyectado el oxihidrógeno, por consiguiente, el motor obtiene mejores condiciones en cuanto a la generación de potencia y torque.

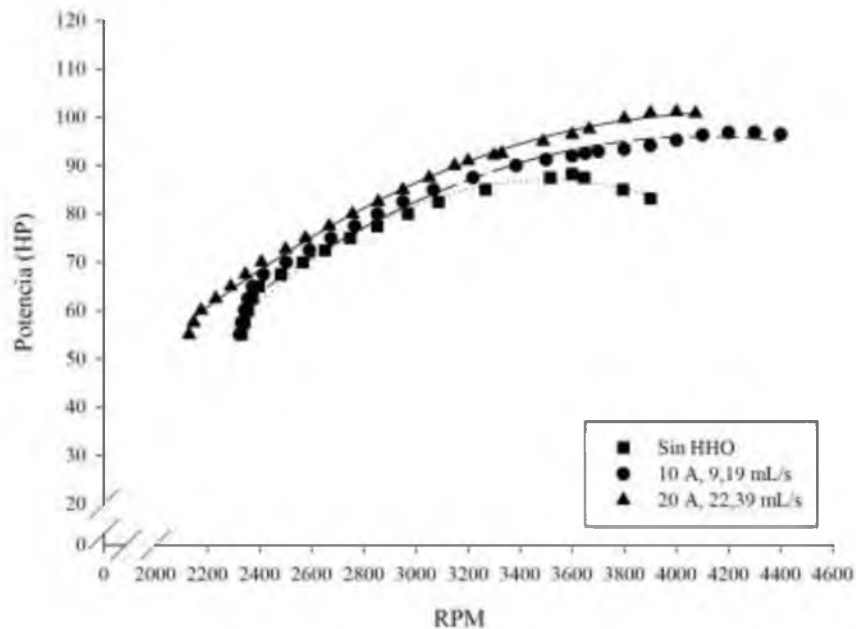


**Figura 3. 4.** Relación Aire/Combustible en motor diesel con y sin HHO.

### 3.3.2 Potencia y torque

En la Figura 3.5 se observan los resultados de las pruebas realizadas en términos de potencia, en función del régimen del motor. La curva de potencia demarcada sin HHO constata el comportamiento del vehículo en su estado original; en este punto se logra alcanzar un valor máximo de potencia de 88,27 Hp a 3600 rpm, lo que implica al

compararlo con su ficha técnica (107 Hp a 3900 rpm) una pérdida de 18,73 Hp equivalente a un 17,5 %, esta pérdida se debe al desgaste del motor y las condiciones ambientales. Por consiguiente, se observa que para todo el rango de velocidad de giro del motor, se logra una ganancia, tanto en potencia como en torque, cuando se suministra un flujo de HHO.



**Figura 3. 5.** Comparación de curvas de potencia a diferentes flujos de HHO.

Los resultados muestran que a un flujo de 9,19 mL/s (generado con 10 A y una concentración del 1 % de KOH) se produce un incremento máximo de 9,73 %; por lo que se aumenta la potencia máxima del motor de 88,27 Hp a 96,86 Hp a 4300 rpm con respecto a la prueba sin oxihidrógeno. Con un flujo de 22,39 mL/s (20 A, 1 % KOH) se obtiene un incremento máximo a 4000 rpm equivalente a 14,52 %, se pasa de 88,27 Hp a 101,09 Hp. Entre la prueba de 10 A y 20 A hay una diferencia de 4,37% equivalente a 4,23 Hp.

La potencia inicial de lectura del dinamómetro es de 55 Hp, la cual es alcanzada por el vehículo de prueba a 2330 rpm en su estado original. Cuando se inyecta un flujo de 9,19 mL/s esta potencia se alcanza a 2322 rpm, al igual que en el caso original. Sin embargo, cuando se utiliza la mezcla a 22,39 mL/s de HHO, la potencia inicial de 55 Hp es alcanzada a 2129 rpm lo que implica una diferencia de 201 rpm y permite generar la misma potencia a un menor régimen de giro.

La caída de potencia en un motor se da a revoluciones determinadas por el fabricante. En el caso del vehículo estudiado, según los resultados del dinamómetro, esta caída se produce después de las 3600 rpm; no obstante, al introducir los diferentes flujos de HHO esta curva se prolonga y se desplaza la caída de potencia a valores de rpm mayores. Para el caso en el que se suministran 9,19 mL/s de HHO, la caída de potencia se registra a las 4300 rpm; lo que permite un rango de 700 revoluciones sin caída de potencia.

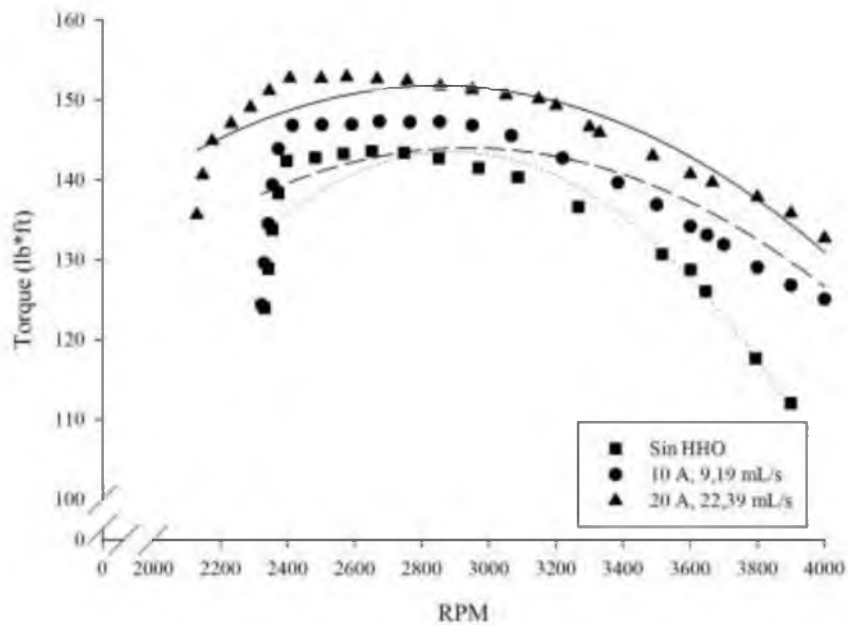
El incremento porcentual máximo obtenido en las pruebas de potencia es del 14,52 %. Este valor es comparado con los resultados obtenidos por diferentes autores como Karagoz & Orak (2011), Falahat et al. (2014), Benítez & Ramos (2013) quienes consiguen en sus investigaciones aumentos de potencia de 7,5 %, 12,6 % y 2,4 %.

Con el modelo sugerido se logran valores de aumento de potencia, superiores a los reportados por los autores consultados. Se demuestra que el efecto del HHO en el motor de combustión interna es realmente significativo y conlleva a maximizar el rendimiento del combustible.

### **3.3.3 Torque**

En la Figura 3.6 se muestran los resultados de las pruebas realizadas en términos del torque, en función del régimen del motor. La curva de torque demarcada sin HHO muestra el comportamiento del vehículo en su estado original, donde se alcanza un valor máximo de torque de 143,39 lb-ft a 2746,94 rpm. Al compararlo con su ficha técnica (188 lb-ft

a 1800 rpm) se encuentra una pérdida de 44,61 lb-ft equivalente a un 23,73 %, esta pérdida se debe al desgaste del motor y las condiciones ambientales.



**Figura 3. 6.** Comparación de curvas de torque a diferentes flujos de HHO.

Los resultados muestran que a un flujo de 9,19 mL/s se produce un incremento máximo de 2,75 %; con lo que se aumenta el torque máximo del motor de 143,39 lb-ft a 147,33 lb-ft a 2673,5 rpm con respecto a la prueba sin oxihidrógeno. Con un flujo de 22,39 mL/s se obtiene un incremento máximo a 2575,97 rpm equivalente a 6,65 %, pasando de 143,39 lb-ft a 152,92 lb-ft. Entre la prueba de 10 A y 20 A hay una diferencia de 3,79 % equivalente a 5,59 lb-ft.

El torque inicial de lectura del dinamómetro es de 124 lb-ft, alcanzada por el vehículo de prueba a 2330 rpm en su estado original. Cuando se inyecta un flujo de 9,19 mL/s este torque es alcanzado a 2322 rpm, igual que en el caso original. Sin embargo, cuando se utiliza la mezcla a 22,39 mL/s de HHO, el torque inicial pasa a 135,65 lb-ft a 2129 rpm, por



ende, hay una diferencia de 201 rpm que permite generar mayor torque a un menor régimen de giro.

Yilmaz et al. (2010) obtienen un incremento del 19,1 % en el torque. Utilizan 1,4 Litros por minuto de oxihidrógeno y supera el valor de 6.65% de aumento en torque al usar 22,39 mL/s de HHO equivalente a 1,34 L/min.

### 3.4 Análisis de gases contaminantes

Se visita al INA (Instituto Nacional de Aprendizaje) con el fin de evaluar el efecto del oxihidrógeno en la disminución de gases contaminantes. El Señor Fabián Chávez encargado del proyecto: *Aplicación del hidrógeno como fuente de energía en vehículos automotores*, facilita el equipo necesario para realizar las pruebas en las instalaciones del INA, ubicadas en Alajuela. El equipo utilizado para las mediciones consta de un vehículo y un analizador de gases, se describen a continuación.

En el Cuadro 3.16 se presenta la ficha técnica del vehículo de prueba:

**Cuadro 3. 16.** Especificaciones técnicas del vehículo de prueba para análisis de gases.

<b>Especificaciones técnicas del vehículo de prueba</b>	
Marca	Isuzu
Modelo	Trooper Wagon
Año de Fabricación	1989
Cilindraje	2255 cc
Ubicación del motor	Delantera
Número de cilindros	4 en línea
Combustible	Gasolina
Transmisión/numero de velocidades	Manual/5v
Tracción	4wd
Potencia máxima	65 kW/88,56 Hp @ 4600 rpm
Torque máximo	168 Nm/ 123,28 ft*lbs @ 2600 rpm
Relación de potencia	0,0564 PS/kg
Diámetro (Bore)	89,3 mm
Recorrido (Stroke)	90 mm

El analizador de gases utilizado es de la marca *Tecnotest*, modelo 488 de manufactura italiana. Este analizador mide los gases de emisión del vehículo tanto de monóxido de carbono (CO) como de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en porcentaje y la densidad de Hidrocarburos (HC).

Para realizar las pruebas de los gases contaminantes se debe cumplir el siguiente procedimiento:

1. Verificar que el sistema de escape del vehículo se encuentre en perfectas condiciones de funcionamiento para que no exista dilución de los gases de escape o fugas de los mismos.
2. Verificar que el nivel de aceite en el cárter del motor del vehículo esté entre el rango recomendado por el fabricante.
3. Poner la transmisión del vehículo en neutro (transmisión manual).
4. Encender el motor del vehículo hasta que alcance la temperatura normal de operación.
5. Encender el equipo de medición y esperar hasta que se estabilice según las especificaciones del fabricante (Figura 3.7).
6. Verificar que se haya realizado el proceso de auto calibración del equipo.
7. Con el motor funcionando en “ralentí”, realizar por lo menos tres aceleraciones consecutivas, desde la posición de “ralentí” hasta la posición de máximas revoluciones, con el fin de limpiar el tubo de escape.
8. Conectar la sonda de prueba a la salida del tubo de escape del vehículo como se muestra en la Figura 3.8.
9. Con el motor funcionando a las revoluciones sugeridas se toman los valores.



**Figura 3. 7.** Analizador de gases *Tecnotest 488*.



**Figura 3. 8.** Conexión de la sonda a la salida del escape.

Se realizan pruebas a diferentes regímenes de giro del motor, donde se evalúan cuatro velocidades; el ralenti del motor gira en promedio a 754 rpm, 1500, 2000 y 2500 rpm. En cada prueba se hacen mediciones utilizando tres diferentes flujos de oxihidrógeno: 6,64, 15,46 y 22,39 mL/s. Todas las pruebas se realizan a una temperatura ambiente de 29,3 °C, presión atmosférica de 898,6 hPa y humedad relativa de 55,4 %.

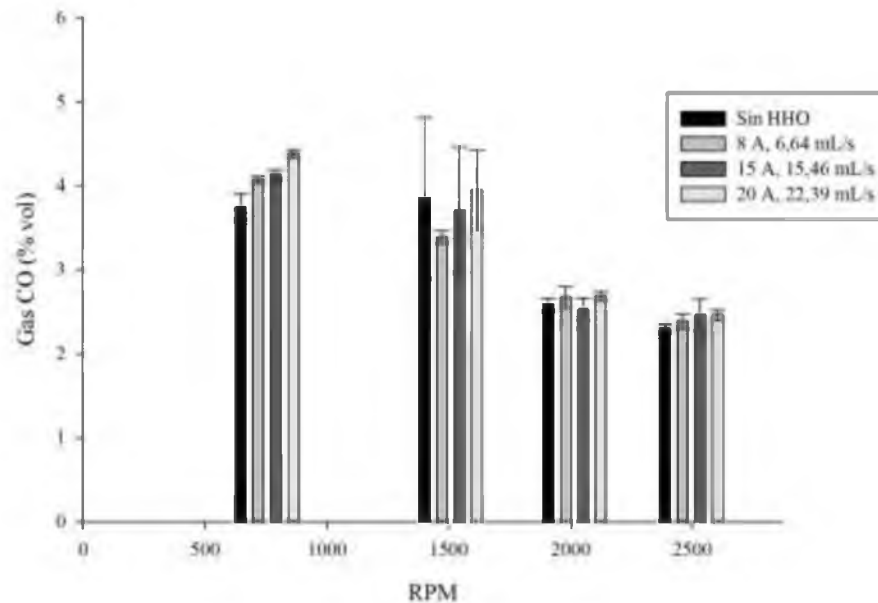
### 3.4.1 Monóxido de carbono

En la Figura 3.9 se observan los resultados correspondientes al comportamiento del monóxido de carbono en función de la cantidad de oxihidrógeno suministrado y la velocidad de giro del motor. Cuando el motor se encuentra en ralentí hay un aumento en las emisiones de CO en un 8,53 % para 6,64 mL/s (8 A, 1 % KOH); 10,13 % para 15,46 mL/s (15 A, 1 % KOH) y 16,8 % para 22,39 mL/s (20 A, 1 % KOH).

Con respecto a la prueba de gases, sin el uso de HHO, a 1500 rpm se obtiene una baja del 12,18 % y 3,89 % para los flujos producidos a 8 y 15 A respectivamente. No obstante, cuando se usan 22,39 mL/s hay un incremento de las emisiones del 2,33 %. En el caso de 2000 rpm las emisiones se mantienen constantes con una disminución del 2,32 %, cuando se utiliza el flujo de 15,46 mL/s y se aumentan las emisiones en un 3,86 % cuando se suministra un flujo de 22,39 mL/s. Finalmente a 2500 rpm hay un incremento máximo a 15 y 20 A de un 6,96 %.

Benítez & Ramos (2013) en sus resultados, muestran una disminución de CO de solamente del 2 %. Premkartikkumar et al. (2013) logran un 23 % menos de emisiones. El estudio realizado por parte de Yilmaz et al. (2010) consigue resultados de un 13,5 % y Wang et al. (2012) un 7,2 %.

El estudio demuestra que el comportamiento del CO no es constante: puede aumentar como disminuir las emisiones del gas. La baja más importante registrada es de un 12,18 % a 1500 rpm y un flujo de 6,64 mL/s; mientras que el mayor aumento se registra a ralentí, al utilizar 22,39 mL/s con un aumento del 16,8 %.



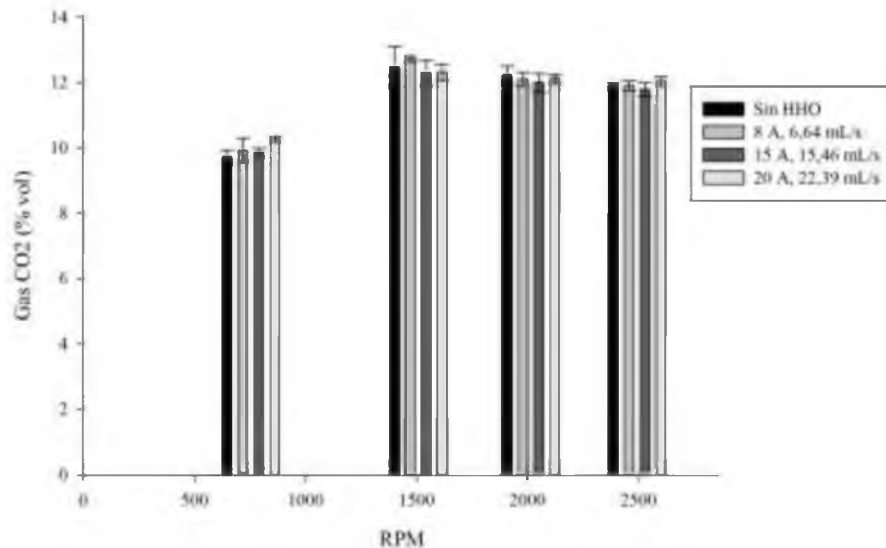
**Figura 3. 9.** Emisiones de CO en función de las rpm cuando se usan diferentes flujos de HHO.

### 3.4.2 Dióxido de carbono

Según Premkartikkumar et al. (2013) las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentan debido al alto grado de combustión obtenida, producto de una mayor acción catalítica de la mezcla de gases. La alta velocidad de llama del HHO, asociado con altas propiedades de difusión y las reacciones de oxidación, debido al cambio en la temperatura del combustible, permiten que la mezcla aire-combustible sea más homogénea y como consecuencia resulta en una mayor emisión de CO<sub>2</sub>.

En la gráfica de la Figura 3.10 se evidencia el comportamiento de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los valores tienen un comportamiento muy estable a lo largo de las pruebas y presentan variaciones mínimas. En ralentí hay un incremento durante todos los flujos de oxihidrógeno suministrado, donde el valor máximo se reporta con un flujo de 22,39 mL/s, para un valor

de 10,27 % vol equivalente a un aumento del 5,55 % con respecto a la prueba sin oxihidrógeno. A 1500 rpm los valores aumentan levemente con 8 A y alcanzan una diferencia de solamente el 2 % para luego bajar con los flujos de 15,46 y 22,39 mL/s, con diferencias porcentuales de 1,52 % y 1,44 %.



**Figura 3. 10.** Emisiones de CO<sub>2</sub> en función de las rpm al utilizar diferentes flujos de HHO.

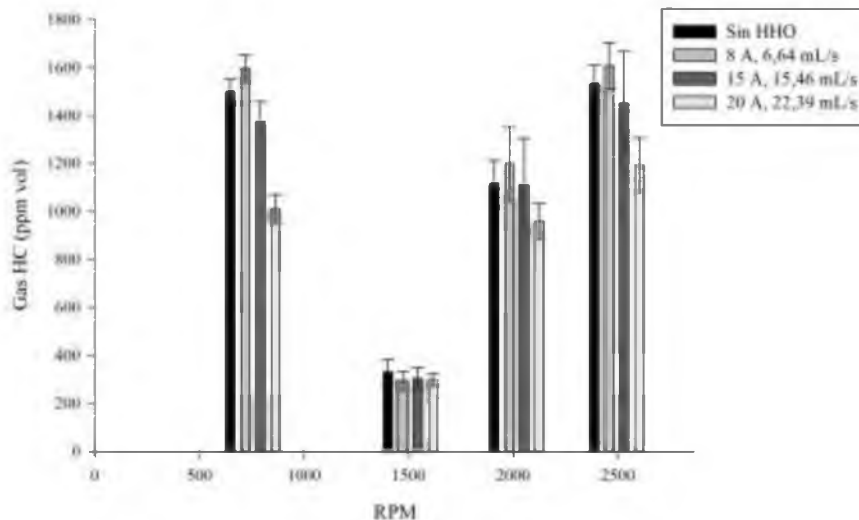
A las velocidades de giro de 2000 rpm hay una disminución en todos los flujos utilizados con una diferencia de 1,14 %, 1,88 % y 0,98 %. Para las pruebas a 2500 rpm el valor obtenido con un flujo de 6,64 mL/s se mantiene invariable con respecto a la prueba sin HHO, cuando se suministra el flujo de 15,46 mL/s bajan las emisiones en un 1 %; mientras que al utilizar 22,39 mL/s se presenta un incremento del 1 %.

Resultados tanto positivos como negativos han sido reportados por diferentes autores. Premkartikkumar et al. (2013) reportan un incremento del 12 % en las emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que Wang et al. (2012) logran una disminución del 4,4 %.

Al igual que el monóxido de carbono, el CO<sub>2</sub> también fluctúa positiva y negativamente con respecto a las variaciones de HHO utilizadas. Dichas variaciones, en este caso, son mucho menores con valores positivos y negativos de aproximadamente 1 %.

### 3.4.3 Hidrocarburos

En la Figura 3.11 se observan los resultados que corresponden al comportamiento de los hidrocarburos en función de la cantidad de oxihidrógeno suministrado y la velocidad de giro del motor. Cuando el motor se encuentra en ralentí hay una disminución máxima en las emisiones de HC de un 32,67 % para 22,39 mL/s, con respecto a la prueba de gases sin el uso de HHO. A 1500 rpm se obtienen disminuciones muy regulares con todos los flujos de oxihidrógeno suministrados con una baja del 11,31 %, 8,07 % y 10,24 % para los flujos producidos por 8, 15 y 20 A respectivamente.



**Figura 3. 11.** Emisiones de HC en función de las rpm utilizando diferentes flujos de HHO.

Asimismo, para el caso de 2000 rpm y 2500 las emisiones de HC se disminuyen su máximo valor a 22,39 mL/s con una diferencia porcentual de 14,01 % y 22,10 % con respecto a la prueba sin oxihidrógeno respectivamente. Sin embargo para las pruebas a ralentí, 2000 y

2500 hay un incremento de las emisiones de HC cuando se utiliza un flujo de 6,64 mL/s de 7,44 % y 4,80 %.

Según Premkartikkumar et al. (2013) la disminución de HC se debe a una mayor concentración de oxígeno presente en la mezcla total de combustible. La alta velocidad de quemado provoca una rápida propagación de la llama en los motores de combustión, lo que provoca una intensa convección del gas y una gran transferencia de calor del gas hacia las paredes de la cámara de combustión. Además, la mezcla combustible con HHO influye en la capacidad de fractura de moléculas de hidrocarburos más pesados por hidrógeno atómico y el oxígeno presente en la mezcla de gas y una mayor tasa de vaporización del combustible permiten disminuir los hidrocarburos emitidos.

Se obtienen distintos resultados en los trabajos de los autores. En el estudio de Benítez & Ramos (2013) hay resultados que van desde una disminución del 51 % de los HC; en la investigación de Yilmaz et al. (2010) de hasta un 5 %. Otros resultados como los de Premkartikkumar et al. (2013) muestran disminuciones del 25 % y Wang et al. (2012) un 9,5 %.

Los hidrocarburos son los gases que se reducen en un mayor porcentaje al introducir el HHO. Con una reducción de hasta el 32,67 %, cuando se suministra un flujo de 22,39 mL/s. Los valores presentados por diferentes autores reportan el HC como el gas que más se afecta por la incorporación del HHO en la mezcla de combustible; por consiguiente, se confirma el comportamiento del modelo presentado en este estudio.

Los principales objetivos al introducir el HHO en el sistema es lograr quemar la totalidad de combustible suministrado, así como sacar el máximo provecho energético de la mezcla. Los HC son restos no quemados del combustible, que surgen en los gases de escape después de una combustión incompleta. La mala combustión puede ser debido a la falta de oxígeno durante la combustión o también por una baja velocidad de inflamación. Estas características se mejoran al introducir el HHO y son verificadas con los resultados obtenidos en la disminución de hidrocarburos y un aumento en la potencia y torque.



## CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó una celda de oxihidrógeno para usar como aditivo en un motor de combustión interna teniendo en cuenta las dimensiones del motor y disponibilidad de materiales adecuados en el mercado nacional.

La celda electrolítica propuesta se instaló satisfactoriamente en los vehículos utilizados respetando las normas de seguridad a seguir, así como el KOH como electrolito a utilizar con su concentración óptima de funcionamiento para el valor de corriente adecuado. Se consiguieron resultados positivos en cuanto al funcionamiento general del sistema.

El comportamiento del monóxido de carbono no es predecible en los casos estudiados, pero se obtuvo una disminución apreciable de un 12,18 % con el motor trabajando a 1500 rpm. El dióxido de carbono se mantiene estable durante las pruebas. Solo varía en un 1 % en la mayoría de los casos y presenta un incremento en ralentí del 5,5 % con respecto a las pruebas sin oxihidrógeno.

Las variaciones más representativas se presentan en el análisis de los hidrocarburos. Existe una disminución del 32,7 % cuando el suministro de oxihidrógeno es de 22,39 mL/s y muestran un mejor desempeño al utilizar flujos altos de dicho aditivo.

Para el análisis de REAC se obtuvo que el oxihidrógeno tiene un efecto directo en la capacidad de mejorar la combustión en el motor y a su vez incrementa la posibilidad de aprovechar mayor cantidad de energía en la mezcla suministrada.

La potencia y el torque generados se alcanzaron a regímenes de giro menores en cuanto aumenta la cantidad de oxihidrógeno, llegando a obtenerse incrementos de hasta un 14,52 %.

## RECOMENDACIONES

Los generadores de hidrógeno deben estar colocados y fijados correctamente a la carrocería para que no se desprendan por la vibración; además, evitar estar cerca de superficies calientes. Por ende, preferiblemente ubicarlos en un lugar con buena aireación.

La instalación eléctrica debe realizarse correctamente y con un fusible de seguridad. Si ocurre alguna anomalía en el sistema, el fusible interrumpe el paso de corriente y el sistema queda completamente deshabilitado. Es importante colocar un interruptor para controlar el paso de corriente hacia la celda. Así se evita una posible acumulación de gas cuando el motor no se encuentra en funcionamiento.

Se debe realizar un estudio y seguimiento del vehículo, al que se le adapta la celda de oxihidrógeno, para un buen funcionamiento. El motor debe estar en perfectas condiciones y calibrado. Una vez instalada la celda, se deben realizar mediciones en cuanto a desempeño, ya que no todos los motores tienen igual comportamiento.

Para una larga duración de los generadores se debe: realizar los mantenimientos preventivos; mantener un mismo nivel de agua en el depósito y verificar que no existan fugas.

Se debe evitar el contacto con la piel cuando se manipule el electrólito usado en la electrólisis y cuando se realice el mantenimiento de los generadores.

Además, los sistemas de hidrógeno son altamente inflamables, por ello, se recomienda que antes de hacer funcionar el motor con el sistema, se debe tener conocimiento del manejo de sistemas de hidrógeno.

Para un funcionamiento óptimo del sistema, se recomienda desarrollar un controlador que evalúe las condiciones del motor y regule la cantidad de gas, entregada por la celda (mediante la variación de corriente); asimismo, se deben considerar las rpm, potencia, torque y las condiciones ambientales como temperatura y altitud.

Se recomienda contar con equipo propio para realizar las pruebas. Esto aumenta la cantidad de datos para procesar y analizar; por ende, permite ejecutar una mayor cantidad de pruebas para un mejor análisis del sistema.

Finalmente, se recomienda que la UCR como ente educativo y generador de tecnología consecuente con nuestra realidad y limitantes económicos debería de apoyar el proseguir con los retos que quedan pendientes según los resultados obtenidos en este proyecto, no solo por la contribución en cuanto a la flotilla vehicular sino con respecto a las implicaciones en la ciudadanía como una alternativa accesible.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Rababah , M., & Bhuyan , A. (2014). Predicting Effects of Gasoline and Hydrogen fuel supplements on the Performance Characteristics of Four-stroke SI Engines. *International Journal of Advanced Science and Engineering Technology*, 4 (1), 342-359.
- Al-Rousan , A. A. (2010). Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (23), 12930-12935.
- ASTM A380 / A380M-13. (2013). *Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems*. West Conshohocken: ASTM International.
- Bari, S., & Mohammad Esmail, M. (2010). Effect of H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*, 89 (2), 378-383.
- Benítez Gaibor, Á. V., & Ramos Valle, M. A. (2013). *Implementación de un sistema dual fuel, hidrógeno/gasolina en un vehículo de motor de combustión interna*. (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa*. México, D.F.: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Diaz del Castillo Rodríguez, F. (2008). *Lecturas de ingeniería 7: Principios de electrodeposición*. Cuautitlán, Izcalli, México: Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán UNAM.

- Falahat, A. M., Hamdan, M. A., & Yamin, J. A. (2014). Engine performance powered by a mixture of hydrogen and oxygen fuel obtained from water electrolysis. *International Journal of Automotive Technology*, 15 (1), 97-101.
- Guevara Hidalgo , M. G. (2010). *Metodología de pruebas para la evaluación de convertidores catalíticos en motores a gasolina*. (Tesis de grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Karagoz , Y., & Orak , E. (2011). Effect of h<sub>2</sub>+ o<sub>2</sub> gas mixture addition on emissions and performance of an si engine. *Yildiz Technical University*, 38-42.
- Litherland Teed, P. (1919). *The Chemistry and Manufacture of Hydrogen*. New York: Longmans, Green and Company.
- López R., J. R. (2012). *Modelo dinámico de un electrolizador alcalino*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Marrero, T. R., & Mason, E. A. (1972). Gaseous Diffusion Coefficients. *Journal of Phys. Chem.*, 1 (1), 3-118.
- Méndez, J. A. (2013). *Diseño y construcción de electrolizador de agua para la obtención de oxihidrógeno como gas combustible*. (Tesis de grado). Instituto Politécnico Nacional, Azcapotzalco, DF, Mexico.
- Merchán, C. E. (2004). *Determinación de la potencia y el torque en motores de combustión interna mediante la técnica de la aceleración libre*. (Tesis de grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Molina Mojica, J. R. (2007). *Determinación de las propiedades termodinámicas de la mezcla de gases de combustión considerando doce especies*. (Tesis de grado). Universidad de Pamplona, Pamplona.

- Moore, M., Kituuma , N., Morales , G., & Zink , C. (2010). *Partial hydrogen injection*.  
Wentworth: Wentworth Institute of Technology.
- Narayan , N., Vanangamudi , & Naveenchandran , P. (2014). Performance and Emission Characteristics of Oxy Hydrogen Gas on a Three Cylinder Four Stroke Petrol Engine. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3 (3), 682-685.
- Pattanachak , E., Pattanasethanon , S., & Sa-ngiamvibool , W. (2011). Application Technique of Hydrogen and Oxygen for Co-Fuel Small Trucks. *Journal of Practical Electrical Engineering*, 3 (2), 22-30.
- Premkartikkumar, S., Annamalai, K., & Pradeepkumar, A. (2013). Effect Of Addition Of Oxygen Enriched Hydrogen Gas Produces By Electrochemical Reaction In The Reduction Of Pollutants Coming Out From A DI Diesel Engine. *International Journal of ChemTech Research*, 5 (4), 1523-1531.
- Ramirez Gonzaga , C. M., & Cujilema Cujilema, J. S. (2011). *Estudio e implementación de un sistema dual para optimizar la combustión de un motor otto mediante el uso del gas de brown (Hho)*. (Tesis de grado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Rossum, J. R. (1975). Checking the Accuracy of Water Analyses Through the Use of Conductivity. *American Water Works Association*, 67 (4), 204-205.
- Sankar, T. (2014). The effect of oxy-hydrogen (hho) on the performance and emission characteristics of diesel and karanj in single cylinder four stroke diesel engine. *Journal of Multidisciplinary Scientific Research*, 2 (1), 12-18.
- Ström, J., & Johansson, M. (2012). *Hydrogen and Oxygen Enhanced Combustion*. Kalmar Maritime Academy. Kalmar: Linnaeus University.
- UNE-EN 100-20. (2001). *Définition y clasificación de los tipos de aceros*. Madrid, España: Asociación Española de Normalización y Certificación.

- Wang, H.-K., Cheng, C.-Y., Lin, Y.-C., & Chen, K.-S. (2012). Emission reductions of Air Pollutants from a Heavy-duty Diesel Engine Mixed with Various Amounts of H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>. *Aerosol and Air Quality Research*, 12 (1), 133-140.
- Yilmaz , A. C., Uludamar , E., & Aydin , K. (2010). Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (20), 1-7.

# ANEXOS

## Anexo A. Ficha técnica de neopreno.



Garlock de México S.A. de C.V.  
Garlock Sealing Technologies  
AFROBADA POR DIRECCIÓN DE INGENIERÍA  
Formas 000-015, 016/018

### Estilo Garlock 264

Especificaciones de Producto Terminado

Revision  
A  
USA 10

Laminado de hule Neopreno / Nitrilo / SBR (CR / NBR / SBR) medianamente fuerte y de alta calidad.

Esta combinación es moderadamente resistente a los aceites, se utilizan como amortiguadores, cojinetes y como juntas para aplicaciones generales. Este laminado es grado comercial por lo que no se recomienda utilizarlo en aplicaciones en donde se requiera del sellado del aceite.

TIPO DE HULE:	Neopreno / Nitrilo / SBR (CR / NBR / SBR)
COLOR:	Negro
ACABADO:	Espejo
TEMPERATURA MÁXIMA:	88°C (190°F)
PRESIÓN:	150 PSI

#### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

CARACTERÍSTICAS	METODO ASTM	ESPECIFICACION
Fuerza Tensión	F-412	800 psi
Elongación	D-412	300 %
Dureza Shore "A"	D-2240	55-65

#### MEDIDAS COMERCIALES

MEDIDA DEL ROLLO (plg)	ESPEORES DISPONIBLES
72" (ancho)	1/32" A 2"

#### INSTRUCCIONES DE MANEJO Y ALMACENAMIENTO

1. Almacenar en áreas limpias y secas.
  2. No aplicar más de 20 toques por familia (lote).
  3. No exponer la hoja a la intemperie antes de usarla.
  4. No exponer a gases, aceites y solventes en forma líquida o vapor, antes de usarla.
  5. No exponer al fuego directo ni antes ni después de su uso.
    - A. Prevenir de la exposición de los ojos al resaca proveniente de la luz solar y de siempre de los flashamientos.
  6. No almacenar cerca de equipos que produzcan ozono (O<sub>3</sub>).
  7. En caso de almacenamiento prolongado, inspeccionar periódicamente el material.
  8. No almacenar cerca de vapores que produzcan olores.
  9. No usar el material si se observa que ya está rígido y quebradizo.
- La vida en servicio (fecha de caducidad) es de 12 a 18 meses a partir de la fecha de fabricación de la familia, siempre y cuando se mantenga a una temperatura de almacenamiento entre 20 y 30°C.
- Para cualquier duda, consulte al área de Servicio al Cliente en Garlock de México S.A. de C.V. (800-377-1111).

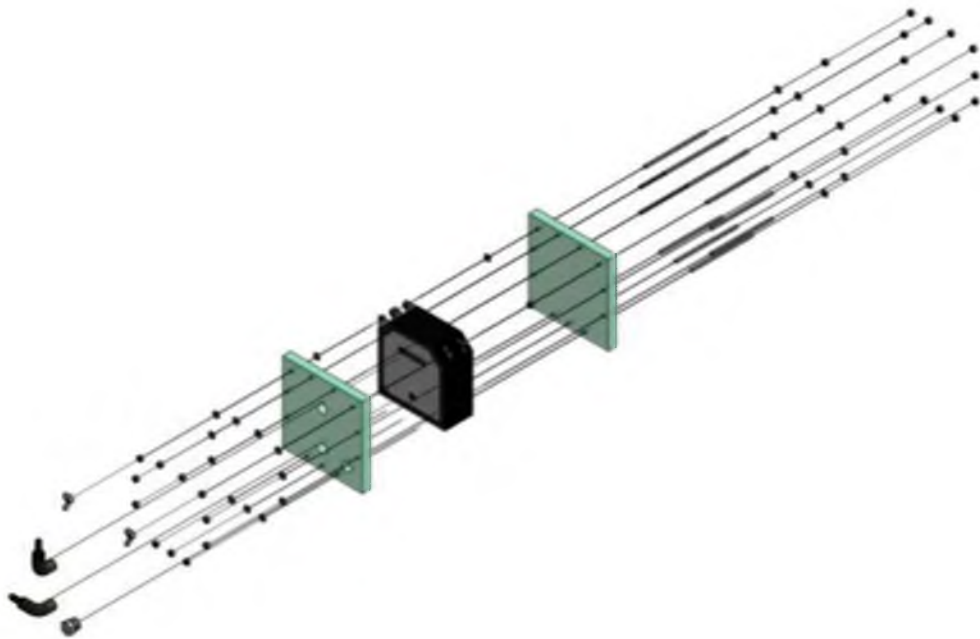
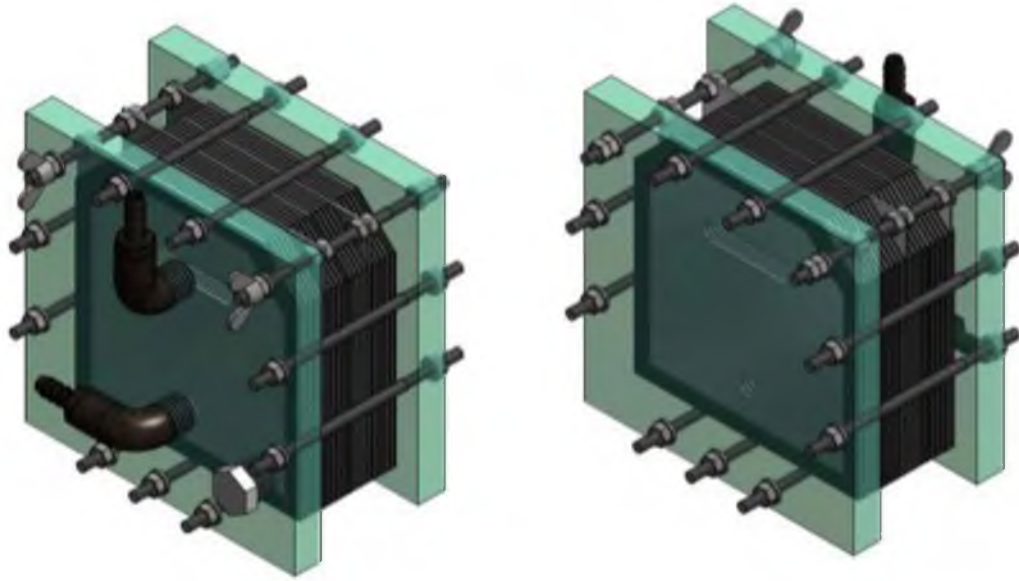
Las aplicaciones y propiedades mencionadas en esta ficha técnica son típicas. La elección de productos debe considerarse con el ambiente y condiciones de su aplicación específica para que sean los adecuados. Para recomendaciones de aplicaciones específicas, favor de contactar al área de Servicio al Cliente en Garlock de México, S.A. de C.V. En caso de la elección de los productos de sellado pueden presentarse otros datos materiales y propiedades.

Con estos datos se puede utilizar para determinar los requisitos de los productos de sellado, según los ejemplos de 104 a 1010, y 1011, en las fichas de especificación de sellado.

Garlock de México S.A. de C.V. no asume ninguna responsabilidad por errores de interpretación cometidos por terceros. Cuando la selección de datos hechos por la parte que usa de Garlock o cuando se hubiera hecho una interpretación o interpretación proporcional por el usuario. Para recomendaciones específicas consulte al área de Servicio al Cliente.



**Anexo B. Modelo de celda 4N/5E/21P.**



Continuacion Anexo B.

