

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ALEJANDRO JAVIER ALEGRE REYES

**CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS HHO
EN UN VEHÍCULO CHEVROLET CLASSIC 1.0**

**Bagé
2022**

ALEJANDRO JAVIER ALEGRE REYES

**CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS HHO
EN UN VEHÍCULO CHEVROLET CLASSIC 1.0**

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Gestão de Processos Industriais Químicos da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Especialista em Gestão de Processos Industriais Químicos.

Orientador: Cesar Antônio Mantovani

**Bagé
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

R457c REYES, ALEJANDRO JAVIER ALEGRE
Constucción y aplicación de un sistema generador de gas HHO en un vehículo Chevrolet Classic 1.0 / ALEJANDRO JAVIER ALEGRE REYES.
110 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Especialização)--
Universidade Federal do Pampa, ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS QUÍMICOS, 2022.
"Orientação: CESAR ANTÔNIO MANTOVANI".

1. Combustión Híbrida. 2. Celda Electrolítica. 3. Eficiencia. 4. Gas HHO. 5. Sistema Otto. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

ALEJANDRO JAVIER ALEGRE REYES

**CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS HHO EN UN
VEHÍCULO CHEVROLET CLASSIC 1.0**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Gestão de Processos Industriais Químicos da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Especialista em Gestão de Processos Industriais Químicos.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 25 de fevereiro de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Me. Cesar Antônio Mantovani

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Edson Abel dos Santos Chiamonte

UNIPAMPA

Prof. Dr. Sérgio Meth Morgenbesser

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CESAR ANTONIO MANTOVANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/03/2022, às 15:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SERGIO METH MORGENBESSER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/03/2022, às 08:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDSON ABEL DOS SANTOS CHIARAMONTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/03/2022, às 13:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0746897** e o código CRC **244902ED**.

Referência: Processo nº 23100.003613/2022-90 SEI nº 0746897

RESUMO

La necesidad de evaluar fuentes de combustibles alternativos para medios de transporte no es reciente, el alto costo, polución y otros impactos ambientales llevan a plantearse la idea de estudiar sistemas que puedan complementar híbridamente la quema del combustible convencional. Los sistemas de generación de gas HHO como combustible para estos medios de transporte, viene siendo una alternativa muy estudiada por los beneficios económicos, por la limpieza de la combustión y por ser un proceso amigo del medio ambiente. Es por estas razones que se plantea estudiar el funcionamiento de un sistema generador de gas HHO en un vehículo Chevrolet Classic 1.0, 2009. De acuerdo a eso, fue necesario dividir el proyecto en tres partes diferentes, con la idea de construir argumentos basados, primero en función de una pesquisa técnica de diferentes modelos de celdas electrolíticas para ir en desarrollo de un diseño estándar, segundo, con foco en la construcción e instalación del electrolizador en el vehículo estudiado y por último, de acuerdo a un análisis comparativo de diferentes parámetros del motor de combustión interna en pleno funcionamiento cuando se está con electrolizador y sin electrolizador. Siguiendo esa línea fue posible calcular el valor de eficiencia del sistema generador de gas HHO, su consumo de corriente, el volumen de gas producido de forma teórica y experimental, concentración ideal de electrolito, análisis de gases pós combustión, pruebas de rendimiento de consumo de combustible convencional y la identificación e interpretación de sensores lambda, sensor de posición de acelerador (TPS) y sensor de inyección para este motor de sistema Otto.

Palabras-clave: Combustión híbrida. Celda Electrolítica. Eficiencia. Gas HHO. Sistema Otto.

ABSTRACT

The need to evaluate alternative fuel sources for transportation is not recent, the high cost, pollution and other environmental impacts lead to the idea of studying systems that can hybridize the burning of conventional fuel. HHO gas generation systems as fuel for these means of transport have been a highly studied alternative due to its economic benefits, clean combustion and because it is an environmentally friendly process. It is for these reasons that it is proposed to study the operation of an HHO gas generator system in a Chevrolet Classic 1.0 vehicle, 2009. Accordingly, it was necessary to divide the project into three different parts, with the idea of building arguments based, first based on a technical investigation of different models of electrolytic cells to develop a standard design, second, with a focus on the construction and installation of the electrolyser in the vehicle studied and finally, according to a comparative analysis of different parameters of the internal combustion engine fully operational when with electrolyser and without electrolyser. Following this line, it was possible to calculate the efficiency value of the HHO gas generating system, its current consumption, the volume of gas produced theoretically and experimentally, the ideal concentration of electrolyte, post-combustion gas analysis, fuel consumption performance tests. conventional fuel and the identification and interpretation of lambda sensors, throttle position sensor (TPS) and injection sensor for this Otto system engine.

Keywords: Hybrid combustion. Electrolytic cell. Efficiency. HHO Gas. Otto system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formas Comunes de Producción de Hidrógeno.....	16
Figura 2 – $\Delta G(T)$, $\Delta H(T)$, $T\Delta S(T)$ en la separación del Agua Presurizada (1 bar - 250°C).....	21
Figura 3 – Principio Básico de la Producción de HHO por Electrólisis.....	25
Figura 4 – Comportamiento de Electrolitos frente a una Disociación.....	30
Figura 5 – Comparación de Bases Fuertes y relación Conductividad -Temperatura.	31
Figura 6 – Sentido Real y Sentido Convencional de los Electrones.....	33
Figura 7 – Celda Electrolítica Seca de Tipo Unipolar y Bipolar.....	34
Figura 8 – Etapas de un Proceso Electrolítico.....	35
Figura 9 – Consumo de Energía Eléctrica vs HHO Generado (NaOH).....	44
Figura 10 – Consumo de Energía Eléctrica vs HHO Generado (KOH).....	45
Figura 11 – Curvas de Tensión Aplicada vs Temperatura (Electrólisis).....	46
Figura 12 – Motor de Cuatro Tiempos (Ciclo Otto).....	48
Figura 13 – Secuencia del Pistón.....	48
Figura 14 – Parámetros Sonda Lambda.....	50
Figura 15 – Extensión de la Inflamabilidad de Combustibles (Cond. Normales).....	53
Figura 16 – Representación de una Celda Electrolítica Seca.....	56
Figura 17 – Herramienta de Corte H1.....	65
Figura 18 – Herramienta de Perforación H2.....	65
Figura 19 – Accesorio de Perforación H3.....	66
Figura 20 – Herramienta de Corte H4.....	66
Figura 21 – Análisis de Continuidad.....	68
Figura 22 – Producción de Gas HHO.....	69

Figura 23 – Proyecto de Conexión Eléctrica.....	70
Figura 24 – Diagrama del Circuito Gaseoso.....	71
Figura 25- Secuencia para el Test de 10 Km	72
Figura 26 – Tablet Axone 5	73
Figura 27 – Analizador de Gases	73
Figura 28 – Ensamblaje de Piezas P4 y P5.....	74
Figura 29 – Ensamblaje de Piezas P1 y P5.....	75
Figura 30 – Ensamblaje de Piezas P2 y P5	75
Figura 31 – Ensamblaje de Piezas P1 y P5.....	76
Figura 32 – Ensamblaje de Pieza P3 y P6	76
Figura 33 – Consumo de Carga Eléctrica de la Celda	80
Figura 34 – Volumen Experimental de HHO	84
Figura 35 – Vista General de la Instalación del Sistema HHO	87
Figura 36 – Instalación del Sistema HHO en el Vehículo.....	89
Figura 37 – Instalación Eléctrica del Sistema HHO	91
Figura 38 – Ubicación de los Sensores Lambda.....	96
Figura 39 – Sensor de Posición de Acelerador	97
Figura 40 – Ubicación de los Inyectores	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 – Propiedades Físicas del Hidrógeno	17
Tabla 2 – Propiedades del Hidrógeno Comparadas con otros Combustibles	17
Tabla 3 – Funciones de Estado y Energía para Disociar Agua (1 bar - 25°C).....	20
Tabla 4 – Balance de Materia y Carga para una Electrólisis	23
Tabla 5 – Conductividad Molar de Electrolitos a 25°C en $\text{cm}^2\Omega^{-1}\text{mol}^{-1}$	29
Tabla 6 – Curvas de Tensión Aplicada versus Temperatura en una Electrólisis	47
Tabla 7 – Datos Técnicos Motor VHCE.....	49
Tabla 8 – Factor Lambda ideal para Algunos Combustibles	51
Tabla 9 – Composición del Aire Atmosférico	51
Tabla 10 – Documentos con Información Técnica de Celdas Electrolíticas	55
Tabla 11 – Materiales para la construcción de la Celda	57
Tabla 12 – Herramientas para la Construcción de la Celda.....	59
Tabla 13 – Accesorios del Sistema Generador de HHO	60
Tabla 14 – Materiales de Laboratorio Químico	63
Tabla 15 – Parámetros del Test Comparativo.....	71
Tabla 16 – Comparativo del Consumo de Combustible	93
Tabla 17 – Consumo Medio de Combustible en Km por Litro	93
Tabla 18 – Análisis de Gases sin Electrolizador.....	94
Tabla 19 – Análisis de Gases con Electrolizador	95
Tabla 20 – Comparativos de los Sensores Lambda	96
Tabla 21 – Sensor de Posición TPS.....	98
Tabla 22 – Comparativo para el Tiempo de Inyección.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

CN – Condiciones Normales
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
FEM – Fuerza Electromotriz
CH₃COOH – Ácido Acético
HCN – Ácido Cianhídrico
NaOH – Hidróxido de Sódio
KOH – Hidróxido de Potasio
NH₄OH – Hidróxido de Amonio
H₂SO₄ – Ácido Sulfúrico
HCl – Ácido Clorhídrico
HNO₃ – Ácido Nítrico
Conc. – Concentración
Ec. – Ecuación
Ej. – Ejemplo
KPa – Kilo pascal
Kgfm – Kilogramo fuerza metro
TPS – Sensor de posición de Acelerador

LISTA DE SÍMBOLOS

T – Temperatura

ΔH – Entalpía

ΔG – Energía Libre de Gibbs

ΔS – Entropía

ΔH_d° – Entalpía Estándar de disociación

ΔS_d° – Entropía Estándar de Disociación

s – Sólido

l – Líquido

aq – Acuoso

K_a – Constante de Acidez

K_b – Constante de Basicidad

H₂ – Hidrógeno

O₂ – Oxígeno

HHO – Gas oxihidrógeno

SUMÁRIO

1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo General	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. El Hidrógeno	15
3.1.1. Formas de Producción de Hidrógeno	15
3.1.2. Propiedades físicas del hidrógeno	16
3.2. Funciones Termodinámicas de Estado	18
3.3. La Electrólisis	21
3.3.1. Tipos de Electrolitos	25
3.3.1.1. Constante Disociación y Grado de Disociación	28
3.3.1.2. Conductividad de KOH y NaOH	30
3.3.1.3. Ley de Ohm	31
3.3.1.4. Sentido de la Corriente Eléctrica	32
3.4. Generador de Hidrógeno de Celda Electrolítica.....	33
3.4.1. Fenómenos Físico - Químico en una Celda	34
3.4.1.1. Polarización de Electrodo.....	36
3.4.2. Tensión mínima para la Electrólisis del Agua	39
3.4.2.1. Ecuación de Nernst	43
3.4.2.2. Producción de HHO Catalizado con NaOH.....	44
3.4.2.3. Producción de HHO Catalizado con KOH	45
3.4.2.4. Eficiencia, Tensión y Consumo de Energía en la Electrólisis del Agua	45
3.5. Análisis de un Motor a Combustión Interna	47
3.5.1. Características del Vehículo Chevrolet Classic Life 2009.....	49
3.5.2. Relaciones estequiométricas A/F en el motor.....	49
3.5.2.1. Sistema de Inyección Electrónica	52
3.5.2.2. Extensión de Inflamabilidad	52
4. MATERIALES Y MÉTODOS	54
4.1. Antecedentes Técnicos para la Construcción de la Celda	54
4.1.1. Características para un Modelo Estándar de Celda	55

4.2.	Materiales y Herramientas.....	56
4.2.1.	Materiales para la Construcción de la Celda.....	56
4.2.2.	Herramientas para la Construcción de la Celda.....	59
4.2.3.	Accesorios del Sistema HHO	60
4.2.4.	Material de Laboratorio Químico	63
4.3.	Métodos Empleados.....	64
4.3.1.	Fabricación de la Celda	64
4.3.2.	Preparación del Electrolito.....	67
4.3.3.	Análisis de Continuidad Eléctrica	67
4.3.4.	Análisis de Consumo de Corriente y Tensión.....	68
4.3.5.	Análisis del Volumen de HHO Producido	68
4.3.6.	Esquema de Instalación del Sistema Generador de HHO.....	69
4.3.7.	Análisis del Consumo de Combustible.....	71
4.3.8.	Analizador de Parámetros del Motor	73
4.3.9.	Analizador de Gases	73
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
5.1.	Ensamblado de la Celda Electrolítica.....	74
5.2.	Capacidad Técnica de la Celda Electrolítica	77
5.2.1.	Cálculo de Área para Placas (Positiva, Negativa, Neutra) y Aislante ...	77
5.3.	Capacidad de Producción de la Celda Electrolítica	79
5.3.1.	Cálculo del Volumen Vacío de la Cámara de Reacción	79
5.3.2.	Cálculo de Carga Eléctrica para Generar la Electrólisis	80
5.3.3.	Cálculo para la Producción de Gas	81
5.3.4.	Cálculo de Potencia Consumida	85
5.3.5.	Cálculo de Energía Consumida.....	85
5.3.6.	Cálculo de Eficiencia de la Celda Electrolítica.....	86
5.4.	Instalación del sistema HHO en el Vehículo	86
5.4.1.	Instalación Física del Sistema HHO	86
5.4.2.	Instalación Eléctrica	91
5.5.	Aplicación del Electrolizador en el Vehículo.....	92
5.5.1.	Consumo de Combustible	92
5.5.2.	Análisis de Gases	93

5.5.3. Diagnóstico del motor.....	95
6. CONCLUSIÓN	100
REFERENCIAS	101
APÉNDICE	106
ANEXO I.....	107
ANEXO II	108
ANEXO III.....	109

1. INTRODUCCIÓN

Una de las mejores alternativas para el proceso de producción de hidrógeno es a través de la electrólisis del agua. Se trata de un proceso relativamente sencillo, no contamina y se convierte en una técnica altamente eficiente cuando se le requiere. Según Al-rousan (2010), el gas HHO o el gas de Brown es el nombre que se le da al gas hidrógeno y oxígeno producidos juntos en un electrolizador. Este gas puede ser utilizado en motores y generadores en un sistema dual, junto con un combustible fósil, para reducir el consumo de este último. De acuerdo a la estequiometría de reacción, el proceso es capaz de disociar el solvente polar en razón de 2:1 (hidrógeno:oxígeno), por lo que la aplicación de una diferencia de potencial concomitantemente va a provocar el inicio la electrólisis de todas las especies presentes. En términos prácticos una diferencia de potencial de 12 V condiciona en cierta manera el número de placas para conformar el electrolizador, esa relación debe ser suficiente para que cada semicelda alcance un potencial uniforme de acuerdo al área efectiva de reacción y eficiente para superar las resistencias propias del metal, del electrolito y los diferentes fenómenos de polarización que impiden alcanzar el umbral de eficiencia. Para la construcción de la celda fue importante estudiar técnicamente diferentes modelos disponibles en bibliografía, donde muchos coinciden en un diseño estándar cuando el objetivo tenía una aplicación en vehículos con motores de combustión interna. Todos los materiales que componen esa celda son de fácil acceso, sin embargo, el montaje, funcionamiento, instalación física y eléctrica precisan de un conocimiento previo que van desde fundamento físico-químico, habilidad manual, fundamento eléctrico entre otros como se puede dar cuenta técnica en el capítulo IV de este documento. Finalmente, ya en la etapa de aplicación del dispositivo en el motor de combustión interna, fue posible determinar eficiencia de la celda, comparación de parámetros internos en la relación a la quema del combustible en condición nominal y observada, rendimiento y otras interesantes proyecciones en relación a celdas de mayor capacidad en vista de vehículos de mayor cilindrada.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Construir e implementar un generador de gas HHO en un vehículo de combustión interna 1.0

2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar diferentes modelos de celdas electrolíticas y establecer un prototipo de construcción.
- Cuantificar el volumen de gas HHO que produce la celda en forma teórica y experimental.
- Determinar la eficiencia y el consumo de corriente de la celda electrolítica.
- Verificar el consumo de combustible convencional con y sin electrolizador
- Estudiar comparativamente la generación de gases pós combustión del motor, con y sin electrolizador.
- Analizar comparativamente los parámetros de funcionamiento interno del motor con y sin electrolizador

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. El Hidrógeno

El hidrógeno no se encuentra en la naturaleza en su estado fundamental H_2 , por motivo que este combinado con algunos elementos, es producido a partir de fuentes como es el agua, gas natural. (QUEZADA, 2014). Es un gas incoloro, inodoro, insípido y no es tóxico, también se quema en el aire formando una llama azul pálido casi invisible. Es el más ligero de los gases conocidos en función a su bajo peso específico con relación al aire. (RIBERA, 2015).

El Hidrógeno es particularmente propenso a fugas debido a su baja viscosidad y a su bajo peso molecular (peso molecular = 2.016). Es un combustible con un alto contenido energético, que proporciona 28.6696 Kcal por cada gramo, frente a 11.953 Kcal/gr del gas natural, 10.780 Kcal/gr de la gasolina, 10.932Kcal/gr del butano y 10.0792 Kcal/gr del propano. (RIVERA, 2015, p. 8)

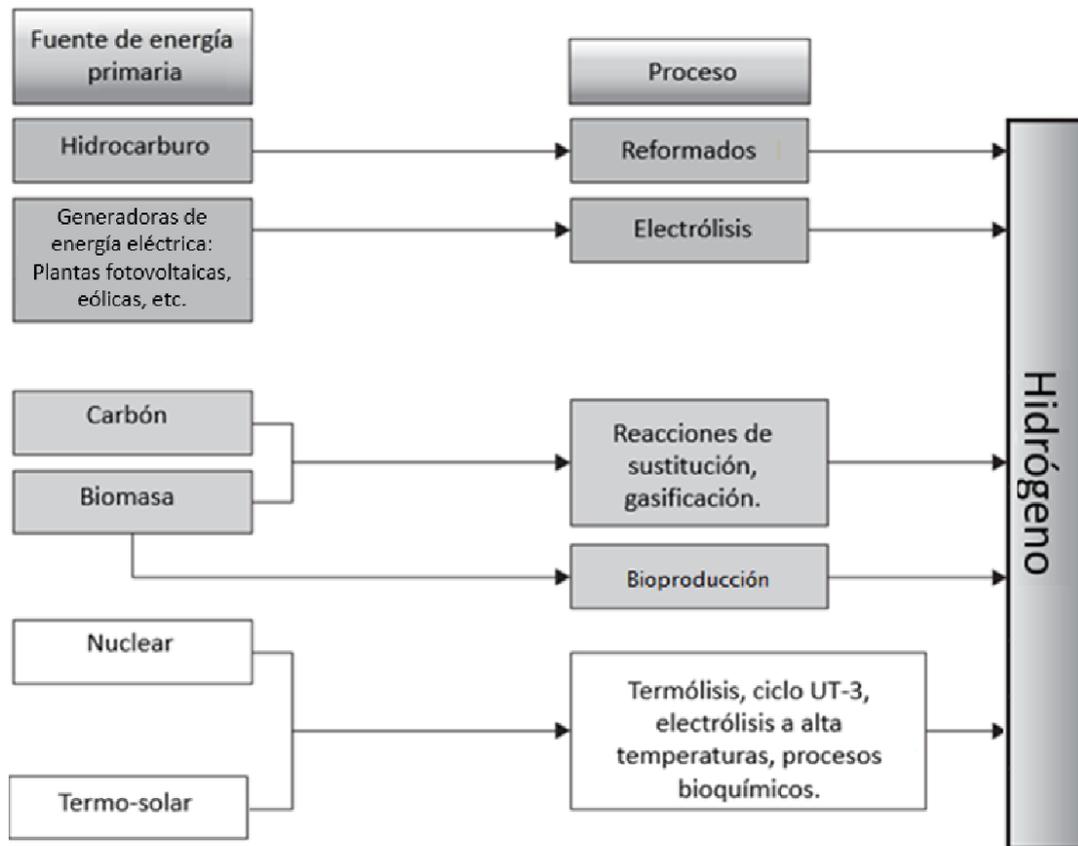
3.1.1. Formas de Producción de Hidrógeno

La electrólisis del agua es uno de los procesos más importantes para la producción de hidrógeno, pero existen otras tecnologías que también son utilizadas comúnmente en la industria (VERMEERSCH, 2018; MOMIRLAN, 2002). Las más comunes son:

- Reformado por vapor del gas natural.
- Descomposición catalítica del gas natural.
- Oxidación parcial de aceites pesados.
- Gasificación del carbón.
- Ciclos termoquímicos puros e híbridos.
- Procesos fotoquímicos, foto-electroquímicos y fotobiológicos.

Estos procesos pueden ser clasificados de acuerdo a la fuente primaria de energía y al proceso involucrado de acuerdo a la *figura 1*.

Figura 1 – Formas Comunes de Producción de Hidrógeno



Fuente: Vermeersch (2018, p.5)

Según comentarios de Vermeersch (2018), el hidrógeno no se encuentra presente en la naturaleza de forma molecular, sino que hace parte de otras composiciones en forma atómica, por lo que su obtención requiere de un proceso como los mencionados anteriormente (*figura 1*). En simples términos la combustión de este elemento no contamina, al contrario, es amigable con el medio ambiente y no es nocivo para las personas ya que solamente produce calor y agua.

3.1.2. Propiedades físicas del hidrógeno

De acuerdo a la información entregada por Godula-Jopek (2015) las principales propiedades físicas del hidrógeno molecular están representadas en la *tabla 1*.

Tabla 1 – Propiedades Físicas del Hidrógeno

Parámetro	Valor	Unidad
Peso molecular	$2,016 \cdot 10^{-3}$	$kg \cdot mol^{-1}$
Punto de fusión	13,96	K
Punto de ebullición	14	K
Densidad a 4,2 K (sólido)	89	$kg \cdot m^{-3}$
Densidad a 20,4 K (líquido)	71	$kg \cdot m^{-3}$
Densidad a 0°C y 101,3 kPa (gaseoso)	$8,99 \cdot 10^{-2}$	$kg \cdot m^{-3}$
Conductividad térmica (a 25 °C)	$1,842 \cdot 10^{-1}$	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$
Calor bruto de combustión (a 25 °C y 101,3 kPa)	$2,6504 \cdot 10^5$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot mol^{-1}$
Calor neto de combustión (a 25 °C y 101,3 kPa)	$2,4192 \cdot 10^5$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot mol^{-1}$
Temperatura de auto-ignición	858	K
Límite de inflamabilidad en oxígeno ¹	4-94	%
Límite de inflamabilidad en aire	4-74	%

Fuente: Godula-Jopek (2015, p.2)

De la misma manera anterior, Godula-Jopek (2015) representa en la *tabla 2* los diferentes límites y propiedades energéticas que poseen los combustibles más utilizados y como también del hidrógeno.

Tabla 2 – Propiedades del Hidrógeno Comparadas con otros Combustibles

Fuel	Gravimetric energy density		Volumetric energy density		Flammability limits	Explosive limits	Fraction of heat in radiative form
	MJ kg ⁻¹	kWh kg ⁻¹	MJ l ⁻¹	kWh l ⁻¹	vol%	vol%	
Hydrogen compared 200 bar	120	33.3	2.1	0.58	—	—	—
Hydrogen liquid	120	33.3	8.4	2.33	4–75	18.3–59.0	17–25
Methanol	19.7	5.36	15.7	4.36	6–36.5	6–36	17
Petrol	42	11.36	31.5	8.75	1–7.6	1.1–3.3	30–42
Diesel	45.3	12.58	35.5	9.86	—	0.6–7.5	—
Kerosene	43.5	12.08	31.0	8.6	—	0.7–5	—

Fuente: Godula-Jopek (2015, p.3)

Se observa que el hidrógeno:

- Posee una densidad energética por unidad de masa mucho mayor a cualquier otro combustible.
- Es el que posee la menor densidad energética por unidad de volumen, a temperatura y presión normal.
- Posee un mayor límite inferior de inflamabilidad.
- Posee un mayor límite superior de inflamabilidad.

El hidrógeno tiene un rango de inflamabilidad mucho más amplio, desde 4 (límite inferior de inflamabilidad, LFL) a 75% en volumen (límite superior de inflamabilidad, UFL) en aire (4-95% en volumen en oxígeno) y límites de detonabilidad de 11-59% en volumen en aire. (GODULA-JOPEK, 2015, p. 2-3)

3.2. Funciones Termodinámicas de Estado

Según el análisis de Vermeersch (2018) para que la electrólisis del agua sea realizada a cabo es necesario que algunas variables como diferencia de potencial, pH, temperatura, presión, conductividad del agua, cumplan ciertas condiciones para que la corriente externa pueda estar por sobre el umbral molecular y así favorecer el proceso electrolítico en donde el agua líquida (Cond. Normal 25°C. 101,3 KPa) pueda conseguir separarse en H_2 y O_2 gaseoso. Para calcular la energía necesaria y producir la electrólisis es oportuno conocer la entalpía de disociación H_d° , necesario para pasar de agua líquida a vapor y luego disociar sus moléculas.

Si la energía de disociación del agua líquida en condiciones normales (CN) es $\Delta H_d^\circ(H_2O_{(l)})$: 285,84 $KJ \cdot mol^{-1}$, su entropía de disociación $\Delta S_d^\circ(H_2O_{(l)})$: 163,15 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$, podemos conocer la energía que se necesita para que de una manera la electrólisis del agua pueda producirse a través de la fórmula general de energía libre de Gibbs (ec.1), desarrollada en ecuación (ec.2)

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (1)$$

Donde:

ΔH = Es la entalpía

ΔG = Es la energía libre de Gibbs

T = Es la temperatura (en Kelvin)

ΔS = Es la entropía

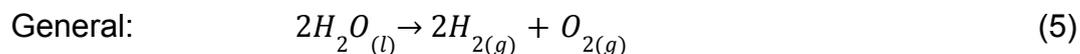
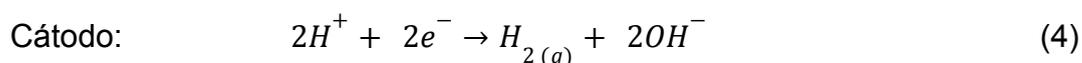
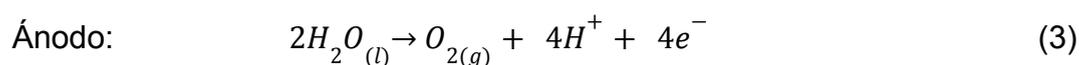
Resultando en:

$$\Delta G_{(H_2O)l} = \Delta H_{(H_2O)l}^{\circ} - T \cdot \Delta S_{(H_2O)l}^{\circ} \quad (2)$$

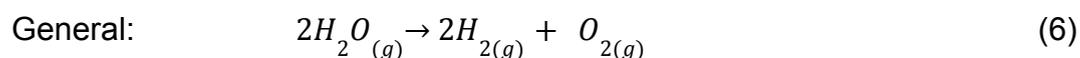
$$\Delta G = +237,22 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Este valor nos indica que la disociación del agua no es termodinámicamente espontánea, es necesario aplicar energía para que esto ocurra. En relación a este estudio es necesario aplicar energía en forma de tensión eléctrica en los electrodos para dar inicio a la reacción.

El agua líquida puede disociarse en sus componentes elementales (hidrógeno molecular y oxígeno), dando reacciones de origen óxido / reducción (VERMEERSCH, 2018). Las reacciones involucradas, ánodo (ec.3), cátodo (ec.4) ambas extraídas en (anexo III) y la reacción general simplificada (ec.5).



El vapor de agua también se puede disociar en hidrógeno gaseoso y oxígeno de acuerdo con la reacción siguiente (ec.6): (BELTRAN; CARMEN, 2017)



Igual que de forma líquida, los valores de entalpía, entropía y energía libre de Gibbs en forma de vapor, pueden utilizar la siguiente fórmula (ec.7). $\Delta H_d^\circ(H_2O_{(vap)})$: $241,8 \text{ KJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, $\Delta S_d^\circ(H_2O_{(vap)})$: $44,10 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

$$\Delta G_{(H_2O)v} = \Delta H_{(H_2O)v}^\circ - T \cdot \Delta S_{(H_2O)v}^\circ \quad (7)$$

$$\Delta G = + 228,66 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

$\Delta H_d^\circ(H_2O_{(l)}) - \Delta H_d^\circ(H_2O_{(vap)}) = +44,04 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$ Es la diferencia del cambio de entalpía debido a la evaporación del agua en condiciones estándar, (ec.8).



$\Delta S_d^\circ(H_2O_{(l)}) - \Delta S_d^\circ(H_2O_{(vap)}) = +119,05 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$, es la diferencia de cambio de entropía debido a la evaporación del agua. Siendo $T \cdot \Delta S = 298 \text{ K}^\circ \cdot 119,05 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1} = 35,48 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$

A continuación, son ilustrados resumidamente las energías involucradas para la disociación del agua en forma de H_2 y O_2 . (Tabla 3)

Tabla 3 – Funciones de Estado y Energía para Disociar Agua (1 bar - 25°C)

Funciones de Estado	Estado del Agua		Δ (Liq. – Vap.)
	Líquido	Vapor	
$\Delta H \text{ (KJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	+285,84	+241,8	+44,04
$\Delta G \text{ (KJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	+237,22	+228,66	+8,56
$\Delta S \text{ (KJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	+0,1631	+0,0441	+0,119

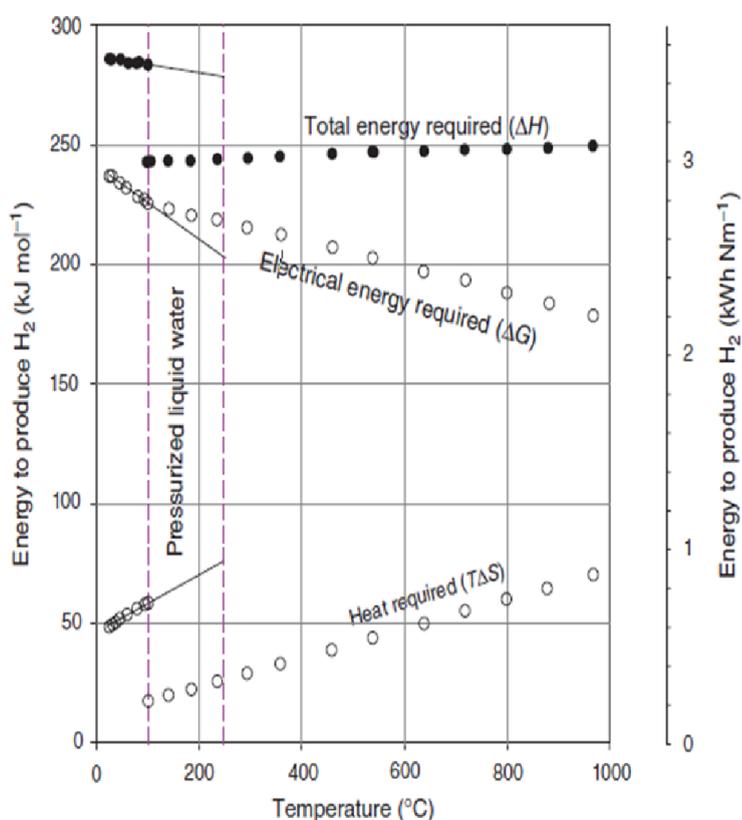
Fuente: Autor (2021)

Como en condiciones normales la disociación del agua no es espontánea, es necesario aplicar cierta cantidad de energía en forma de tensión eléctrica, provocar el efecto Joule y aprovechar dicha energía para que sea absorbida por el sistema. Una vez en el sistema, la temperatura aumentará a un punto constante generando un mayor desorden de partículas y un calor irreversible necesario para la

producción de trabajo. En la *figura 2* se ilustra un proceso termodinámico en el cual se mantiene presión constante de 1 bar hasta los 250°C.

En términos generales es observado que $T\Delta S$ (si aumenta la temperatura aumenta la entropía) aumenta pronunciadamente diferente que ΔH (aumento muy leve) lo cual provoca una disminución del trabajo necesario para favorecer la reacción.

Figura 2 – $\Delta G(T)$, $\Delta H(T)$, $T\Delta S(T)$ en la separación del Agua Presurizada (1 bar - 250°C)



Fuente: Beltran;Carmen (2017, p. 43)

3.3. La Electrólisis

Después de varios trabajos y muchos descubrimientos, comienzan aparecer diferentes investigadores despertando curiosidad en la comunidad científica de ese entonces, como es el caso de Alessandro Volta, físico italiano al cual se le atribuye de dar el nombre a la fuerza electromotriz (FEM), la unidad de Voltio que hoy en día es reconocida en el sistema internacional y al desarrollo de la pila eléctrica en 1800.

William Nicholson y Anthony Carlisle por descubrir el proceso de la electrólisis basado en los trabajos de Alessandro Volta y estos últimos basados en los trabajos de J. R. Deiman y A. Paets van Troostwijk que no consiguieron interpretar once años antes definiéndolo como: “Fenómeno que permite separar los elementos que forman un compuesto utilizando para ello una corriente eléctrica” a través de la botella de Leyden.

En 1807 Elmer Humphry Davy aísla metales como calcio, potasio y le da el nombre al elemento cloro, todos por medio de la electrólisis. Quien sucede sus grandes trabajos en la Royal Society (sociedad científica de Reino Unido) fue Michael Faraday con sus aportes a leyes de la electrólisis que hoy en día son reconocidas como las leyes de Faraday (ROMERO, 2018. p. 12-13).

- 1º ley de Faraday de la electrólisis: La masa de una sustancia depositada en un electrodo durante la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida a este electrodo (ec.10). La cantidad de electricidad se refiere a la cantidad de carga eléctrica, que en general se mide en coulomb. Puede notarse que a mayor intensidad mayor masa depositada como también de productos oxidados y reducidos. Además, la intensidad es el único parámetro que puede variar dada una reacción electroquímica específica, pero puede cambiar por efectos de variaciones de concentración y pH.

- 2º ley de Faraday de la electrólisis: Para una determinada cantidad de electricidad (carga eléctrica), la masa depositada de una especie química en un electrodo es directamente proporcional al peso equivalente del elemento. El peso equivalente de una sustancia es su masa molar dividida por un entero que depende de la reacción que tiene lugar en el material.

La ecuación de Faraday más utilizada y aplicable para todas las reacciones electrolíticas es basada de la unión de dos fórmulas, primera ley y segunda ley, esta resulta en la siguiente fórmula, (ec.9).

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{96500 \cdot n} \quad (9)$$

Donde:

m = Masa depositada

M = Masa atómica

I = Intensidad de corriente

n = Número de electrones

t = Tiempo transcurrido

Por otro lado, la velocidad de la electrólisis (ec. 10) depende directamente de la intensidad, a mayor intensidad mayor velocidad de oxidación y reducción de sustancias.

$$V_{(elec)} = \frac{m}{t} = \frac{M \cdot I}{96500 \cdot n} \quad (10)$$

Ejemplo: Cuando separamos un mol de agua, obtenemos 2 g de hidrógeno y 16 g de oxígeno. En este caso el peso equivalente del oxígeno sería 8, es decir, el número de unidades de peso de un elemento que se combina con una unidad de peso de hidrógeno. En la *tabla 4* se observan algunos procesos en materia y carga para el depósito de un mol de metal en una electrólisis.

Tabla 4 – Balance de Materia y Carga para una Electrólisis

Proceso	Cantidad depositada	Cantidad e ⁻ necesarios	Carga eléctrica
$\text{Na}^+(\text{aq}) + 1\text{e}^- \rightarrow \text{Na}(\text{s})$	1 mol Na	1 mol e ⁻	96500 C $\approx F$
$\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}(\text{s})$	1 mol Mg	2 mol e ⁻	2 · 96500 C $\equiv 2F$
$\text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}(\text{s})$	1 mol Al	3 mol e ⁻	3 · 96500 C $\equiv 3F$

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Faraday_de_la_electr%C3%B3lisis

Prácticamente es un proceso en el cual dos electrodos (positivo y negativo) son sumergidos en una solución acuosa y uno de ellos (negativo en sentido real,

figura 6) es capaz de transferir una carga eléctrica al sistema a partir de una fuente de alimentación y así provocar la separación del hidrógeno y el oxígeno en forma molecular (la carga eléctrica que no reacciona sigue hacia el electrodo positivo en sentido real, *figura 6*), este fenómeno se debe a que el campo eléctrico externo (diferencia de potencial) es mayor al campo eléctrico (molecular) lo que provoca la ruptura del enlace covalente del agua.

Un esquema de la electrólisis se puede observar en la *figura 3*. En una celda electrolítica, en el ánodo se oxida la especie con mayor capacidad de cesión de electrones (potencial de reducción más bajo). En cambio, en el cátodo se reduce la especie con mayor poder de aceptación de electrones (potencial de reducción más alto). Consultar Anexo II, tabla de potenciales de reducción. Las variaciones en la concentración de las especies, pH, temperatura, presión, naturaleza de los electrodos, reacciones químicas secundarias, etc. afectan al potencial de reducción de cada especie dando lugar a nuevos arreglos de la tabla fuera de las condiciones estándar.

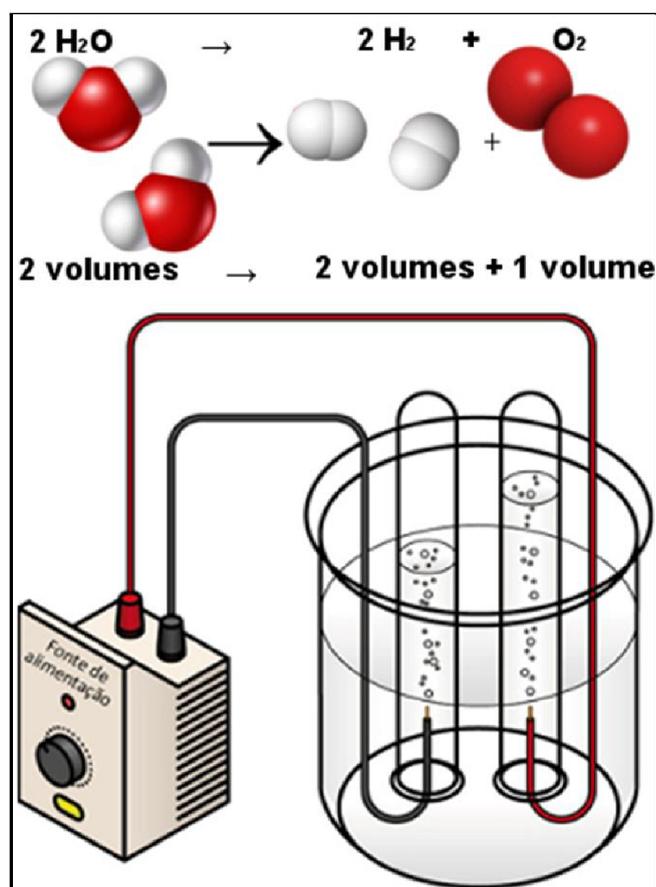
El potencial eléctrico de una celda electroquímica es igual a la diferencia de potenciales de reducción de las reacciones que ocurren en el cátodo y ánodo (*ec.11*).

$$E_{(cel)} = E_{cát}^{red} - E_{án}^{red} \quad (11)$$

O igual a la suma de potenciales de reducción del cátodo y oxidación del ánodo (*ec.12*).

$$E_{(cel)} = E_{cát}^{red} + E_{án}^{ox} \quad (12)$$

Figura 3 – Principio Básico de la Producción de HHO por Electrólisis



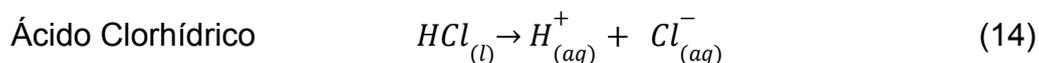
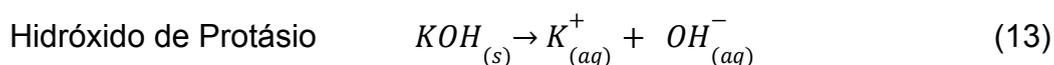
Fuente: Antunes; Penteadó; Gibin, (2017, p.18)

3.3.1. Tipos de Electrolitos

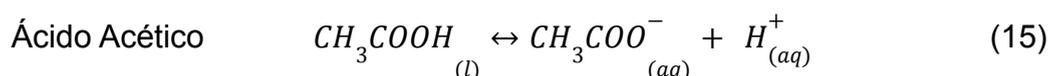
Un electrolito es cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres en una disolución y hacen que se comporte como un conductor eléctrico (VOGEL, 1981, p.16), son conocidos también como disoluciones iónicas lo que implica siempre un movimiento de carga. Estas se conocen como electrolito fuerte y electrolito débil:

- a) Electrolito fuerte: son aquellos que al mezclarse solo con un disolvente (ej: agua) se disocian en iones de una manera casi completa e irreversible (sobre un 90%) y así favorecer la movilidad de la corriente eléctrica. Ejemplo, ácidos fuertes (HCl, H₂SO₄, HNO₃) bases fuertes (la mayoría de los hidróxidos,

NaOH, KOH, excepto NH_4OH) y sales (NaCl y la gran mayoría). Disociación de una base fuerte (ec. 13) y disociación de un ácido fuerte (ec. 14)

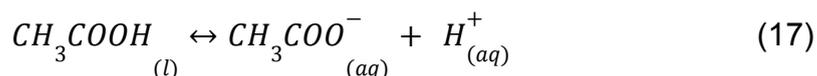


b) Electrolito débil: normalmente exhiben una fuerza de disociación o ionización parcial, son reacciones reversibles y tienden a un equilibrio el cual puede ser medido por una constante que varía según su naturaleza ácida o básica. Pueden sufrir hidrólisis y se encuentran, por ejemplo, como ácidos débiles (ej: CH_3COOH , HCN) y bases débiles (ej: NH_3 , $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$). Entonces, la forma de disociarse sigue según la reacción descrita en (ec. 15) y para el cálculo de su constante de disociación sería según (ec. 16) a (25°C). Este ejemplo, representa la forma de obtener la constante K_a de un compuesto ácido y también puede ser usada para sustancias básicas donde solo es necesario reemplazar tanto reactivos como productos para obtener la nueva constante K_b .



$$K = \frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-][\text{H}^+]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]} = 1,76 \times 10^{-5} \quad (16)$$

Este valor indica que la constante de disociación es baja, por lo tanto, la fuerza ácida es débil (*Anexo I*). Además, es posible conocer las concentraciones de cada especie en el equilibrio como también el pH de la solución. Este último puede ser calculado de la siguiente manera. Se prepara una solución de una concentración $0,01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ de ácido acético ($K_a=1,76 \times 10^{-5}$), ¿cuál será el pH de la solución? Para resolverlo es necesario continuar con la siguiente reacción (ec. 17).



Conc. inicial	c	-	-
Conc. equilibrio	c - x	x	x

Se puede observar que inicialmente la concentración de ácido acético es $c=0,01$ M y sus productos es cero porque aún no comienza la reacción. Mientras que en el equilibrio parte del ácido acético ($c - x$) se disocia en acetato (x) e hidrógeno (x). Es decir que la concentración de acetato e hidrógeno sería la misma asumiendo lo siguiente (ec.18).

$$[CH_3COO^-] = [H^+] \quad (18)$$

Desde otra óptica vemos que la parte disociada de ácido acético ($0,01M - X$) aún no es conocida, pero es sabido que otra parte pasó a ser ion acetato e ion hidrógeno en una misma proporción. Lo que no se disoció se mantiene en solución (ácido acético) deduciendo lo siguiente, $0,01M$ también sería la sumatoria de ácido acético no disociado y ion acetato formado (ec.19).

$$c = [CH_3COOH] + [CH_3COO^-] = 0,01M \quad (19)$$

Para conocer la concentración de iones hidrógeno es necesario plantear la ecuación de disociación para este ácido (ec.20) en función del equilibrio (ec.17).

$$k = \frac{x \cdot x}{c-x} = \frac{x^2}{c-x} = \frac{[H^+]^2}{c-[H^+]} \quad (20)$$

$$Ec. Cuadrática: x^2 - xk + ck \rightarrow a = 1; b = k; c = ck$$

Resolviendo mediante la ecuación cuadrática (ec.21).

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (21)$$

Reemplazando solamente en la ecuación positiva (ec.22)

$$a = 1; b = 1,76 \times 10^{-5}; c = 0,01 \times 1,76 \times 10^{-5}$$

$$[H^+] = \frac{-1,76 \times 10^{-5} + \sqrt{(1,76 \times 10^{-5})^2 + 4(0,01 \times 1,76 \times 10^{-5})}}{2} \quad (22)$$

$$[H^+] = 4,10 \times 10^{-4} \text{ M}$$

El valor de concentración de hidrógeno indica que solo el 4% de la concentración inicial (0,01M) pudo ionizarse, en consecuencia, la fuerza para movilizar cargas eléctricas de una disolución 0,01 M de ácido acético es muy baja. Además, es importante mencionar que el ion acetato sufre hidrólisis ácida por parte del agua en una disolución, que en esta oportunidad no será revisado.

Obtención del pH, (ec.23).

$$pH = -\log[H^+] \rightarrow pH = 3,4 \quad (23)$$

Finalmente, un pH < 3 indica ácido fuerte, un pH entre 3 - 6 indica ácido débil, un pH 7 indica neutral, un pH entre 8 – 11 indica base débil y un pH > 11 indica base fuerte. Claramente, el valor del ejemplo indica, electrolito débil, baja disociación, baja cinética, pudiendo no ser una buena elección para ser utilizado como electrolito en una electrolisis.

3.3.1.1. Constante Disociación y Grado de Disociación

La fórmula para calcular la constante de disociación, fue revisada en base a (ec.15) y (ec.16). Una K_x (constante de disociación ácida o básica) alta, indica una

disociación muy alta y un pK_x (logaritmo de la constante de disociación ácida o básica) pequeño indica también que la fuerza de disociación es alta. (*Anexo I*)

Por su parte, el grado de disociación, es la fracción de moléculas que efectivamente se encuentran disociadas dentro de una matriz acuosa y la manera de obtener ese valor, puede ser representado por la (ec.24). Existen diferentes formas experimentales para determinarlo, siendo una, a través de la conductividad del electrolito. Este método está asociado al hecho de que la corriente eléctrica es transportada por los iones en solución; su número relativo que está íntimamente ligado al grado de disociación determinará la conductividad de la solución. La variación de la conductividad molar en relación a la concentración para varios electrolitos se puede apreciar en la siguiente *tabla 5*, donde queda de manifiesto que a mayor concentración menor conductividad y a menor concentración mayor conductividad. (VOGUEL, 1981. p. 23)

$$\alpha = \frac{\text{Número de moléculas disociadas}}{\text{Número total de Moléculas}} \quad (24)$$

Tabla 5 – Conductividad Molar de Electrolitos a 25°C en $\text{cm}^2 \Omega^{-1} \text{mol}^{-1}$

Concentration mol l^{-1}	Electrolyte						
	KCl	NaCl	HCl	NaOH	KOH	CH_3COONa	CH_3COOH
$\rightarrow \alpha (= \Lambda_0)$	150.1	126.2	423.7	260.9	283.9	91.3	388.6
0.0001	149.2	125.3	—	—	—	—	—
0.0002	—	—	—	—	—	—	104.0
0.0005	148.3	124.3	422.2	246.5	270.1	89.4	64.5
0.001	147.5	123.5	421.1	244.7	268.2	88.7	48.7
0.002	146.5	122.2	419.2	242.5	266.2	87.7	35.2
0.005	144.2	119.8	414.9	238.8	262.1	85.7	22.8
0.01	141.6	117.8	410.5	234.5	258.9	83.7	16.2

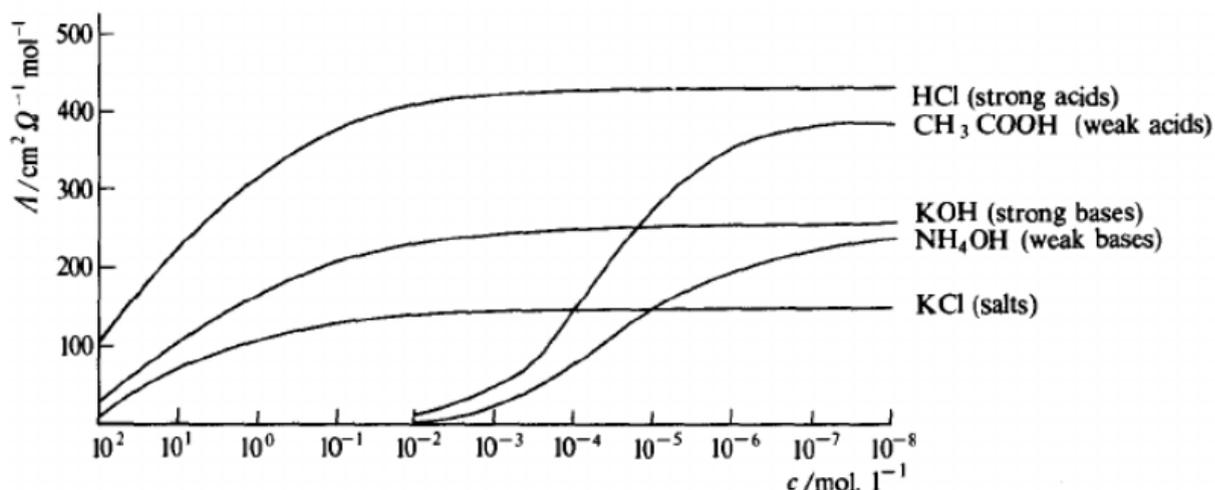
Fuente: Vogel (1979, p.13)

La *figura 4*, muestra la diferencia de conductividad entre un ácido y una base, ya sea fuerte, débil y viceversa. Si bien Vogel, (1979) indicó en la tabla anterior que para diferentes especies a menor concentración mayor conductividad y mayor concentración menor conductividad, es importante destacar que ácidos y

bases fuertes como también sales (Ej. NaOH, KOH) poseen una característica que los diferencia de especies débiles.

Es decir, las especies fuertes comienzan a disociarse inmediatamente incluso a mayores concentraciones, mientras que las especies débiles se disocian en menor cantidad y a una menor velocidad hasta el punto de equilibrio.

Figura 4 – Comportamiento de Electrolitos frente a una Disociación



Fuente: Vogel (1979, p.14)

En *anexo I* y *anexo II* se pueden apreciar las constantes de disociación y grados de disociación para algunos ácidos, bases y sales con el fin de situar al lector sobre la fuerza de las diferentes especies frente a una matriz acuosa.

3.3.1.2. Conductividad de KOH y NaOH

La conductividad es la propiedad que poseen los materiales para transportar energía eléctrica. De acuerdo con la nomenclatura establecida por Faraday, existen dos tipos de conductores, los de primera clase, son los metales, los cuales transfieren esta energía a través del flujo de electrones y los de segunda clase, se refieren a las disoluciones de electrolitos, éstos transportan masa y energía por medio del movimiento de iones.

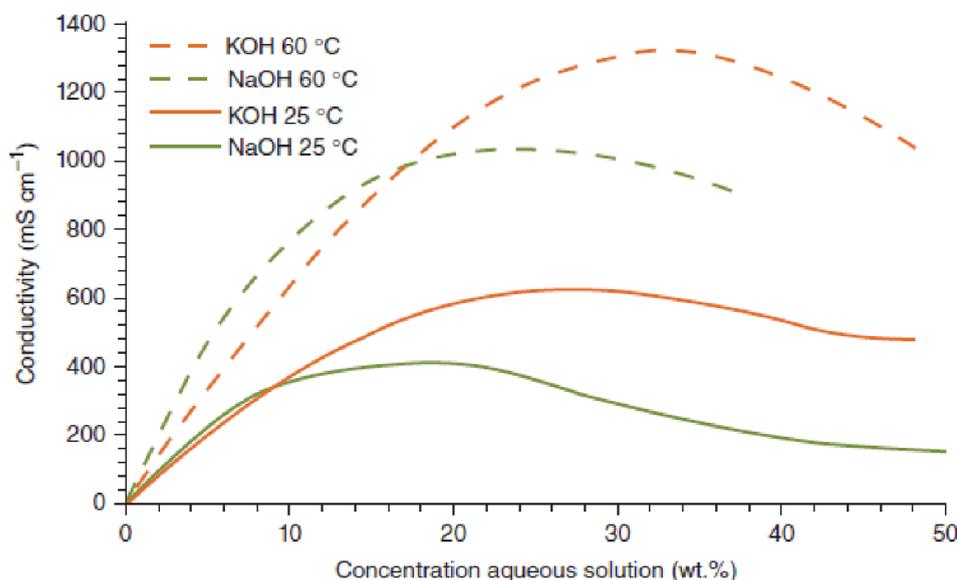
El agua destilada presenta una conductividad eléctrica muy baja, así mismo la electrólisis sería lenta generando una cantidad de HHO no considerable. Para

mejorar la conductividad eléctrica del agua es posible utilizar una base fuerte para disponer de iones H^+ en solución, (DENER, 2017, p. 21; RUSSELL, 1929).

Cuando el volumen del electrolito es demasiado pequeño, las concentraciones de los reactivos cambian rápidamente durante el funcionamiento. Según afirma Denner (2017) las soluciones acuosas de KOH son preferidas por NaOH debido a su alta conductividad específica (*figura 5*) y la máxima conductividad de las soluciones acuosas de KOH se obtiene a aproximadamente 30% en peso.

Debe tenerse en cuenta que la cantidad de electrolito tiene que ser ajustada de forma continua a las pérdidas de compensación por equilibrio a través de gases producto (típicamente 1 mg KOH por $Nm^3 H^2$). Como también los intervalos de tiempo referente a mantención debido a la acumulación de impurezas procedentes del agua, componentes electrolíticos (corrosión de partes metálicas, degradación de los electrodos y separadores que ensucia el electrolito) y pérdidas óhmicas del sistema cuando crece la distancia entre los electrodos.

Figura 5 – Comparación de Bases Fuertes y relación Conductividad -Temperatura



Fuente: Beltran;Carmen, (2017, p.57); Gilliam, Graydon, Kirk, & S., (2007), See & White, (1997)

3.3.1.3. Ley de Ohm

El potencial óhmico, es el potencial necesario para que pase corriente eléctrica a través de la celda electroquímica generando una resistencia que depende

del área de los electrodos, la distancia entre ellos y la resistividad del electrolito entre otras variables. Esta se rige por la Ley de Ohm según la siguiente fórmula, (ec.25):

$$E_{ohm} = R \cdot i \quad (25)$$

Donde:

R = Es la resistencia óhmica de la celda

i = La intensidad eléctrica que fluye por la celda

E_{ohm} = Es el potencial en volts

➤ Resistencias

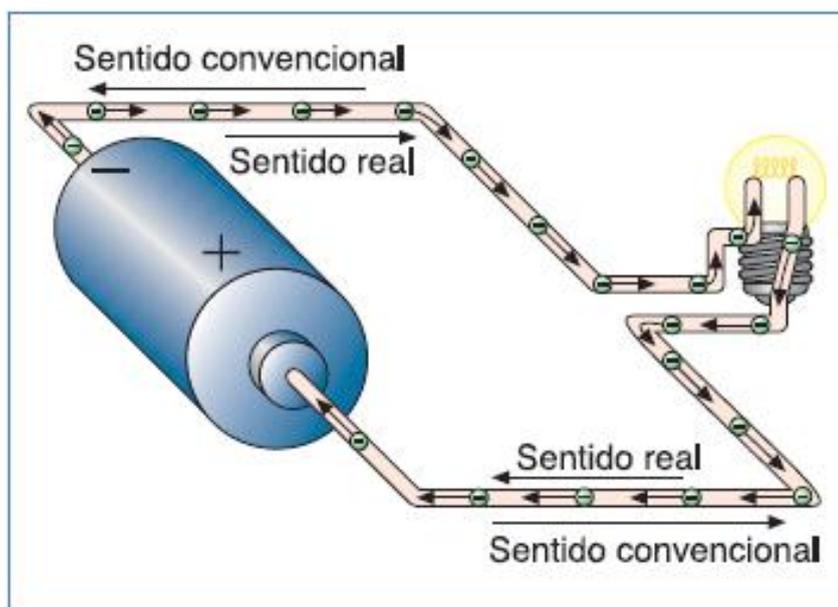
Según afirma Knob, (2013), para que la reacción electrolítica del agua pueda suceder, algunas barreras deben ser superadas por la fuente de energía. Estas barreras incluyen la resistencia eléctrica del circuito, las energías de activación de las reacciones electroquímicas que ocurren sobre la superficie de los electrodos, la disponibilidad de las superficies del electrodo por causa de las burbujas del gas y las resistencias a las transferencias iónicas en el interior de la solución del electrolito.

3.3.1.4. Sentido de la Corriente Eléctrica

La corriente eléctrica es el movimiento de electrones por un conductor, que saldrán del polo negativo (–) del generador y se dirigirán, por el exterior, hacia el polo positivo (+), circulando en sentido contrario a las líneas del campo eléctrico. (RODRIGUEZ, 2016. p. 4).

Complementariamente, el sentido de la corriente eléctrica considera dos formas para mencionarla, sentido real y sentido convencional (*figura 6*). En sentido real, el flujo de electrones comienza desde el cátodo y termina en el ánodo y cuando se habla de sentido convencional, se está considerando que el flujo de electrones parte desde el ánodo hacia el cátodo.

Figura 6 – Sentido Real y Sentido Convencional de los Electrones



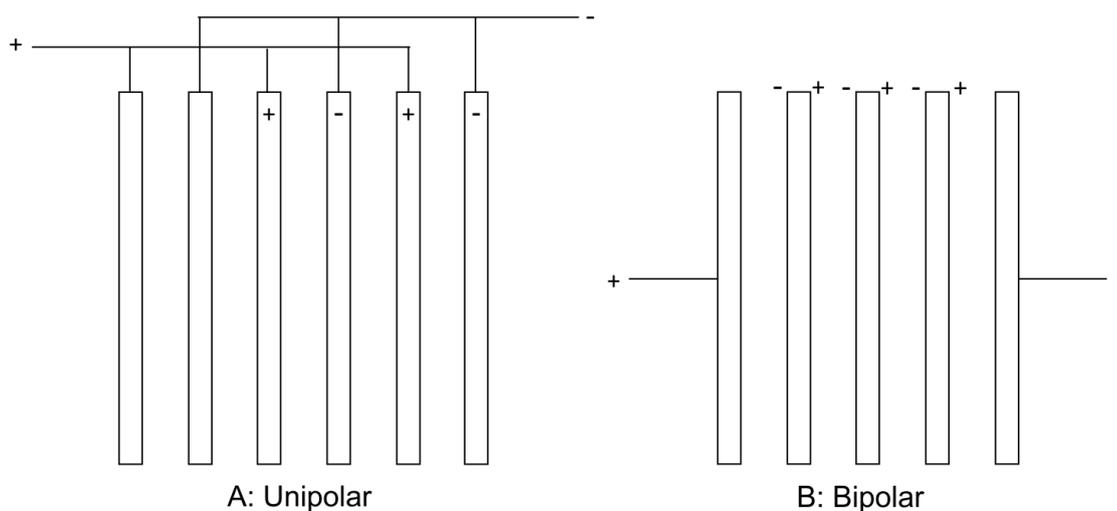
Fuente: Rodriguez, (2016, p.4)

3.4. Generador de Hidrógeno de Celda Electrolítica

Según afirma Rivera (2015), la celda electrolítica transforma una corriente eléctrica en una reacción química de óxido-reducción que no tiene lugar de modo espontáneo. En muchas de estas reacciones se descompone o se forma una sustancia química a través de un proceso denominado electrólisis. Antes esto, las celdas electrolíticas pueden diferenciar entre húmedas o secas. La diferencia entre ambas, es que en las celdas secas, el electrolito fluye por el interior de la celda mientras que en las celdas húmedas sus electrodos están totalmente sumergidos en la solución electrolítica.

Ahora bien, dentro de ese concepto, los electrodos pueden conectarse de forma unipolar o bipolar. Ósea, unipolar: es cuando una serie de electrodos positivos se conectan a su respectivo terminal y la otra serie a su respectivo terminal negativo. Bipolar: es cuando solo un electrodo negativo se conecta a su terminal y un electrodo positivo a su respectivo terminal, siempre y cuando de por medio existan placas neutras. (Figura 7)

Figura 7 – Celda Electrolytica de Tipo Unipolar y Bipolar



Fuente: wikipedia

3.4.1. Fenómenos Físico - Químico en una Celda

Según Zoski (2007), el proceso electrolítico puede considerarse como un conjunto de equilibrios involucrados en la migración del reactivo al electrodo, la reacción en el electrodo y la migración del producto desde la superficie del electrodo hacia la mayor parte de la solución. Estos problemas, desde el punto de vista de la cinética, es posible ser visualizada en cuatro fases, tomando en cuenta la velocidad de reacción y la corriente en los electrodos:

- Transferencia de masa a la superficie del electrodo;
- Cinética de la transferencia de electrones;
- Reacciones precedentes y subsiguientes;
- Reacciones de superficie (adsorción).

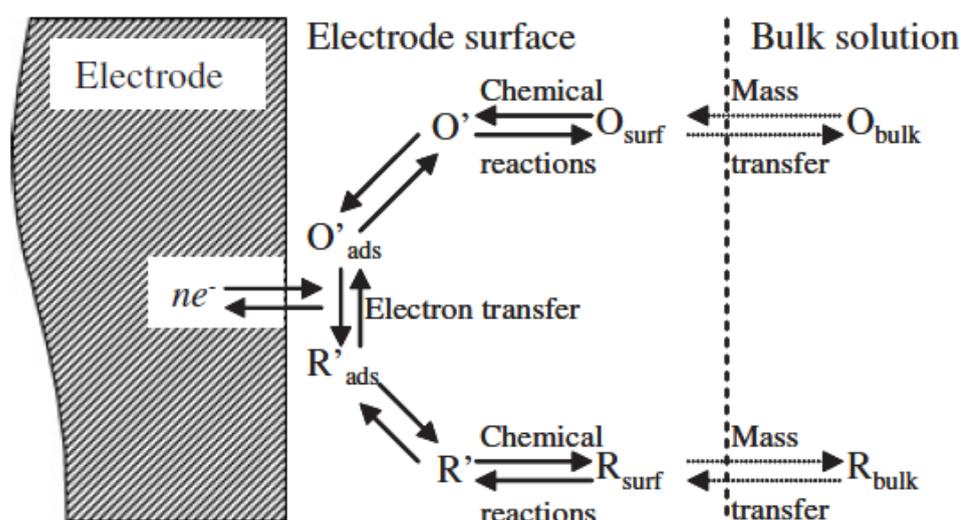
También, las especies como iones o moléculas pueden ser transportadas por medio de movimientos hacia y desde los electrodos y al seno de la disolución, como se explica a continuación:

- Difusión: por diferencia de concentraciones entre dos regiones de una solución.
- Migración: los iones se mueven bajo la influencia de un campo eléctrico. Causa principal del movimiento iónico. Son atraídos y repulsados por fuerzas eléctricas.
- Convección: por agitación u otro método hidrodinámico (diferencias de densidad, temperatura, etc.).

Sin embargo, Pi Amorós (2010), explica que esas reacciones pueden suceder a diferentes velocidades, siendo la de menor velocidad la etapa controlante del proceso global. Cuando la etapa controlante es la transferencia de masas, se dice que hay una polarización por concentración, si es alguna reacción química intermedia, dará lugar a una reacción de polarización.

Por otra parte, si el paso limitante es de tipo físico, los posibles fenómenos que podrían estar presentes conducirán a una polarización por adsorción, desorción o cristalización. Y si es la propia reacción electroquímica, entonces el fenómeno dará lugar a una polarización por transferencia de carga, como bien es ilustrado en la *figura 8*, donde quedan de manifiesto las diferentes etapas del proceso electrolítico que se encuentra en estudio.

Figura 8 – Etapas de un Proceso Electrolítico



Fuente: Zoski (2007, p.12)

3.4.1.1. Polarización de Electroodos

Como menciona Pi Amorós (2010), un electrodo polarizado es aquél que acepta un potencial eléctrico impuesto externamente sin que se aprecie cambio alguno en la velocidad de la reacción electrolítica. En consecuencia, no hay cambio en la intensidad de corriente (o muy pequeño) y la velocidad del proceso no cambia.

Atendiendo a lo anterior y prescindiendo de posibles reacciones químicas y procesos físicos. Son consideradas tres situaciones que pueden afectar las velocidades de transferencia de masas y de intercambio de electrones. Estas son:

- a) Transferencia de masa y de carga a velocidades rápidas
- b) Transferencia de masa rápida y transferencia de carga lenta
- c) Transferencia de masa y de carga a velocidades lentas

Estas situaciones:

a) los electrodos no presentan polarización alguna, solo se tienen en cuenta fenómenos termodinámicos. En el caso b) se considera la polarización por transferencia de carga. La concentración de las especies electrolíticas en el seno de la disolución y en las proximidades de los electrodos no varía, es decir, la velocidad de transferencia de iones y cationes es elevada. En el caso c) ambos tipos de polarización afectan al potencial de electrodo. Las hipótesis contempladas en la situación a) sólo se darán en condiciones experimentales controladas. Generalmente los procesos electroquímicos se realizan bajo las suposiciones b) y c). La situación b) podrá emplearse en los casos en que la concentración no presente variaciones importantes. Por ejemplo, en sistemas abiertos o la electrólisis de una gran cantidad de agua. La situación c) principalmente se dará en sistemas cerrados en los que a medida que el proceso electrolítico transcurre las concentraciones de las especies involucradas variarán notablemente y también en caso que la concentración de las especies sea baja. (PI AMORÓS, 2010, p. 62-63).

Así mismo Pi Amorós (2010) comenta que a efectos prácticos el potencial termodinámico no será suficiente para garantizar la electrólisis. El flujo eléctrico aplicado debe vencer la propia resistencia eléctrica de la celda y fenómenos

polarizantes que aparecen en los electrodos y que dificultan la transformación electroquímica. De la misma manera, es considerable tener en cuenta la resistencia de reacción, que es producida por aplicación de un sobrepotencial, requeridos para superar la energía de activación de reacción y de la actividad superficial de los electrodos de hidrógeno y oxígeno como es sugerido por Zoski (2007), (ec.27).

Primeramente, para calcular el mínimo potencial requerido por la celda se requiere conocer los potenciales estándares de reacción para cada electrodo (ec.26).

$$E_{cel}^{\circ} = E_{Cátodo}^{\circ} - E_{Ánodo}^{\circ} \quad (26)$$

Donde:

E_{cel}° = Es el potencial termodinámico de la celda.

$E_{Cátodo}^{\circ}$ = Es el potencial estándar del cátodo.

$E_{Ánodo}^{\circ}$ = Es el potencial estándar del ánodo.

Luego, para el cálculo del sobrepotencial mencionado por Zoski (2007).

$$\eta = E - E_{eq} \quad (27)$$

Donde:

η = Es el sobre potencial del electrodo,

E = Es el potencial aplicado

E_{eq} = Es el potencial de equilibrio

Otras variables como el potencial óhmico de la celda son producido de acuerdo al flujo de carga suministrado según (ec.28) y η sería el sobre potencial utilizado para auxiliar el proceso.

$$E_{apl} = -E_{cel}^o - E_{ohm} - \eta \quad (28)$$

Donde:

E_{cel}^o = Potencial termodinámico de la celda

E_{ohm} = Potencial óhmico de la celda

η = Sobre potencial adicional.

➤ Polarización por Concentración y por Transferencia de Carga

El sobrevoltaje es ocasionado por polarizaciones de concentración y por las transferencias de carga ocurridas en el ánodo y cátodo de la celda electrolítica. Como afirma Pi Amorós (2010), sin considerar otros tipos de polarización, este fenómeno es detectado cuando la velocidad de transferencia de masa de las especies de reactivo o de producto no es suficientemente rápida para conservar la corriente, siendo necesario un voltaje mayor al teórico para mantener la corriente eléctrica deseada. De esta manera, el proceso puede ser visto en base a la siguiente fórmula (ec.29).

$$E_{real} < E_{teo} = -E_{cel}^o - E_{ohm} \quad (29)$$

Donde:

E_{real} = Potencial Real

E_{teo} = Potencial Teórico

E_{cel}^o = Potencial Estándar de la Celda

E_{ohm} = Potencial Óhmico

Los principales problemas que generan las polarizaciones por concentración y por transferencia de carga pueden depender de:

➤ Polarización por Concentración

- Depende de la concentración de los reactantes, es decir, puede ocurrir a concentraciones bajas como a concentraciones altas.
- Depende de la agitación mecánica, o sea, el problema disminuye cuando las soluciones son bien agitadas.
- Dependiendo del área del electrodo, este problema podría disminuir a medida que la superficie del electrodo aumenta.

➤ Polarización por Transferencia de Carga

- Aumenta con la densidad de corriente (A/cm^2).
- Normalmente, disminuye al aumentar la temperatura.
- Depende de la composición química del electrodo
- Es acusada cuando se producen gases y despreciable cuando hay depositación o cambios de oxidación de un ion.
- No puede predecirse exactamente ya que depende de variables incontrolables. Depende de las condiciones experimentales. Es un dato que debe obtenerse empíricamente.

3.4.2. Tensión mínima para la Electrólisis del Agua

Según menciona Vermeersch (2018), desde el punto de vista electroquímico, de acuerdo al primer principio de la termodinámica, la cantidad de electricidad “ $n \cdot F \cdot E$ ” necesaria para dividir 1 mol de agua en base a la reacción (ec.6) es igual a la energía libre de Gibbs ΔG_d , pudiendo ser calculada de acuerdo a la siguiente ecuación, (ec.30).

$$\Delta G_d - n \cdot F \cdot E = 0 \quad (30)$$

Donde:

$$\Delta G_d > 0$$

$n = n^\circ$ Electrones Intercambiados (reacción)

F = Constante de Faraday

E = Potencial Estándar de la Pila

Según afirma Vermeersch (2018) que dada la dependencia existente entre la energía libre de Gibbs y la entalpía (ec.31), se definen dos diferentes tensiones eléctricas para caracterizar las electrólisis del agua.

Y como afirma Beltran y Carmen (2018), en función a la *figura 2*, se requieren ΔG_d ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) de electricidad y $T\cdot\Delta S_d$ ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) de calor para dividir 1 mol de agua. Estas ecuaciones se encuentran formuladas como (ec.33) y (ec.37), en la cual se asume presión normal y temperatura constante (T,P).

$$\Delta G_d(T, P) = \Delta H_d(T, P) - T\Delta S_d(T, P) > 0 \quad (31)$$

ΔH_d (T, P), ΔS_d (T, P) y ΔG_d (T, P) son, respectivamente, el cambio de entalpía (en $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$), el cambio de entropía (en $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) y el cambio de energía libre de Gibbs (en $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) de la reacción [ec.5] la que ocurre a [una] temperatura T y presión P [dada]. (BELTRAN; CARMEN, 2017, p. 47)

➤ Tensión de electrólisis de energía libre $E^\circ(T,P)$ en voltios se define como:

$$E^\circ(T, P) = \frac{\Delta G_d^\circ(T, P)}{n \cdot F} \quad (32)$$

Según comenta Beltran y Carmen (2018) en condiciones estándar de temperatura y presión (25°C y 1 atm) es posible calcular el potencial reversible de la electrólisis considerando la energía libre de Gibbs en función a la fórmula siguiente (ec.33).

Sustituyendo el valor de la energía libre en función a la disociación del agua, quedaría:

$$\Delta G_d^\circ = +237,22 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$F = 96500 \text{ C (Cte. Faraday)}$$

$$n = 2 \text{ (electrones envuelto en la reacción)}$$

$$E^\circ(T, P) = \frac{\Delta G_d^\circ(T, P)}{n \cdot F} = 1,2293 \text{ V} \quad (33)$$

La segunda ley de la termodinámica, menciona que el calor producido dentro de un sistema de tipo abierto o cerrado se difunden en una sola dirección, es decir, de mayor a menor energía. Si el calor externo es mayor que el interno entonces se genera un calor reversible que imposibilita la electrólisis. Aunque la temperatura interna aumente considerablemente, la energía libre de Gibbs en tanto, no será suficiente para producir la descomposición del agua (*figura 2*). Esto hace con que la tensión aplicada en los electrodos (Volt) deba ser superior al calor de reversibilidad. En base a la ecuación siguiente, (ec.34) se obtiene:

$$\Delta G = \Delta H - Q_{rev} \quad (34)$$

Donde:

ΔG = Variación Energía libre de Gibbs

ΔH = Variación de entalpía (J/mol);

ΔQ_{rev} = Cantidad de calor reversible (J/mol).

Siendo ΔQ_{rev} , (ec.35):

$$Q_{rev} = T \cdot \Delta S \quad (35)$$

Donde:

T = Temperatura

ΔS = Variación de la Entropía

Tensión de entalpía o termo-neutral $V^\circ(T,P)$ en voltios (ec.36) se define como:

$$V^\circ(T, P) = \frac{\Delta H_d^\circ(T,P)}{n \cdot F} \quad (36)$$

Sustituyendo el valor de la entalpía de disociación del agua, quedaría (ec.37):

$$\Delta H_d^\circ = + 285,840 \text{ KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$F = 96500 \text{ C (Cte. Faraday)}$$

$$n = 2 \text{ (electrones envuelto en la reacción)}$$

$$V^0(T, P) = \frac{\Delta H_d^\circ(T,P)}{n \cdot F} = 1,4813 \text{ V} \quad (37)$$

Para calcular la tensión eléctrica en función de la entalpía, Beltran y Carmen (2018) afirman que el calor generado por efecto Joule termina de forma irreversible, esto indica que el trabajo realizado en el sistema interno no es anulado. En estas condiciones la célula opera en estado isotérmico y la tensión de electrólisis es llamada de potencial termoneutro. Las tensiones anteriormente calculadas sirven para determinar rangos de operación en el proceso de electrólisis. Si los bornes de la celda poseen una diferencia de potencial (U):

- Menor que E° , entonces la electrólisis no se produce.
- Mayor que E° y menor que V° , la reacción va a comenzar, pero no va a haber la suficiente energía eléctrica para mantener la termicidad del sistema. La electrólisis ocurrirá cuando sea cedido calor al proceso (proceso endotérmico)
- Mayor que V° , entonces se producirá la reacción y la potencia eléctrica va a ser capaz de mantener la temperatura del sistema y el calor es transferido al medio ambiente (proceso exotérmico).

3.4.2.1. Ecuación de Nernst

La ecuación de Nernst permite conocer el potencial cuando las condiciones reales son diferentes, es decir, corrige el potencial cuando las condiciones de temperatura, presión y concentración son distintas al estándar, (ec.38).

$$E = E^{\circ} - \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln Q \quad (38)$$

Donde:

R = Constante Universal de los Gases;

T = Temperatura Absoluta;

n = Número de Electrones Transferidos;

F = Constante de Faraday;

E° = Potencial Estándar de la Celda;

E = Potencial Real

Y, Q que depende de las concentraciones y presiones parciales de iones y gases involucrados y de los coeficientes estequiométricos de las reacciones redox. (PI AMORÓS, 2010, p.59). Y tendrían la forma de: $a \cdot A + b \cdot B \rightarrow c \cdot C + d \cdot D$, quedando expresada de la siguiente manera, (ec.39).

$$Q = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (39)$$

Donde, $[A]$ y $[B]$ indican la presión parcial o la concentración molar de los reactivos y $[C]$ y $[D]$ corresponden a los productos. Al ser una reacción, las concentraciones cambiarán a medida que avanza la misma, por lo que Q , tenderá hacia el valor de la constante de equilibrio, K . (ROMERO, 2018, p. 16)

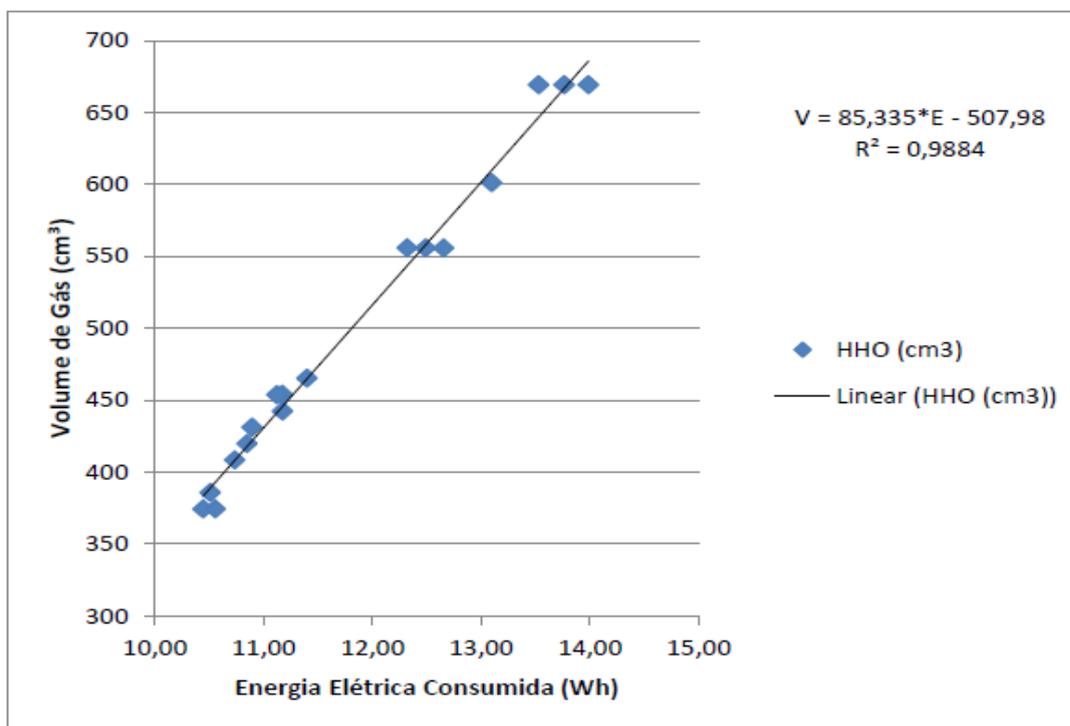
Finalmente, reemplazando la constante de Faraday (F), la constante de los gases ideales (R), para $T=298$ K, en la fórmula anterior (ec.38), resulta en: (ec.40).

$$E = E^{\circ} - \frac{0,059}{\eta} \log(Q) \quad (40)$$

3.4.2.2. Producción de HHO Catalizado con NaOH

Según pruebas realizadas por Aydin, Uludamar y Yilmaz (2010) la disolución de sales catalizadoras como NaOH, NaCl y KOH que sean superiores al 1% en masa, la corriente eléctrica suministrada por la fuente de alimentación aumentaría drásticamente debido a la reducción excesiva de la resistencia eléctrica entre los electrodos. Encontrando al NaOH como el mejor catalizador por generar un mayor volumen de gas HHO, con un menor costo de producción. En base a lo anterior, Silveira (2012) utiliza una concentración en peso de 0,5% de NaOH, encontrando la siguiente tendencia gráfica, *figura 9*.

Figura 9 – Consumo de Energía Eléctrica vs HHO Generado (NaOH)

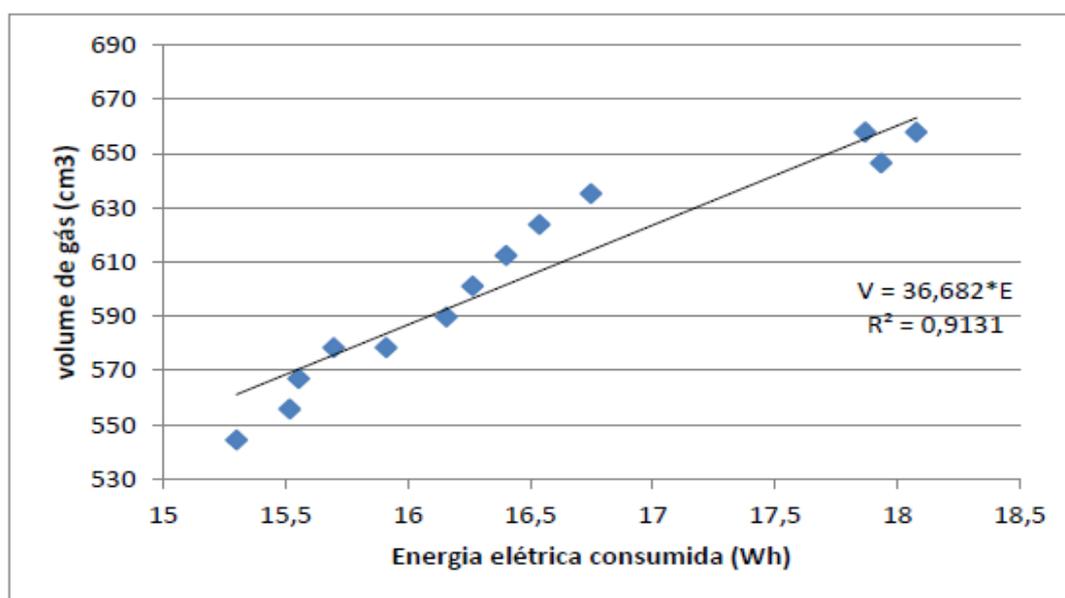


Fuente: Silveira (2012, p. 20)

3.4.2.3. Producción de HHO Catalizado con KOH

De la misma forma fue mencionado en el ítem 3.4.2.2 esta vez Silveira (2012) utiliza una concentración en peso de 1,2% KOH, con el propósito de encontrar un volumen de gas similar a NaOH, pero a un mayor costo de producción (Wh) y a un mayor volumen de masa. (Figura 10)

Figura 10 – Consumo de Energía Eléctrica vs HHO Generado (KOH)



Fuente: Silveira (2012, p. 20)

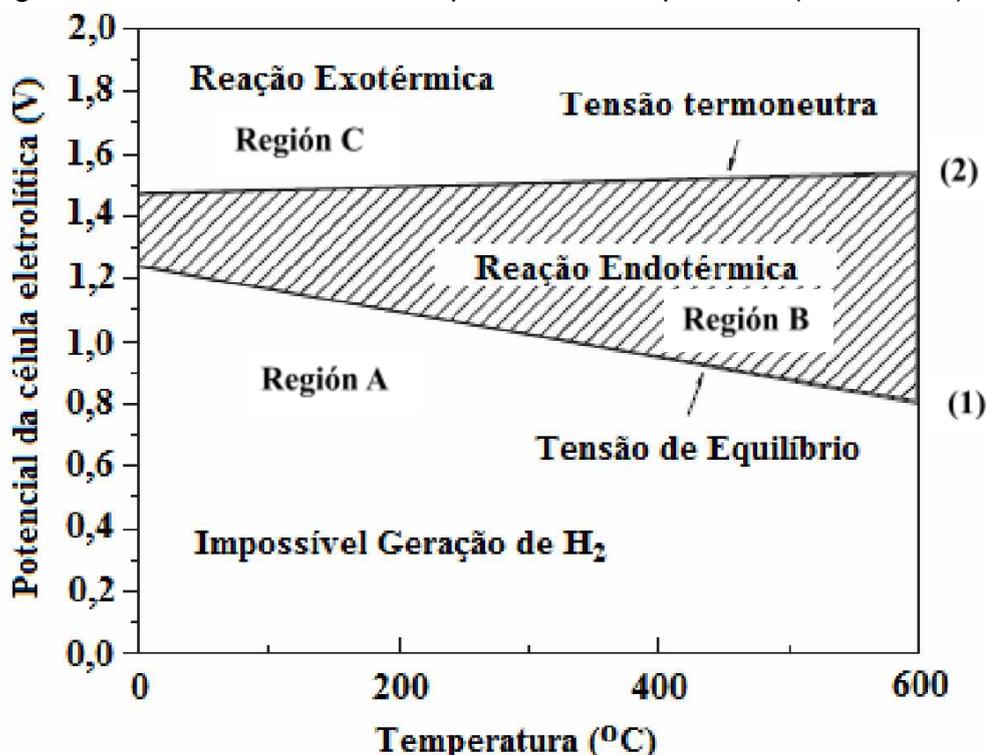
3.4.2.4. Eficiencia, Tensión y Consumo de Energía en la Electrólisis del Agua

La diferencia entre la tensión de funcionamiento de la celda electrolítica y la tensión mínima se conoce como sobretensión de la celda.

Según Souza (1998), la mayoría de los electrolizadores operan en la región C, según la *figura 11*, donde se aplica un voltaje por encima del valor límite inferior. Por debajo del voltaje de equilibrio no es posible que ocurra la electrólisis, entre el voltaje de equilibrio y el voltaje termoneutral la electrólisis es endotérmica y por encima del voltaje termoneutral, exotérmica. El voltaje de equilibrio disminuye al aumentar la

temperatura, mientras que el voltaje termoneutral presenta un pequeño aumento con la temperatura (DE FATIMA, 2016, P.12; ZENG; ZHANG, 2010).

Figura 11 – Curvas de Tensión Aplicada vs Temperatura (Electrólisis)



Fuente: Adaptado de, Souza (1998, p. 85) y Zeng e Zhang (2010). Región A: Imposible generar H₂; Región B: Generación de H₂ muy baja; Región C: Generación de H₂; Curva 1: Voltaje Reversible; Curva 2: generación de H₂, determinada termodinámicamente.

La eficiencia energética de un electrolizador es definida como la relación entre el poder calorífico superior del producto formado que en el caso es el hidrógeno y el calor equivalente a la energía eléctrica introducida en el electrolizador [en condiciones normales] (SOUZA, 1998, p. 87). Y el voltaje operacional del electrolizador corresponde al poder calorífico superior del hidrógeno que puede ser determinado en función de la temperatura. En términos simples, cuanto mayor es la sobretensión de celda, menor es su eficiencia y mayor su consumo de energía, como es indicado en la *tabla 6*.

Tabla 6 – Curvas de Tensión Aplicada versus Temperatura en una Electrólisis

Eficiência (%)	Tensão de Operação (V)	Consumo de Energia (kWh/Nm ³)
100	1,481	3,544
96	1,543	3,692
92	1,610	3,852
88	1,683	4,027
84	1,763	4,219
80	1,839	4,400
78	1,899	4,544
76	1,949	4,663
74	2,001	4,789
72	2,057	4,922
70	2,116	5,063

Fuente: Souza, (1998, p.88)

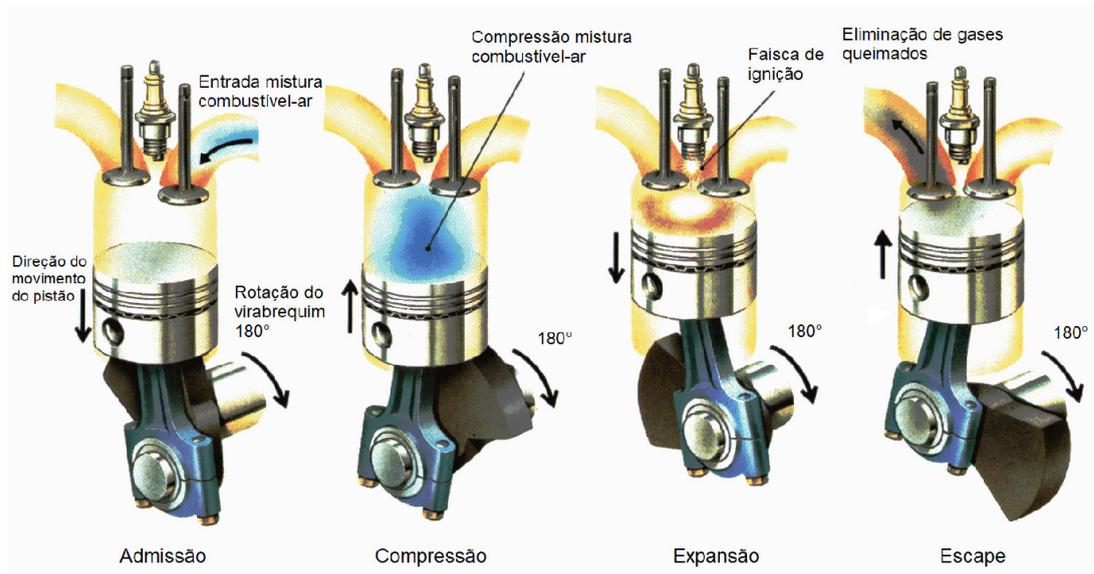
3.5. Análisis de un Motor a Combustión Interna

En 1876, el ingeniero Nikolaus August Otto construyó un motor y colocó en práctica la secuencia idealizada por Beau de Rochas. Desde entonces, esta secuencia constituida de 4 tiempos (*figura 12* y *figura 13*), es conocida como ciclo Otto. (DE OLIVEIRA, 2015, p. 6) Estas son:

- Aspiración: con la válvula de aspiración abierta, la mezcla aire-combustible es aspirada por el cilindro del motor;
- Compresión: con ambas válvulas cerradas (entrada y salida), la presión y la temperatura de la mezcla se incrementan elevando el pistón;
- Explosión: incluso con ambas válvulas cerradas, la mezcla de combustible se enciende a través de una chispa emitida por la bujía, los gases, al expandirse, empujan el pistón hacia abajo.

- Descarga: Con la válvula de descarga abierta, los gases resultantes de la combustión son expulsados del cilindro.

Figura 12 – Motor de Cuatro Tiempos (Ciclo Otto)



Fuente: <https://shaikmoin.files.wordpress.com/2013/02/four-stroke-cycle.png>

Figura 13 – Secuencia del Pistón

	0°	180°	360°	540°	720°	α
1	Expansão	Escape	Admissão	Compressão		
2	Escape	Admissão	Compressão	Expansão		
3	Compressão	Expansão	Escape	Admissão		
4	Admissão	Compressão	Expansão	Escape		

Fuente: Brunetti (2012, p. 31)

[A causa de una combustión incompleta, es producida la liberación de] diferentes contaminantes al aire como monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, partículas ultrafinas y compuestos orgánicos volátiles que pueden tener efectos

negativos no solo en el medio ambiente, sino también en la salud humana. (PEREIRA *et al*, 2018, p. 2)

3.5.1. Características del Vehículo Chevrolet Classic Life 2009

Para la implementación del generador de hidrógeno, se utiliza un motor Chevrolet VHCE, cuyos datos técnicos y características se dan a conocer en la *tabla 7*.

Tabla 7 - Datos Técnicos Motor VHCE

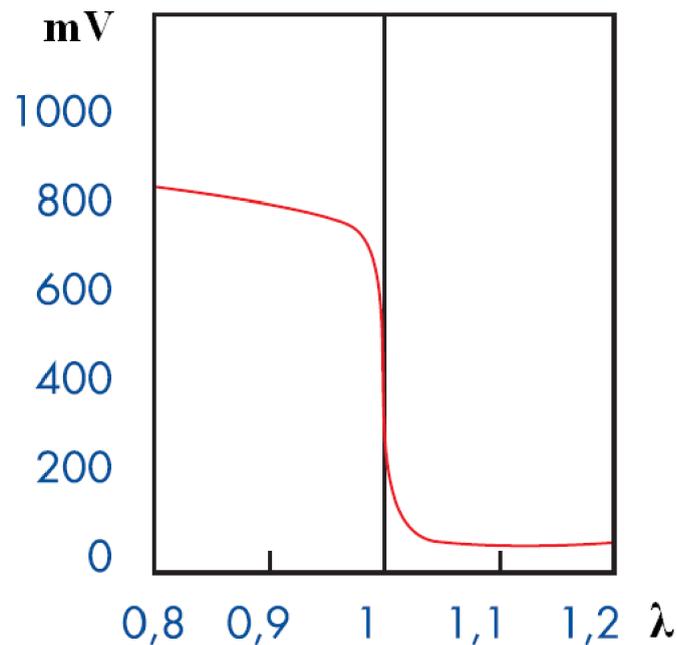
Fabricante	Chevrolet
Modelo	VHCE (Very High Compression Ecologico)
Año de Fabricación	2009
Cilindraje del Motor	999 cm ³
Nro. Cilindros/Válvulas	4 - 8
Alternador	60A sin A/C
Potencia Máxima	77 cv (Gasolina); 78 cv (Alcohol). A 6400 rpm
Tipo de Motor	Flexpower
Torque Máximo	9,5 kgfm (Gasolina); 9,7 kgfm (Alcohol). A 5200 rpm
Tasa de Compresión	12,6:1
Inyección de Combustible	Electrónica
Capacidad del Tanque	54L
Ubicación del Motor	Delantero

Fuente: www.chevrolet.com.br

3.5.2. Relaciones estequiométricas A/F en el motor

Según comenta Osório, Moreira y Araujo (2015), para los motores de ciclo Otto, la condición de máxima eficiencia con mínimo consumo y emisión de contaminantes ocurre para una mezcla estequiométrica o cercana a ella ($\lambda = 1$) según es ilustrado en la *figura 14*.

Figura 14 – Parámetros Sonda Lambda



Fuente: Thompson (2009) Apud De Jesus; Da Silva (2010, p. 22)

Cuando una mezcla de aire y combustible se encuentran dentro del cilindro con menos aire y más combustible, forman una mezcla rica ($\lambda < 1$), es decir una parte del combustible no es quemada y la combustión se torna incompleta aumentando los niveles de emisión de contaminantes y el consumo de combustible.

En el caso opuesto, o sea, cuando una mezcla posee menos combustible que aire es caracterizada como una mezcla pobre ($\lambda > 1$). Sin embargo, la combustión también se torna ineficiente con un aumento de niveles de emisiones contaminantes.

Sin embargo, la fórmula utilizada para obtener el valor de lambda se expresa en la siguiente ecuación, (ec.41).

$$\lambda = \frac{\left[\frac{A}{F} \right]_{at}}{\left[\frac{A}{F} \right]_{st}} \quad (41)$$

Donde:

A = Aire atmosférico

F = Combustible admitido por el motor;

at = Es la relación real de masa de aire y combustible admitida por el motor kg / kg;

st = Es la relación estequiométrica ideal de masa de aire y combustible kg / kg;

La *tabla 8* muestra la relación aire-combustible ideal para algunos combustibles. Los valores presentados serán utilizados como referencia para este estudio, sin embargo, es de saber que la composición de la gasolina es variable, así como la cantidad de agua en el etanol.

Tabla 8 – Factor Lambda ideal para Algunos Combustibles

Combustível	Relação A/F
Gasolina Pura (E0)	14,7:1
Etanol (E100)	9,0:1
Gasolina Comum (E22)	13:2,1
Diesel	15,2:1
Metanol	6,4:1
Metano (CH ₄)	17,2:1
Hidrogênio	34,0:1

Fuente: Antunes;Penteado;Gibin (2017, p. 29)

Según confirma Sánchez y Bizzo (2010), el aire atmosférico el cual es utilizado para la mezcla necesaria para favorecer la combustión de cualquier combustible, está compuesto mayoritariamente por oxígeno y nitrógeno, (*tabla 9*). Y otros elementos de menor concentración que al igual que el nitrógeno, no reaccionan en el proceso dentro de la cámara de combustión del motor.

Tabla 9 – Composición del Aire Atmosférico

Elemento	Em massa	Em volume
Oxigênio	23,2 %	21 %
Nitrogênio	76,8 %	79 %

Fuente: Sánchez;Bizzo (2010, p. 3)

3.5.2.1. Sistema de Inyección Electrónica

Según menciona Brunetti (2015) la determinación de la mezcla aire-combustible se realiza dimensionando el motor y el sistema de potencia por un controlador electrónico inserto en el vehículo. Este controlador tiene la función de entregar a los dispositivos, la señal de mezcla exacta que se necesita para poder inyectar la cantidad estequiométrica de combustible y lograr la combustión ideal según la posición del acelerador.

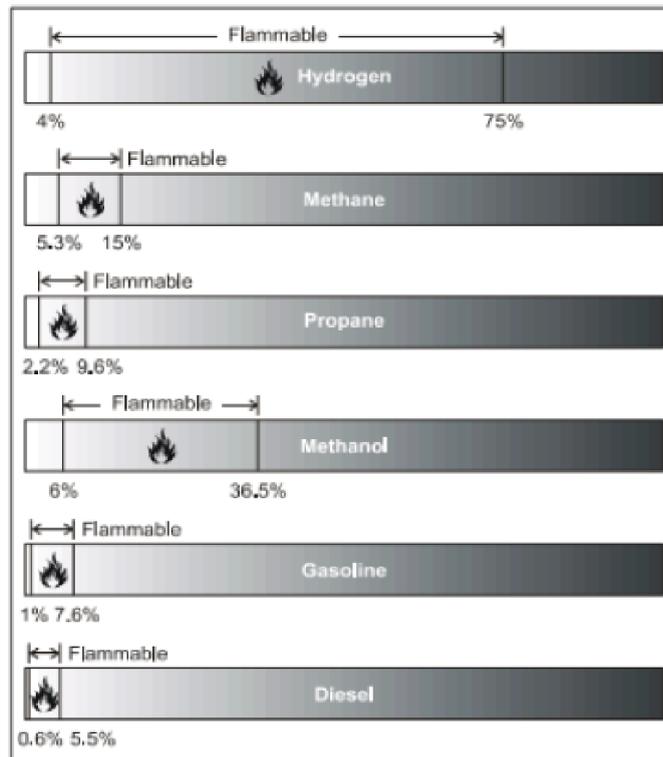
3.5.2.2. Extensión de Inflamabilidad

. [La inflamabilidad de] una mezcla estequiométrica ocurre cuando las moléculas de oxígeno e hidrógeno están presentes en la proporción exacta y necesaria para completar la reacción de combustión. (BARBOSA; MACHADO, 2016, p. 3)

Según comenta Barbosa y Machado (2016), el grado de inflamabilidad de un gas se define en términos de su límite inferior y superior de inflamabilidad, (*figura 15*). El límite inferior de inflamabilidad de un gas es la concentración más baja de un gas que puede sostener la propia propagación cuando esta se enciende. Por debajo del límite mínimo de inflamabilidad no hay combustible que sustente la combustión

Por encima del límite superior de inflamabilidad, no hay oxígeno para sustentar la combustión. Sin embargo, entre estos dos límites está el grado de inflamabilidad en el que el aire + el combustible, está en la cantidad adecuada para ser quemada cuando es encendida. A continuación, se ilustran los tramos de inflamabilidad de algunos combustibles cuando se está en condiciones normales, (*figura 15*).

Figura 15 – Extensión de la Inflamabilidad de Combustibles (Cond. Normales)



Fuente: Barbosa y Machado (2016, p. 4)

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Este apartado tiene por objeto mostrar la forma de cómo fue abordado este proyecto, envolviendo construcción y aplicación de una celda electrolítica para generar gas hidrógeno y gas oxígeno para un vehículo de combustión interna. Para visualizar los diferentes alcances de este ítem, fue necesario dividir su contenido de la siguiente manera:

- Recopilación de documentos técnicos, como revisión de modelos de generadores de HHO al detalle, para la extracción de ideas y confección final de un modelo estándar, cuidando en lo posible, un formato no invasivo.
- Materiales y herramientas utilizadas para la confección y el montaje de la celda.
- En esta etapa metodológica, son descritas la confección, ensamblado como también la instalación de la celda en el vehículo. Además, de la realización de pruebas eléctricas, eficiencia de la celda.

4.1. Antecedentes Técnicos para la Construcción de la Celda

La base del diseño y construcción de la celda electrolítica, fue establecido en función a una revisión documental con un énfasis técnico al tamaño, forma y material del dispositivo a construir. Este análisis, fue fundamental para conseguir imitar una idea de modelo estándar, funcional y dentro de las posibilidades económicas.

Ya en función de la *tabla 10*, se enlistan 7 documentos utilizados para este propósito y de una manera organizada se enumeran en orden creciente, donde: D_n = es el número de identificación del documento, además del título y año de publicación.

Tabla 10 – Documentos con Información Técnica de Celdas Electrolíticas

ID	Título	Año
D1	Celda Seca Electrolítica para la Obtención de Hidrógeno con Aguas Residuales de la Empresa Muebles León.	2015
D2	Implementación de un Generador de Hidrógeno de Celda Seca en un Vehículo Chevrolet Steem 1,6L.	2014
D3	Diseño y Construcción de Electrolizador de Agua para la Obtención de Oxihidrogeno Como Gas Combustible.	2013
D4	Diseño y Construcción de una Celda de Combustible tipo membrana de Intercambio Protónico	2009
D5	Diseño y Construcción de una Celda Demostrativa para la Producción de Hidrógeno a partir de la Electrólisis del Agua.	2018
D6	Diseño e Instalación de un sistema de Alimentación Gasolina – HHO en el Motor de Combustión Interna del Vehículo Monoplaza Tipo Buggy del Laboratorio de Mecánica del Patio de la ESPE Extensión Latacunga	2015
D7	Diseño y Construcción del Sistema Generador de Hidrógeno para Embarcaciones Pesqueras.	2019

Fuente: Autor

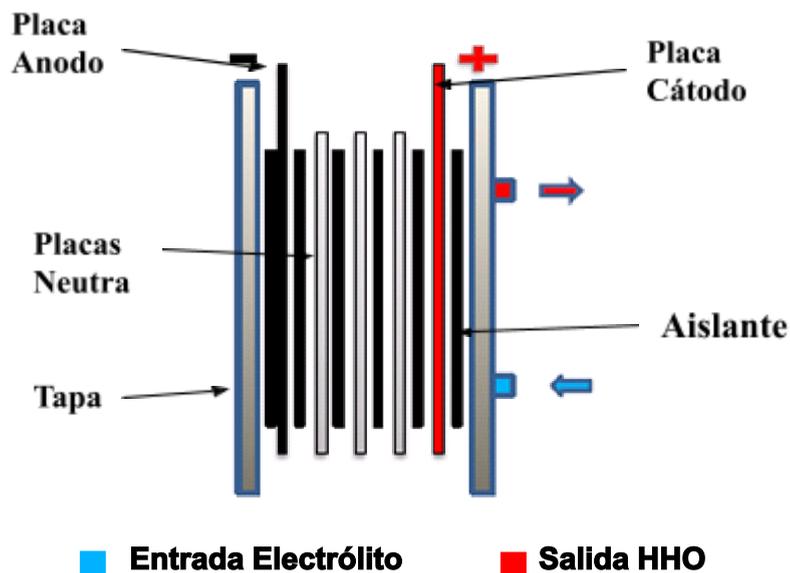
4.1.1. Características para un Modelo Estándar de Celda

Luego de una completa revisión técnica, basado en la pesquisa de la *tabla 10*, para la comprensión de la arquitectura y funcionamiento de estos aparatos generadores de gas HHO, muchos de ellos coinciden en las dimensiones, formato y materiales de los cuales son hechos, y para representarlo estos exhiben una similitud según ilustra la *figura 16*.

Básicamente está compuesto de tres partes consideradas muy importantes. Tapas en sus extremos, entre ellas placas conductoras y aislantes. El funcionamiento es basado en la aplicación de una diferencia de potencial que transporta una carga eléctrica capaz de vencer la resistencia de la celda y del

electrolito usado, para reaccionar y generar una mezcla gaseosa de H_2 y O_2 , en razón de 2:1.

Figura 16 – Representación de una Celda Electrolytica Seca



Fuente: adaptado de <http://tecverde.mex.tl/frameset.php?url=/>

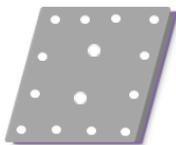
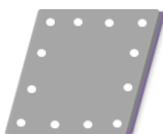
4.2. Materiales y Herramientas

En esta sección son descritos todos los materiales, accesorios, reactivos químicos y herramientas utilizadas para la confección y ensamblaje del sistema generador de gas HHO.

4.2.1. Materiales para la Construcción de la Celda

El diseño final para la construcción de la celda fue inspirado en base a los diferentes modelos de los 7 documentos registrados en la *tabla 10*. Luego a eso es realizado un diseño gráfico y un registro técnico de todos los componentes que la conforman. (*Tabla 11*).

Tabla 11 – Materiales para la construcción de la Celda

ID	Detalle	Cantidad	Dimensiones	Diseño
P1	Placa de Acero Inox. (ánodo-cátodo)	2	Ancho: 12 cm Alto: 12 cm Espesor: 0,1 cm Saliente: 4 cm ²	
P2	Placa de Acero Inox.	5	Ancho: 12 cm Alto: 12 cm Espesor: 0,1 cm	
P3	Tapa de Acrílico Blanco (frente)	1	Ancho: 16 cm Alto: 16 cm Espesor: 1 cm	
P4	Tapa de Acrílico Blanco (trasera)	1	Ancho: 16 cm Alto: 16 cm Espesor: 1 cm	
P5	Aislante HDPE	8	Ancho: 12 cm Alto: 12 cm Espesor: 0,4 cm Corte Interno: 81 cm ²	
P6	Perno cabeza hexagonal, arandelas y tuercas de acero inox.	9	Largo: 6,7 cm Diámetro: 0,6 cm	
P7	Adaptador Rosca Externo	2	Diámetro: Salida: 0,8 cm Rosca: 1,2 cm	

Fuente: Autor

- **Pieza P1:** son los electrodos positivos y negativos (ánodo y cátodo) que constan de dos placas de acero inoxidable AISI 304. Las medidas de los electrodos

son de 12 x 12 cm, cada una con 0,1 cm de espesor, ambas poseen dos perforaciones de 1 cm ubicado en la parte central, siendo la inferior para la entrada del electrolito y la superior para la salida del gas HHO generado. Dos perforaciones de 0,6 cm a la izquierda superior y derecha superior de la placa. Por último, en la pequeña área saliente de 2 x 2 cm, una perforación de 0,6 cm para el paso del tornillo y fijación del cable de corriente.

- **Pieza P2:** son las placas neutras de acero inoxidable AISI 304. Las medidas de los electrodos son de 12 x 12 cm, cada una con 0,1 cm de espesor, ambas poseen dos perforaciones de 1 cm ubicado en la parte central, siendo la inferior que da el paso del electrolito y la superior para la salida del gas HHO generado. Por último, una perforación de 0,6 cm a la izquierda superior de la placa.

- **Pieza P3:** es la tapa frontal de la celda. Es de material acrílico blanco y sus medidas son de 16 x 16 cm, con 1 cm de espesor. Posee dos perforaciones de 1 cm ubicado en la parte central, siendo la inferior para la entrada del electrolito y la superior para la salida del gas HHO generado. Por último, trece perforaciones de 0,6 cm en sus extremos, 9 de ellas para compactar la celda y 4 para fijarla a alguna superficie.

- **Pieza P4:** es la tapa trasera de la celda. De material acrílico blanco y sus medidas son de 16 x 16 cm, con 1 cm de espesor. Posee trece perforaciones de 0,6 cm en sus extremos, 9 de ellas para compactar la celda y 4 para fijarla en alguna superficie.

- **Pieza P5:** es el aislante utilizado entre las placas de acero inoxidable. De material HDPE (High Density Polyethylene), sus medidas son de 12 x 12 cm, con un espesor de 0,4 cm. Adicionalmente es retirado un área interna de 81cm², dejando un marco de 1,5 cm por lado.

- **Pieza P6:** son los tornillos de acero inoxidable, utilizados para compactar desde sus extremos a las tapas de acrílico, placas y aislantes (*Figura 16*). Sus

dimensiones son de 6,7 cm de largo con 0,6 cm de diámetro y están compuestas por tornillo, golilla y tuerca.

- **Pieza P7:** son adaptadores de rosca externa. Uno es utilizado como puente para alimentar a la celda y el otro como puente para la salida del gas HHO generado.

4.2.2. Herramientas para la Construcción de la Celda

Para la construcción de las piezas mencionadas anteriormente, (tapas de acrílico, placas de acero inoxidable y aislantes de HDPE), fueron utilizadas diferentes herramientas e identificadas como H_n: Herramienta número x. Indicado en la *tabla 12*.

Tabla 12 – Herramientas para la Construcción de la Celda

ID	Detalle	Cantidad	Diseño
H1	Sierra Circular Portátil Marca: Makita Modelo: 4100NH3 Potencia:1300W	1	
H2	Taladro Marca: Black Decker Modelo: D555-B2 Potencia: 550W	1	
H3	Brocas Nº10mm Nº6mm	2	

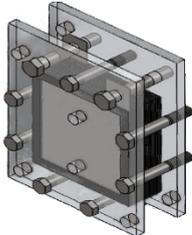
H4	Tijera Hojalatera Marca: Ingco	1	
H5	Terraaja 10mm	1	

Fuente: Autor

4.2.3. Accesorios del Sistema HHO

A continuación, son detallados los diferentes accesorios (A_n) utilizados para ahora montar el sistema generador de gas HHO, (tabla 13).

Tabla 13 – Accesorios del Sistema Generador de HHO

ID	Ítem	Cantidad	Detalle	Imagen
A1	Generador de HHO	1	Placas: 7 Semi Celdas: 6 cm Cámaras: 8	
A2	Reservorio del Electrolito	1	Capacidad: 1,6L	
A3	Cable Eléctrico	1	Capacidad: 28A, Diámetro: 0,4 cm Largo: 200 cm rojo/negro	

A4	Manguera de Combustible	1	Diámetro ex: 0,8 cm Diámetro in: 0,7 cm Largura: 300 cm	
A5	Terminales	9	Terminal Redondo: 5 Terminal hembra: 4	
A6	Multímetro DT-830D	1	Altura: 12cm Base: 6 cm Max 10 A	
A7	Filtro Secante WIX	1	WF33160 Conector 0,8 cm	
A8	Cortafuego	1	Conector 0,8 cm	
A9	Relé 4 pines	1	GC Power SLD 4P :12V: 40A	
A10	Porta Fusible + Fusible	1	Fusible 10A	

A11	Batería	1	Fuente:12V Descarga: 60Ah	
A12	Aislantes	1	Aislante Eléctrico y Cinta de Teflón	
A13	Dimmer + Multímetro Digital c/shunt	1	Dimmer: 12-24V/30A Multímetro: 100V/50A	

Fuente: Autor

Todos los accesorios ilustrados en la *tabla 13*, interligan funciones uno con otro para ir en producción del gas. Para entender, el relé (A9) es el encargado de abrir el paso de corriente desde la fuente de energía del vehículo (A11) en dirección a la celda electrolítica seca (A1), previo paso por el regulador de corriente (A13). La activación de este accesorio (relé) va depender de la conexión realizada, es decir que, (A9) se activará siempre y cuando la bomba de combustible se encuentre alimentada eléctricamente en función del contacto de ignición o justamente puede ser activado mediante una conexión directa con el contacto de ignición del motor, ya que es importante tomar en cuenta la seguridad en la cual el proceso se va llevar a cabo. El electrolizador debe ser activado y desactivado de acuerdo a esa lógica y así se evitará que el dispositivo quede funcionando cuando el vehículo se encuentre en reposo.

Desde un punto de vista químico y en función a un proceso de electrólisis, el agua reacciona en función a una diferencia de potencial inducida produciendo una reacción de óxido reducción. De acuerdo al formato de celda construido (celda seca bipolar), en cada placa neutra, una cara producirá hidrógeno y la otra oxígeno, siempre en proporción de 2:1. Luego a esto, el gas producido irá por medio de

mangueras (A4) hasta un filtro secante (A7), siendo este un accesorio de mucha utilidad debido a las formaciones de vapor de agua en el reservorio electrolítico y mangueras. Similarmente a esa lógica, la válvula cortafuego (A8), funciona como barrera de eventuales inflamaciones fuera de lugar. Finalmente, el circuito termina en él toma boca del sistema de succión de aire del vehículo, el cual va a conducir los gases al motor o específicamente al reactor de combustión.

Es importante tener presente dos situaciones respecto al uso indispensable del filtro secante. Primero, la temperatura de trabajo bajo el capot del vehículo favorece en cierto grado un cambio de estado evidente por parte del solvente de líquido a vapor. Sumado además, a las calurosas estaciones de verano en la región de Uruguiana- RS.

4.2.4. Material de Laboratorio Químico

Para la preparación de la solución electrolítica de hidróxido de sodio se utilizaron los siguientes materiales. Estos se identificaron como ML_n: Material de laboratorio x. (Tabla 14)

Tabla 14 – Materiales de Laboratorio Químico

ID	Ítem	Cantidad	Imagen
ML1	Hidróxido de Sodio 100% pureza	1	
ML2	Balanza Granataria Digital	1	

ML3	Probeta 1 L Vaso pp 1 L Varilla de Agitación	1	
ML4	Agua Destilada 1L	1	

Fuente: Autor

4.3. Métodos Empleados

En esta sección se describen los diferentes métodos que fueron utilizados para en el cual materiales, accesorios, reactivos químicos y herramientas que fueron utilizados para la confección y ensamblaje del sistema generador de HHO.

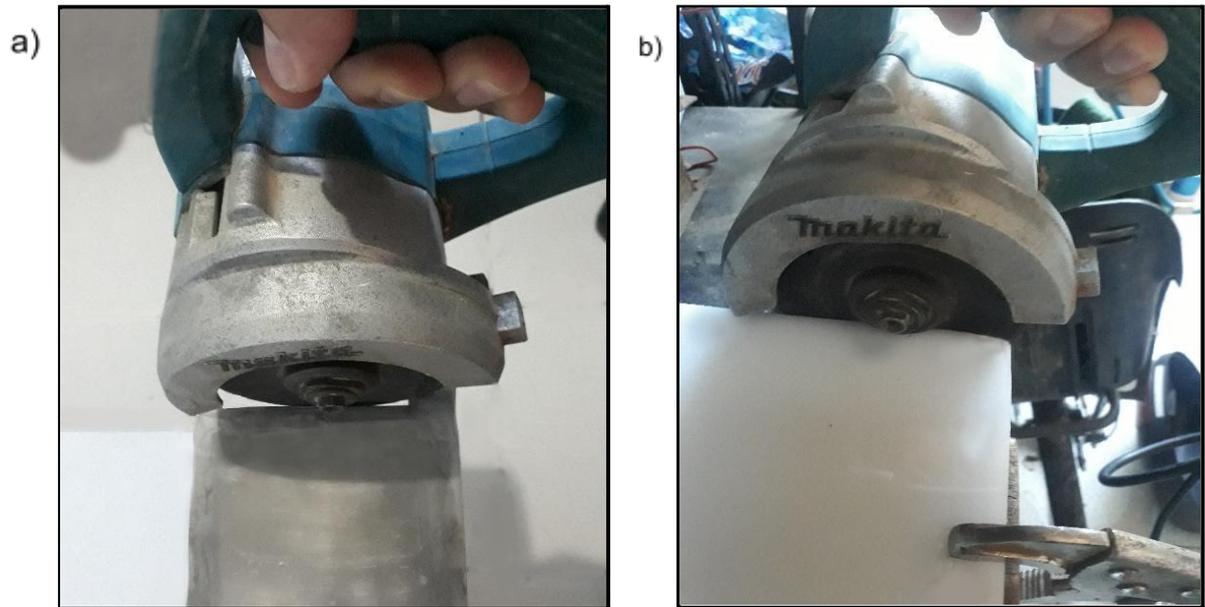
4.3.1. Fabricación de la Celda

Para la fabricación de la celda electrolítica seca, fueron utilizadas herramientas de casa, estas son:

➤ Sierra Circular Portátil

Con la sierra manual, (*figura 17*) ahora identificada como H1, se realizaron cortes según especifican las piezas P1, P2, P3 y P4, de acuerdo al diseño y sus dimensiones descritas en la *tabla 11*.

Figura 17 – Herramienta de Corte H1

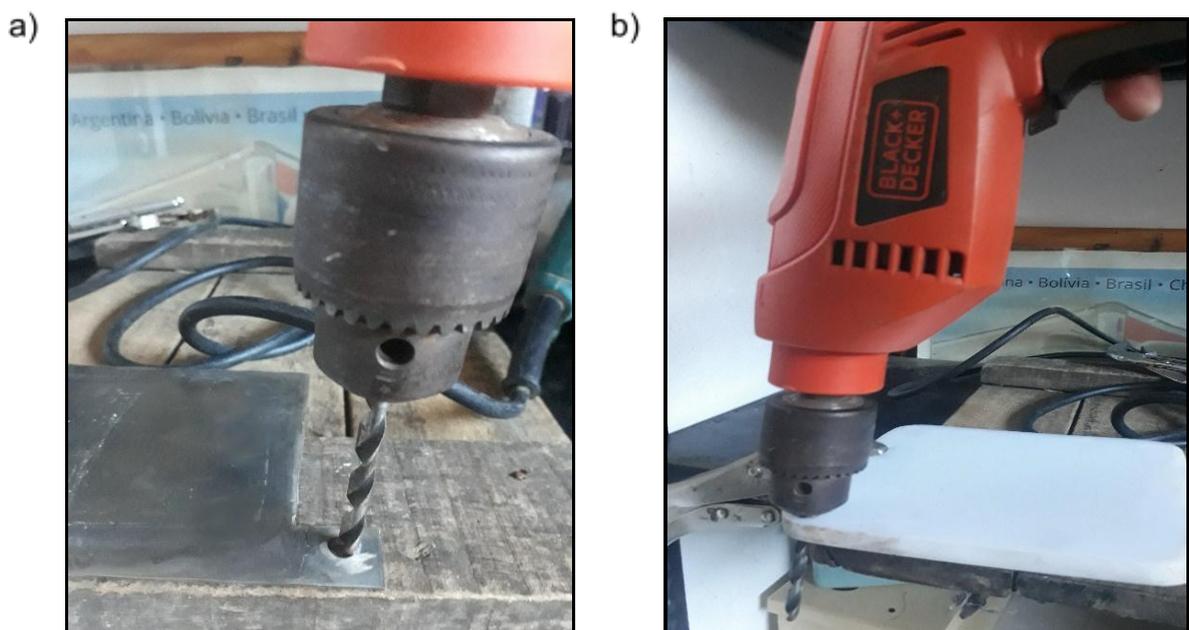


Fuente: Autor. a) P1, P2 b) P3, P4

➤ Taladro

El taladro portátil (*figura 18*), ahora identificado como H2, fue utilizado para realizar las diferentes perforaciones descritas para las piezas P1, P2, P3 y P4, (*tabla 11*).

Figura 18 – Herramienta de Perforación H2



Fuente: Autor. a) P1, P2 b) P3, P4

➤ Brocas

Las brocas utilizadas para perforar P1, P2, P3 y P4 tienen dimensiones, N°10 mm y N°6 mm, (*Figura 19*).

Figura 19 – Accesorio de Perforación H3



Fuente: Autor

➤ Tijera Hojalatera

La tijera hojalatera, (*figura 20*). Ahora identificada como H4, fue utilizada para realizar los cortes descritos en P5, (*tabla 11*).

Figura 20 – Herramienta de Corte H4



Fuente: Autor

4.3.2. Preparación del Electrolito

Para que la reacción de oxido-reducción sea efectiva en la celda electrolítica, esta debe contar con un vehículo conductor altamente eficaz. Para escogerlo fue necesario entender dos situaciones. Primero, dimensionar el poder conductor de disoluciones de KOH y NaOH (*figura 5*). Y segundo, entender el consumo de corriente que induce cada disolución, para generar el gas HHO, (*figura 9*) y (*figura 10*).

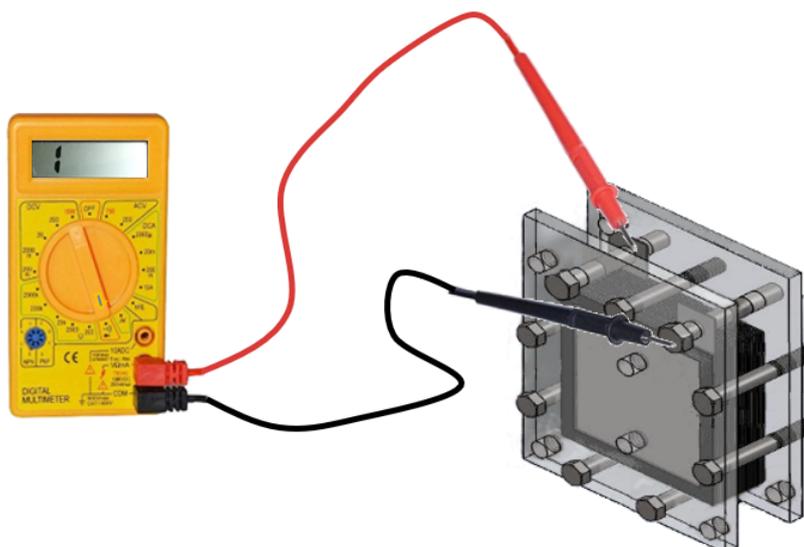
Delante a lo anterior y en base a una lógica para un sistema más económico, se escoge el NaOH. Porque utiliza una menor cantidad de reactivo y consume menos corriente para producir la misma cantidad de gas que el KOH. Finalmente, es preparada una solución electrolítica de NaOH al 15% en peso y en base a la curva estable de la *figura 5*, quedando para una próxima oportunidad la utilización de concentraciones de 1% como indica Silveira en la *figura 9*.

4.3.3. Análisis de Continuidad Eléctrica

El análisis de continuidad eléctrica (*figura 21*) fue realizado en dos momentos. Primero, para “verificar si las placas (electrodos y neutros) del electrolizador se encuentran debidamente aisladas y separadas de todos los tornillos externos”.

En un segundo momento, la celda debe contener el electrolito. Y de la misma forma anterior, esta vez, “los tornillos deben quedar totalmente aislados del exterior”. Es importante tener en cuenta que, si alguna fuga de carga o de tensión se produce al momento de energizar el sistema, existe la probabilidad de corto circuito, que el potencial redox no alcance el umbral necesario para generar una electrólisis y dar lugar a inflamaciones no esperadas.

Figura 21 – Análisis de Continuidad



Fuente: Autor

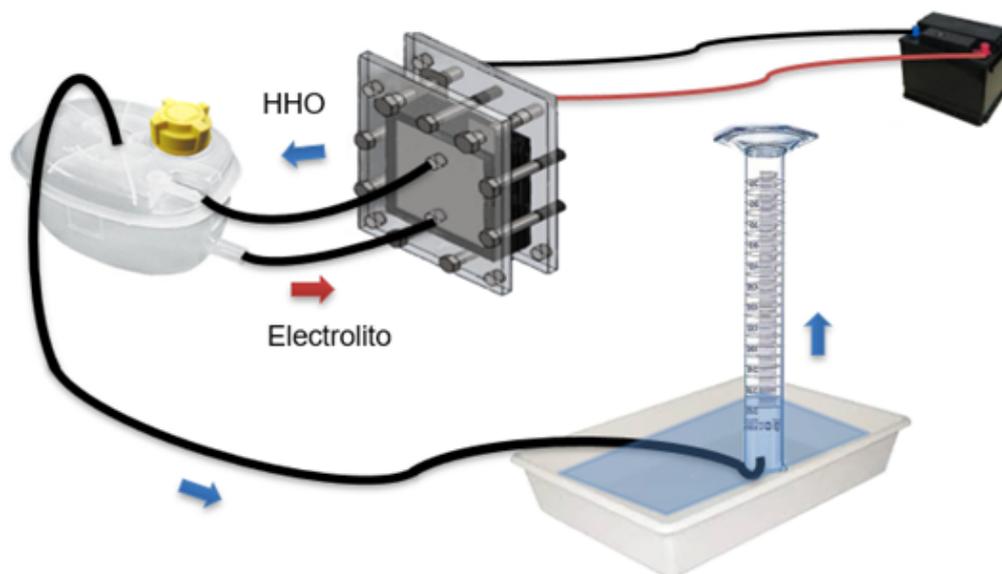
4.3.4. Análisis de Consumo de Corriente y Tensión

Para el análisis de consumo de corriente y diferencia de potencial, se utilizaron los mismos aparatos ilustrados en la *figura 22*. De ese modo y en función a la intensidad de corriente consumida, es posible levantar una proyección teórica en cuanto al volumen del gas producido, (ítem 5.3.3). Como también, la confirmación visual del volumen de gas experimental a esa intensidad de corriente. Paralelamente, en función a la ley de Ohm, es posible determinar la resistencia ejercida por la celda mediante la fórmula (ec.25).

4.3.5. Análisis del Volumen de HHO Producido

Para los análisis de volumen del gas HHO producido, primeramente, se necesitó medir la corriente circulante en la celda electrolítica a través de un multímetro digital (7,5A). De acuerdo a esa carga eléctrica, es posible obtener teóricamente un volumen final de gas de acuerdo a la ecuación 9 y paralelamente obtener el volumen final experimentalmente siendo en la práctica, medido como muestra la siguiente *figura 22*.

Figura 22 – Producción de Gas HHO



Fuente: Autor

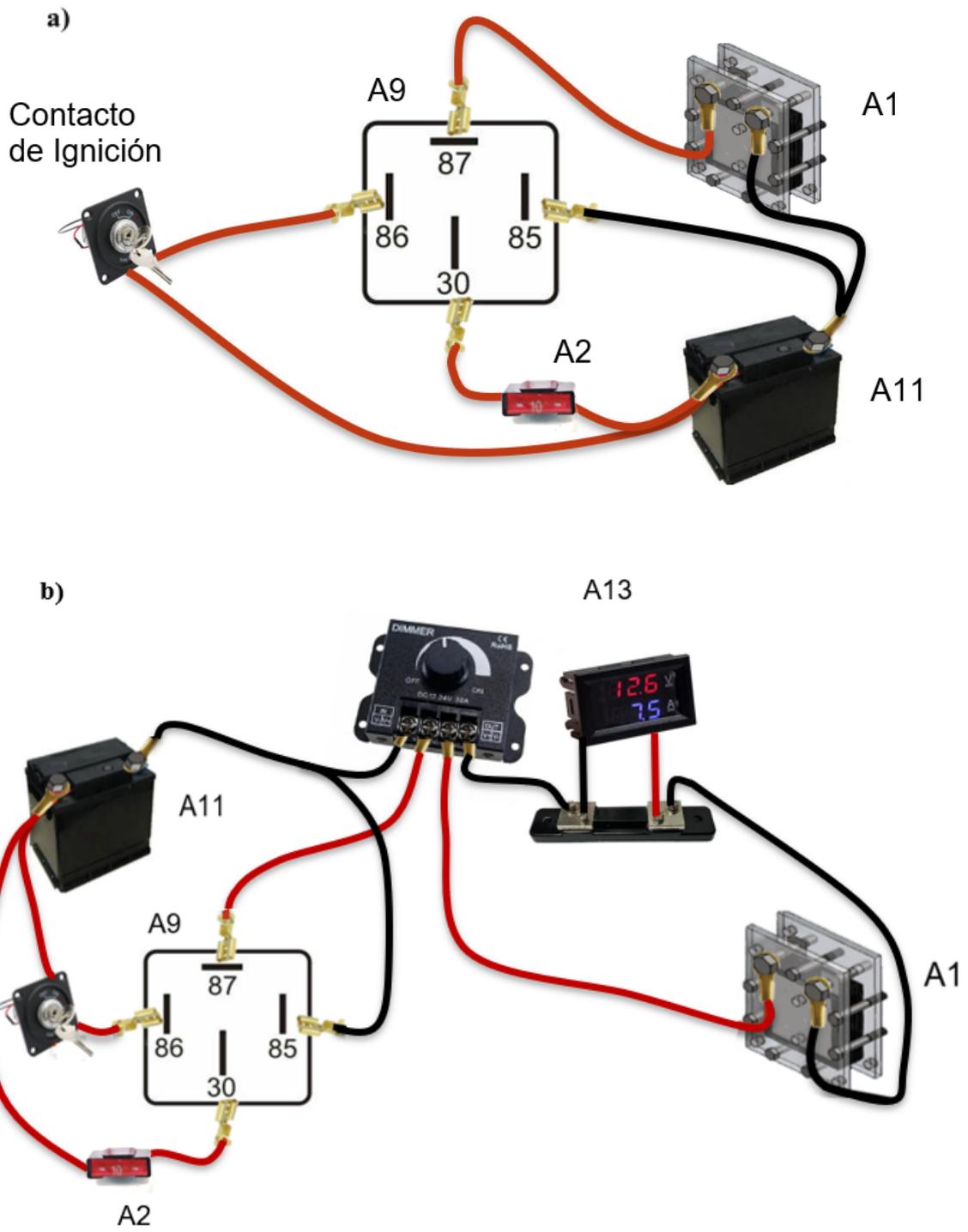
4.3.6. Esquema de Instalación del Sistema Generador de HHO

A continuación, son ilustrados tres esquemas de conexión para el sistema generador de gas HHO. El primero, basado en un proyecto de conexión eléctrica que sería un formato básico y que es visto en los diferentes documentos bibliográficos (*figura 23a*).

El segundo, muestra una ilustración en cual complementa el proyecto anterior sumado a un dispositivo dimmer que actúa en la variación de corriente con voltajes de trabajo de 12 a 24 V más un multímetro digital para lecturas de corriente y voltaje, con el fin de mantener un estatus eléctrico visible del proceso que se está llevando a cabo (*figura 23b*).

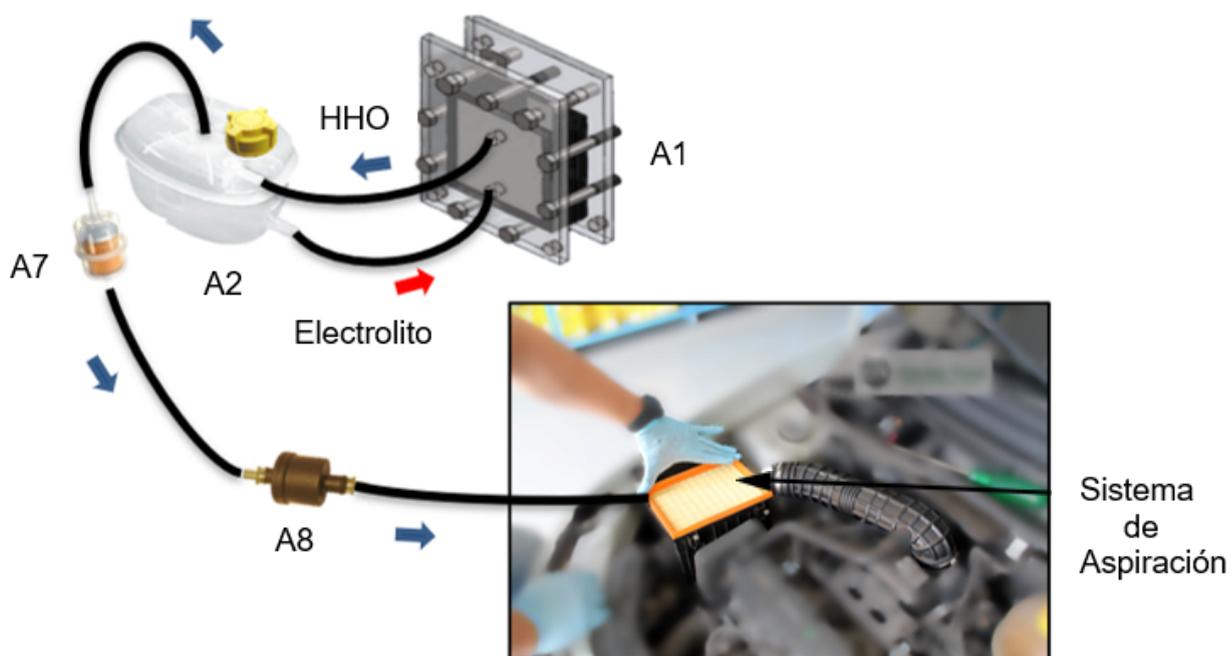
Finalmente y en una tercera figura se muestra como sería la proyección en función a las conexiones físicas para transportar el gas HHO producido desde la generación de este, hasta ser colocado en la estación de aspiración de aire del vehículo. (*Figura 24*)

Figura 23 – Proyecto de Conexión Eléctrica



Fuente: Autor

Figura 24 – Diagrama del Circuito Gaseoso



Fuente: Autor

4.3.7. Análisis del Consumo de Combustible

Para realizar esta prueba, fue necesario traer un comparativo del tipo antes y después de la aplicación del sistema generador de gas HHO y así poder verificar el consumo de combustible del vehículo. Para esto fue necesario aplicar en ambos casos, parámetros iguales de medida como es expuesto en la *tabla 15*.

Tabla 15 – Parámetros del Test Comparativo

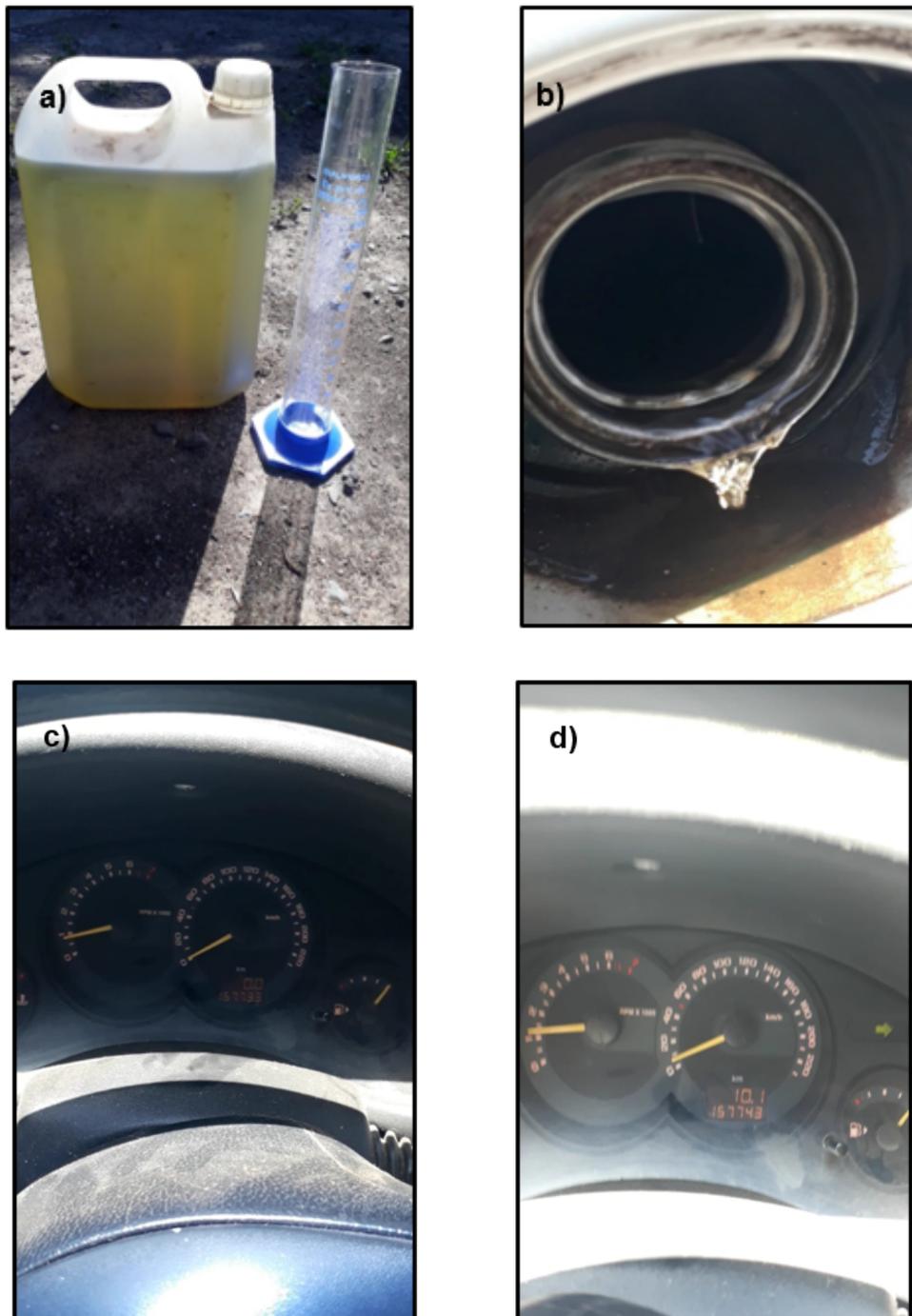
Km de Prueba	10
Luces externas	Encendida
Radio de Sonido	Encendida
Estanque	Completo

Fuente: Autor

Para el inicio de las pruebas, es importante destacar que estas fueron realizadas en duplicado, estanque lleno, luces exteriores encendidas, radio de sonido encendida y a cada 10 Km recorridos se verifica el consumo de combustible

hasta una marca interpuesta que consistía en completar hasta rebasar. Para esto fue necesario disponer de un galón de 6L de capacidad y una probeta de 250 cm³. De acuerdo a la siguiente secuencia mostrada en la *figura 25*, es posible distinguir, a) galón y probeta b) estanque completo c) kilometraje zerado d) ≈ 10 km recorridos y nuevamente se da inicio a la secuencia.

Figura 25- Secuencia para el Test de 10 Km



Fuente: Autor

4.3.8. Analizador de Parámetros del Motor

En esta sección, se muestra el dispositivo marca Texa modelo Axone 5 que fue utilizado para el diagnóstico de parámetros internos del motor. (Figura 26)

Figura 26 – Tablet Axone 5



Fuente: <https://www.texabrasil.com.br/produtos/axone-5>

4.3.9. Analizador de Gases

Para el análisis de gases pós combustión, fue utilizado un equipamiento de marca Alfatest modelo Discovery G4, como indica la figura 27.

Figura 27 – Analizador de Gases



Fuente: <http://www.alfatest.com.br>

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este apartado presenta los resultados de todas las pruebas realizadas descritas en la sección materiales y métodos para este estudio.

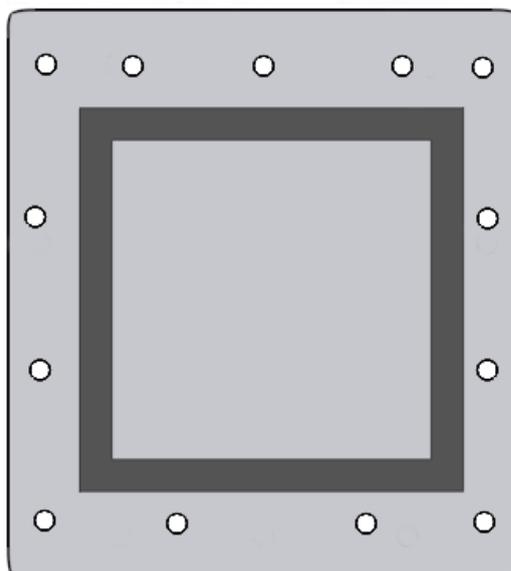
5.1. Ensamblado de la Celda Electrolítica

Concluido el diseño de las partes que componen la celda electrolítica seca, se procede a efectuar un ensamble inicial teniendo en cuenta la siguiente configuración para los electrodos negativo, positivo y neutros:

– nnnn +

Las primeras piezas que conforman la celda electrolítica de manera correlativa son: tapa de acrílico (trasera) y aislante, (P4 y P5). (*Figura 28*).

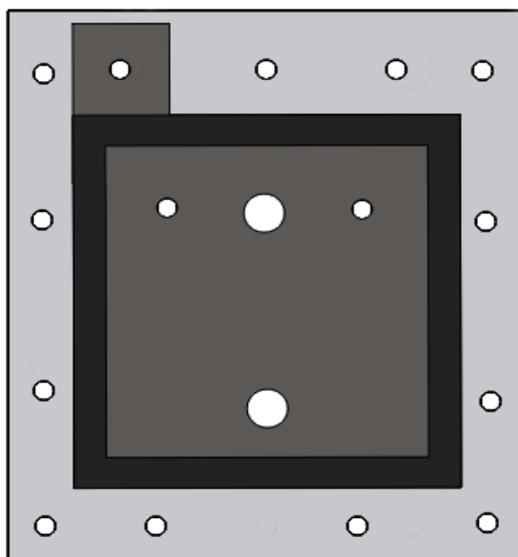
Figura 28 – Ensamblaje de Piezas P4 y P5



Fuente: Autor

Luego lo anterior, las piezas que correlacionan son: electrodo (cátodo o ánodo) y aislante (P1 y P5), (*Figura 29*).

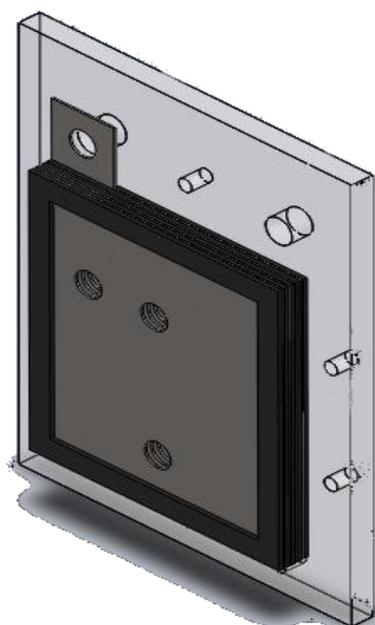
Figura 29 – Ensamblaje de Piezas P1 y P5



Fuente: Autor

Luego de lo anterior, las piezas que correlacionan son: 5 placas neutras intercaladas entre 5 aislantes (P2 y P5), (*Figura 30*).

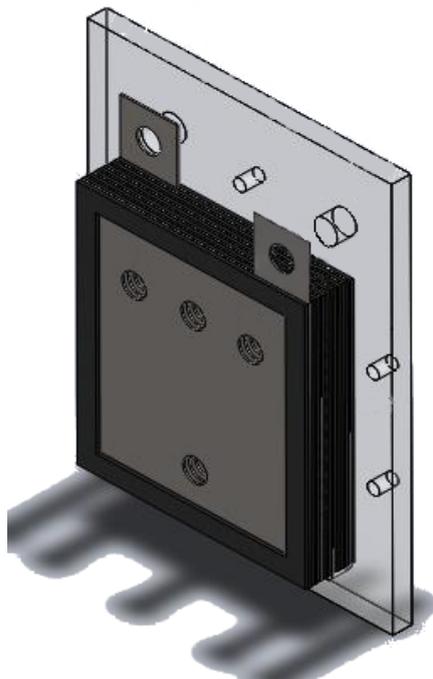
Figura 30 – Ensamblaje de Piezas P2 y P5



Fuente: Autor

Luego lo anterior, las piezas que correlacionan son: electrodo (cátodo o ánodo) y aislante (P1 y P5), (*Figura 31*).

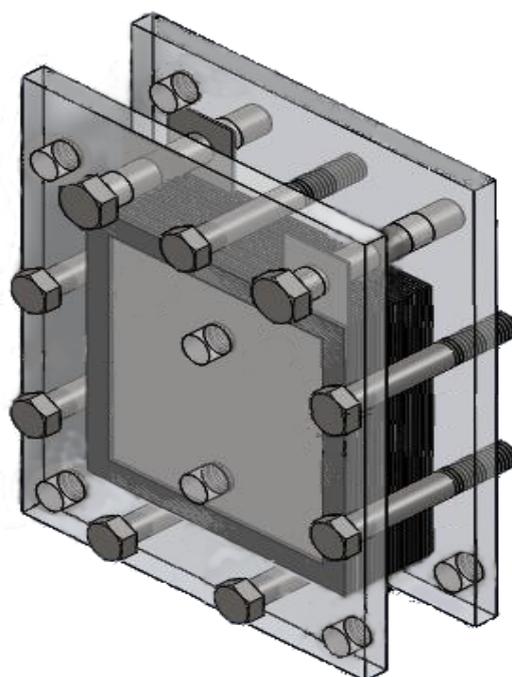
Figura 31 – Ensamblaje de Piezas P1 y P5



Fuente: Autor

Finalmente, la pieza que sigue es la tapa de acrílico que cierra la celda electrolítica: tapa delantera y pernos, arandela y tuercas (P3 y P6), (*Figura 32*).

Figura 32 – Ensamblaje de Pieza P3 y P6



Fuente: Autor

Finalmente, en la sección de *apéndice* se dispone el registro visual de las piezas reales, utilizadas para el montaje de la celda electrolítica.

5.2. Capacidad Técnica de la Celda Electrolítica

A continuación, son registrados los cálculos de área y volumen para todas las piezas fabricadas (P1, P2, P3, P4) especificadas en la *tabla 11*.

5.2.1. Cálculo de Área para Placas (Positiva, Negativa, Neutra) y Aislante

El cálculo del área, es basado en la fórmula de base por altura (ec.42) y para el cálculo total, es utilizada la fórmula siguiente (ec.43).

$$A = b \cdot a \quad (42)$$

Donde:

A = Área

b = Base

a = Altura

$$A = (b \cdot a) + (b_s \cdot a_s) - \pi r^2 \quad (43)$$

Donde:

r = Radio de la perforación

s = saliente

Placa Ánodo - Cátodo, aplicando (ec.43).

Entonces, el área que representa cada placa confeccionada (ánodo y cátodo), sería la suma del área mayor y el área saliente de menor dimensión. Las áreas que representan las perforaciones realizadas en la pieza P1, son descontadas (2 perforaciones de 1 cm y 3 perforaciones de 0,6 cm) para obtener el área final.

$$A_{\text{án/cát}} = (12\text{cm} \cdot 12\text{cm}) + (2\text{cm} \cdot 2\text{cm}) - (2\pi(0,5\text{cm})^2 + 3\pi(0,3\text{cm})^2)$$

$$A_{\text{án/cát}} = 145,58\text{ cm}^2$$

$$A_{\text{An/cat}} = 146,15\text{ cm}^2 \cdot 2 (\text{placas})$$

$$A_{\text{án/cát}} = 291,16\text{ cm}^2$$

Placa Neutra, aplicando (ec.43).

De la misma manera anterior, el área en cuestión sería la superficie metálica menos el área de las perforaciones realizadas de la pieza P2. (2 perforaciones de 1 cm y 1 perforación de 0,6cm).

$$A_n = (12\text{cm} \cdot 12\text{cm}) - (2\pi(0,5\text{cm})^2 + \pi(0,3\text{cm})^2)$$

$$A_n = 142,15\text{ cm}^2$$

$$A_n = 142,15\text{ cm}^2 \cdot 5 (\text{placas})$$

$$A_n = 710,73\text{ cm}^2$$

Área total

$$A_{\text{total}} = A_{\text{án/cát}} + A_n$$

$$A_{\text{total}} = 1001,89\text{ cm}^2$$

Área efectiva

El área efectiva, es la superficie de la placa inoxidable en el cual la solución electrolítica alcanza a mojar para producir la electrólisis, esta puede ser calculada siempre y cuando sea identificada la base y altura utilizada, (ec.42).

$$A_{ef} = (4,5\text{cm} \cdot 4,5\text{cm})$$

$$A_{ef} = 20,25\text{ cm}^2$$

$$A_{ef} = 20,25\text{ cm}^2 \cdot 7 (\text{placas})$$

$$A_{ef} = 141,75\text{ cm}^2$$

Aislante, aplicando (ec.43).

El área calculada responde a la superficie que quedó después del corte según la pieza P5.

$$A_{Ai} = (12\text{cm} \cdot 12\text{cm}) - (9\text{cm} \cdot 9\text{cm})$$

$$A_{Ai} = 63,00 \text{ cm}^2$$

$$A_{Ai} = 63,00 \text{ cm}^2 \cdot 8 \text{ (aislantes)}$$

$$A_{Ai} = 504,00 \text{ cm}^2$$

5.3. Capacidad de Producción de la Celda Electrolítica

En esta sección son registradas las capacidades efectivas tanto de las piezas fabricadas como de la celda electrolítica.

5.3.1. Cálculo del Volumen Vacío de la Cámara de Reacción

Para calcular el volumen interno de la cámara, se utiliza la fórmula de volumen para sólidos geométricos (base · altura · espesor) (ec.44). Con lo cual será posible dimensionar el espacio vacío total dentro de la cámara, gracias al espacio dejado por el aislante que fue removido de la pieza P5.

$$V_{in} = b \cdot a \cdot e \quad (44)$$

Donde:

b = Base

a = Altura

e = Espesor

Volumen Vacío, Aplicando (ec.44)

$$V_{in} = 9cm \cdot 9cm \cdot 0,4cm$$

$$V_{in} = 32,4 \text{ cm}^3$$

$$V_{in} = 32,4 \text{ cm}^3 \cdot 8 \text{ (aislantes)}$$

$$V_{in} = 259,2 \text{ cm}^3$$

5.3.2. Cálculo de Carga Eléctrica para Generar la Electrólisis

Para calcular la producción de gas HHO (ec.45) que genera la celda electrolítica, primero es necesario conocer el voltaje y la corriente consumida de la batería del vehículo. Siendo estas: 12V y 7,5A respectivamente. (Figura 33).

Figura 33 – Consumo de Carga Eléctrica de la Celda



Fuente: Autor

$$Q = i \cdot t \tag{45}$$

Donde:

Q = Carga (A · s) o (Coulomb)

i = Corriente (A)

$t =$ Tiempo (s)

Carga Eléctrica, aplicando (ec.45)

$$Q = 7,5A \cdot 60s$$

$$Q = 450 A \cdot s \approx Q = 450 C$$

5.3.3. Cálculo para la Producción de Gas

Para entender el cálculo que envuelve la descomposición del agua por medio de la electrólisis, varios son los conceptos redox y fisicoquímicos a tomar en cuenta para cuantificar el desprendimiento gaseoso de hidrógeno y oxígeno. Es importante considerar que Faraday, encontró una dependencia 1:1 de la sustancia formada o desprendida en función a la corriente suministrada. (Un Faraday de electricidad es el resultado de la multiplicación de la carga de un electrón por el número de Avogadro, ósea toma un valor de 96500 Coulomb). La cantidad de cada gas producido ($H_2 - O_2$), depende en cierta medida del número de electrones que participan en las semirreacciones como fueron expuestas en (ec.3) y (ec.4); (ver también concepto gráfico en *tabla 4*). Conociendo la cantidad de energía que atraviesa el sistema, es posible calcular los gramos de hidrógeno y oxígeno que se generan a través de la electrólisis según la fórmula descrita en el ítem 3.3 (ec.9).

Entonces, si se sabe que:

$$1 \text{ mol} = 1 \text{ mol } e^-$$

$$1 \text{ Faraday} = 96500 \text{ C por mol}$$

$$1 \text{ mol } e^- = 1 \text{ Faraday}$$

➤ Cálculo para el Hidrógeno teórico, aplicando (ec.9)

$$\text{Gramos de H} = \left(\frac{1,00797 \frac{g}{mol} \cdot 7,5A \cdot 60s}{96500 \frac{C}{mol} \cdot 2} \right)$$

$$\text{Gramos de H} = 0,0023502 \text{ g}$$

Luego, en un intervalo de 60 segundos y una corriente de 7,5 amperios se produce una cantidad de 0,0023502 g de Hidrógeno. Y el volumen de ese gas puede ser calculado mediante la fórmula de los gases ideales a presión de 1 atm y a 25°C, (ec.46). Antes de calcular el volumen, es necesario convertir los gramos de hidrógeno en moles de hidrógeno.

Aplicación de conceptos (P. Atómico H: 1,00791 g/mol)

$$\begin{array}{r} 1 \text{ mol H} \quad - \quad 1,00797 \text{ g} \\ X \text{ mol H} \quad - \quad 0,0023502 \text{ g} \end{array}$$

$$X = 0,0023316 \text{ moles de H}$$

Ahora, el cálculo para el volumen de hidrógeno sería:

$$PV = nRT \quad (46)$$

Donde:

P = Presión de Trabajo

V = Volumen de Hidrógeno

T = Temperatura de Trabajo

R = Constante de los Gases Ideales

n = Moles de Hidrógeno

$$V_H = \frac{0,0023316 \text{ moles} \cdot 0,082 \frac{\text{atm}\cdot\text{L}}{\text{mol}\cdot\text{K}} \cdot 298 \text{ }^\circ\text{K}}{1 \text{ atm}}$$

$$V_H = 0,056975 \text{ L de Hidrógeno}$$

Se obtiene un volumen de 0,056975 L desprendidos en una semi-reacción. Es decir, para cada semi-celda existe una semi-reacción de hidrógeno y para una celda de 6 semi-celdas como es el caso, existen 6 semi-reacciones de hidrógeno.

Entonces: El volumen total de hidrógeno sería:

$$V_H = 0,056975 L \cdot 6 \text{ (semi - reacciones de H)}$$

$$V_H = 0,34185 L \text{ de Hidrógeno}$$

➤ Cálculo para el Oxígeno teórico, aplicando (ec.9).

$$\text{Gramos de O} = \left(\frac{15,9994 \frac{g}{mol} \cdot 7,5A \cdot 60s}{96500 \frac{C}{mol} \cdot 4} \right)$$

$$\text{Gramos de O} = 0,018652 g$$

Antes de calcular el volumen, es necesario convertir los gramos de oxígeno en moles de oxígeno. Entonces, si se sabe que el peso del oxígeno es 15,9994 g por mol, los moles que representan 0,018652 g de oxígeno serían:

$$1 \text{ mol O} \quad - \quad 15,9994 g$$

$$X \text{ mol O} \quad - \quad 0,018652 g$$

$$X = 0,0011658 \text{ moles de O}$$

Aplicando la fórmula de los gases ideales

$$V_O = \frac{0,0011658 \text{ moles} \cdot 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 298 \text{ } ^\circ\text{K}}{1 \text{ atm}}$$

$$V_O = 0,028488 L \text{ de Oxígeno}$$

Se obtiene un volumen de 0,028488 L desprendidos por una semi-reacción. Es decir, para cada semi-celda existe una semi-reacción de oxígeno y para una celda de 6 semi-celdas como es el caso, existen 6 semi-reacciones de oxígeno.

Volumen total de oxígeno:

$$V_o = 0,028488 L \cdot 6 \text{ (semi - reacciones de O)}$$

$$V_o = 0,17093 L \text{ de Oxígeno}$$

➤ Cálculo Total de Gas HHO:

$$V_{HHO} = V_H + V_o$$

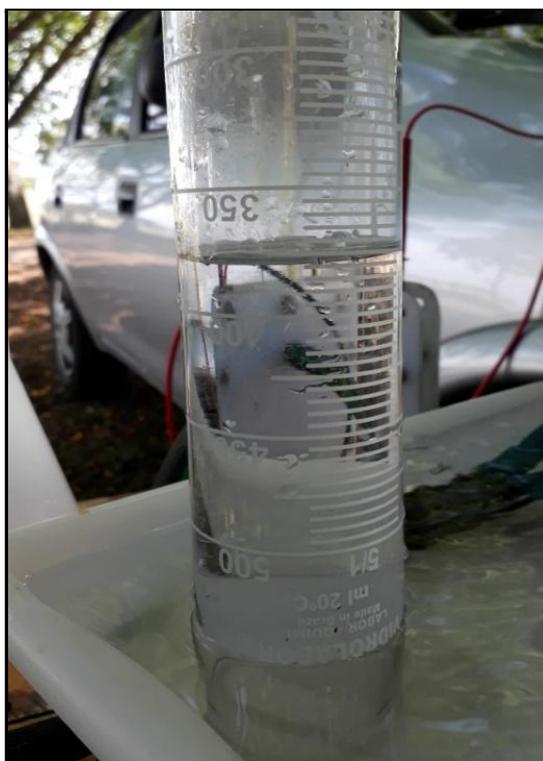
$$V_{HHO} = 0,34185 L \text{ de H} + 0,17093 L \text{ de O}$$

$$V_{HHO} = 0,51278 L \text{ de HHO}$$

➤ Medición Experimental del Gas HHO

La medición del gas en forma experimental fue realizada en duplicado, dando un valor aproximado de 375 cm³. Como fue visto en la *figura 3*, la razón de hidrógeno y oxígeno es de 2:1. Es decir, se están produciendo 250 cm³ de hidrógeno y 125 cm³ de oxígeno. (*figura 34*).

Figura 34 – Volumen Experimental de HHO



Fuente: Autor

5.3.4. Cálculo de Potencia Consumida

Para calcular la potencia de la celda electrolítica, se utiliza la siguiente fórmula. (ec.47)

$$P = V \cdot I \quad (47)$$

Donde:

P = Potencia

V = Voltaje

I = Intensidad de Corriente

Entonces:

$$P = 12V \cdot 7,5A$$

$$P = 90W$$

5.3.5. Cálculo de Energía Consumida

Para calcular la energía que consume la celda electrolítica, se utiliza la siguiente fórmula. (ec.48)

$$E = P \cdot t \quad (48)$$

Donde:

E = Consumo de Energía

P = Potencia

t = Tiempo

Entonces:

$$E = 90W \cdot 60s \cdot \left(\frac{1h}{3600s} \right)$$

$$E = 1,5Wh$$

5.3.6. Cálculo de Eficiencia de la Celda Electrolítica

Para el cálculo de la eficiencia, se necesitó obtener el volumen teórico de gas HHO, el cual depende completamente de la carga eléctrica consumida. Ese valor de carga obtenido según expone el ítem 5.3.2 es utilizado para el procedimiento según indica el ítem 5.3.3. Finalmente, este último valor se convertirá en el volumen de gas teórico obtenido por fórmula.

Ahora bien, para obtener el valor del volumen de gas en forma experimental, fue necesario cuidar el desplazamiento de agua dentro de un minuto y a 7,5 A. Así, de esta manera se consiguió una relación teórico - experimental para la obtención de la eficiencia en función del gas producido de la celda electrolítica.

$$\begin{array}{lll} \textit{Teórico} & 0,51278 \textit{ L de HHO} & \rightarrow 100\% \\ \textit{Experimental} & 0,375 \textit{ L de HHO} & \rightarrow X\% \end{array}$$

$$X = 73\% \textit{ de eficiencia}$$

5.4. Instalación del sistema HHO en el Vehículo

Este apartado tiene por objeto mostrar en detalle, la instalación del sistema generador de gas HHO en dos ámbitos diferentes. Siendo en base al ítem 4.3.6, el cual describe dos esquemas modelos a utilizar, primero para dar una visión clara de cómo los accesorios deben ser instalados en función al circuito del gas y segundo, como la conexión eléctrica debe ser realizada. A continuación, es posible detallar esas instalaciones en base a:

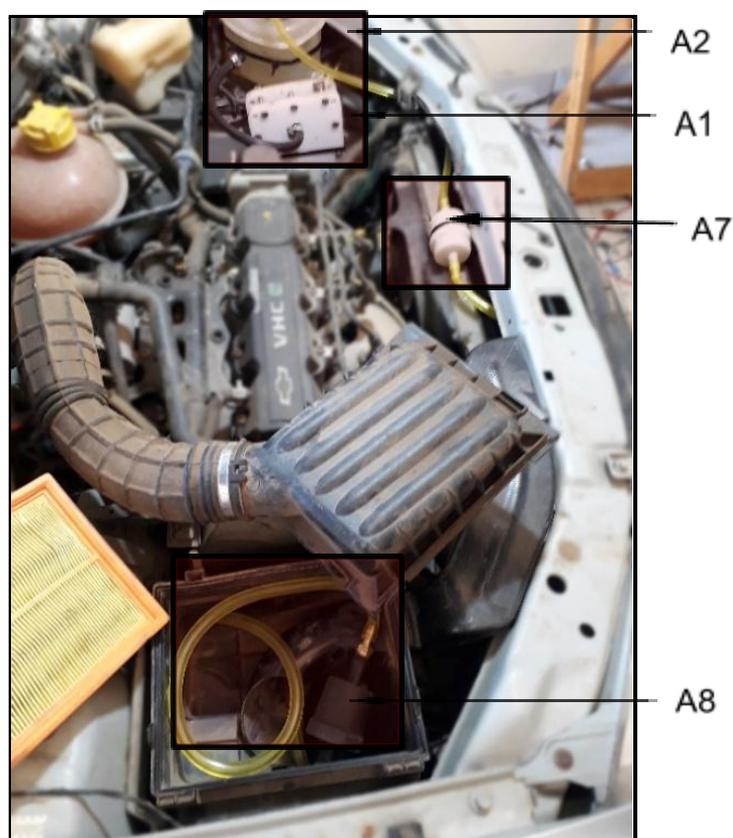
5.4.1. Instalación Física del Sistema HHO

En virtud al diagrama expuesto en la *figura 24*, fue posible realizar la instalación física del electrolizador y de todos los accesorios que hacen parte del proceso de generación del gas HHO, mostrando a través de las diferentes ilustraciones, la ubicación física de todos estos elementos dentro del compartimiento

delantero del vehículo con el fin de dimensionar la distribución espacial de todas sus conexiones.

Es importante destacar que para la instalación del sistema fueron consideradas algunas prevenciones a eventuales reacciones secundarias que podrían influir en los resultados luego de dar partida al vehículo, por ejemplo: los vapores de agua que se generan dentro del recipiente A2 y en parte de la manguera, producto el calor generado debido al funcionamiento del motor, sumado a las altas temperaturas de verano (39 - 41°C, Uruguiana-RS, enero del año 2022), obligan a tomar la precaución de instalar un filtro de agua en el circuito del gas, con el objetivo de evitar que ese producto secundario pueda ser succionado a la cámara de combustión y generar serios problemas a la infraestructura interna del motor. Otra prevención considerada, tiene relación con la instalación de un cortafuego en la última etapa del circuito gaseoso. El objetivo es prevenir combustiones fuera de lugar.

Figura 35 – Vista General de la Instalación del Sistema HHO



Fuente: Autor

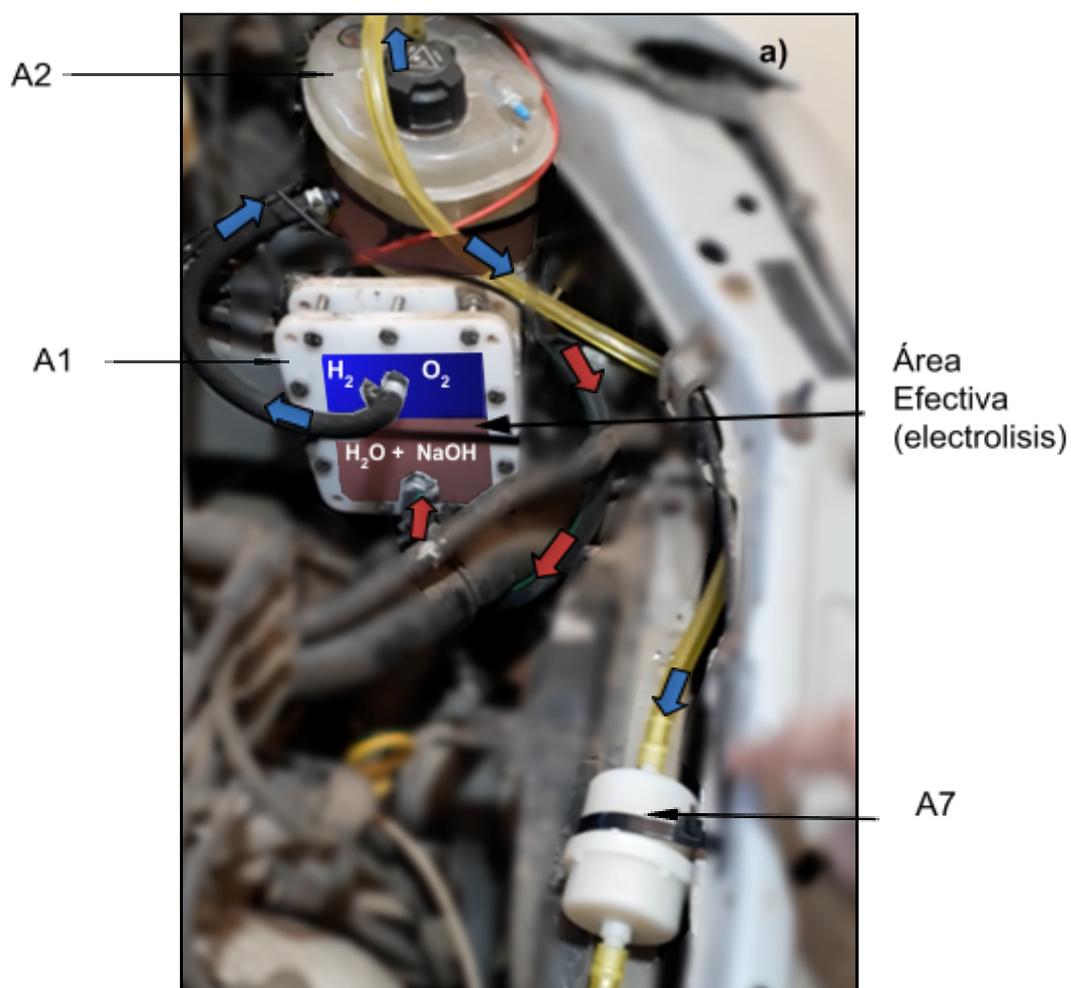
En la *figura 35* y de manera secuencial, la solución electrolítica de 15% en peso que sale de A2, entra en A1 y luego de la electrólisis en A1, los gases formados vuelven a A2. El motivo de volver a A2: fueron observados algunos cambios de presión y reflujos del electrolito en A1, la causa aparente, como la cámara de la celda donde ocurre la electrólisis es de baja capacidad sumado a las altas temperaturas de trabajo y a los bruscos movimientos del vehículo facilitan ese proceso. Es por esa razón que se evita conducir el gas directamente al accesorio A7 y si retornarlo a A2.

En la *figura 36a* y de manera representativa, puede ser observado el circuito del electrolito y del gas HHO, destacando además el área efectiva donde ocurre la electrólisis en función a los componentes de la solución y al producto generado. Como bien se observa con flechas rojas, el electrolito sale de reservorio A2, entra al generador A1, ocurre la electrólisis y los gases generados son expulsados por la manguera superior (flechas azules), volviendo a A2 para luego ir por la parte superior de A2 en dirección al filtro secante A7.

Paralelo a la secuencia, se muestra que A2 almacena solución electrolítica y gas HHO. Entonces, ¿en qué cantidad está siendo almacenado este gas? Para tener una referencia con respecto a la capacidad del reservorio, es necesario traer algunos datos de esta investigación, por ejemplo: ítem 5.3.1, sobre el volumen interno de la celda, *tabla 13*, sobre la capacidad total del accesorio A2 y por último el volumen que ocupan 30 cm de la manguera inferior identificados con flechas rojas según se ilustra en la *figura 36*.

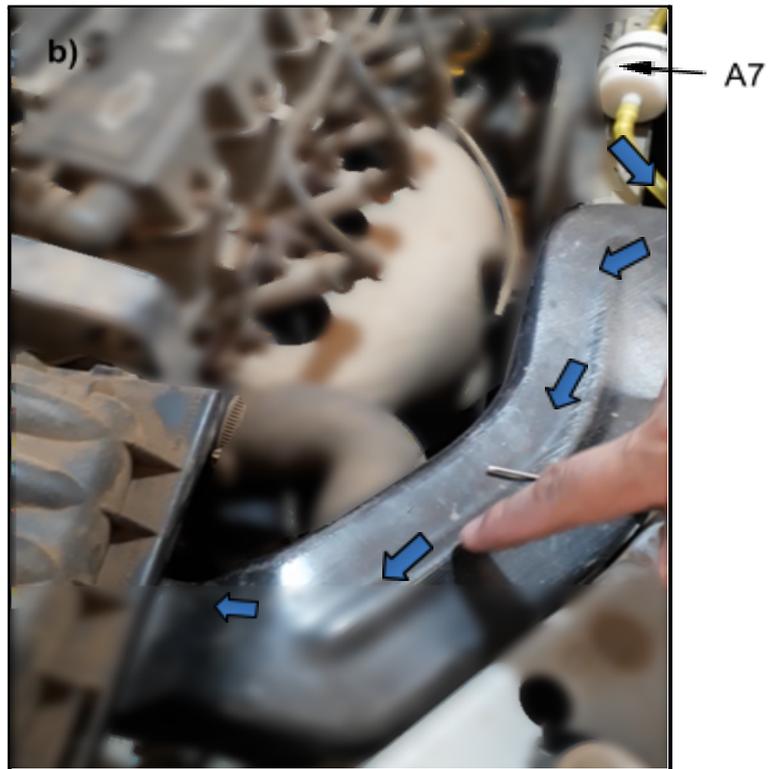
Para entender el cálculo, 1000 cm³ de solución electrolítica se encuentran en el reservorio de 1600 cm³ de capacidad. Entonces, si el desplazamiento ocurre a través de la manguera hacia la cámara interna de la celda, como consecuencia se produce la disminución en el nivel del electrolito en el reservorio. Adicionalmente, si la cámara del electrolizador tiene una capacidad de 259,2 cm³, la mitad sería 129,6 cm³ ya que tiene una estricta relación con la altura del área efectiva de la celda. Y como 18 cm³ son 30 cm de manguera, el desplazamiento final de electrolito toma un volumen de 147,6 cm³. Es decir, que 852,4 cm³ son de electrolito y 747,6 cm³ de gas HHO almacenados en A2.

Figura 36 – Instalación del Sistema HHO en el Vehículo

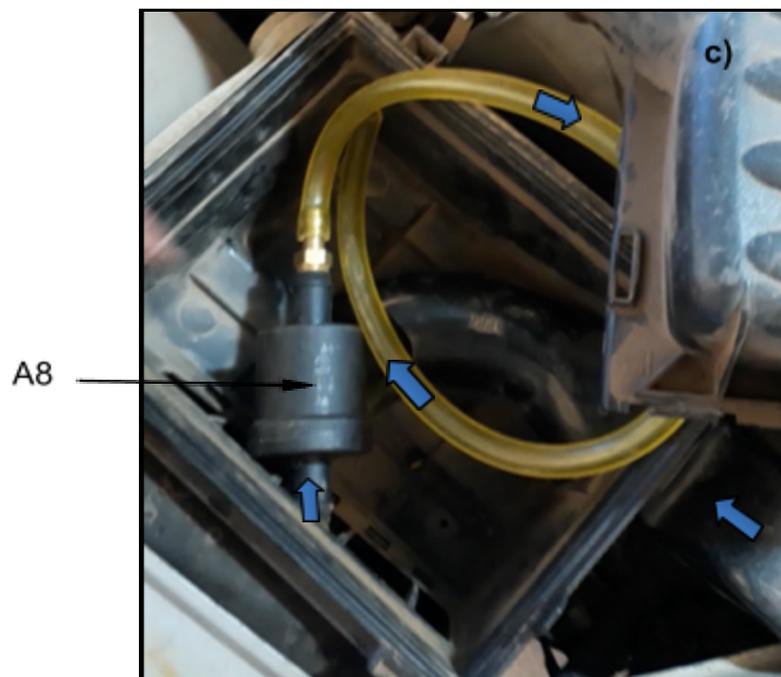


Una observación pertinente y de mucha importancia tiene relación al cuidado del contenido interno de la manguera antes de A7 y después de A2. Ya que visiblemente existe formación de vapores de agua dentro de ese tramo. Es fundamental verificar el correcto funcionamiento del filtro de agua para evitar que estos terminen dentro del motor. Sin embargo cuando comienzan aparecer ahora después del filtro, ya es un indicativo de preocupación y motivo para el reemplazo o simplemente para efectuar un secado de este.

Continuando la secuencia anterior, el gas HHO sale del filtro secante A7 y sigue el circuito en dirección a la cámara de toma de aire del vehículo. (Figura 36b)



Finalmente, y dentro de la cámara de aire es posible visibilizar a A8 el cual protegerá al sistema de posibles inflamaciones fuera de lugar. (Figura 36c)

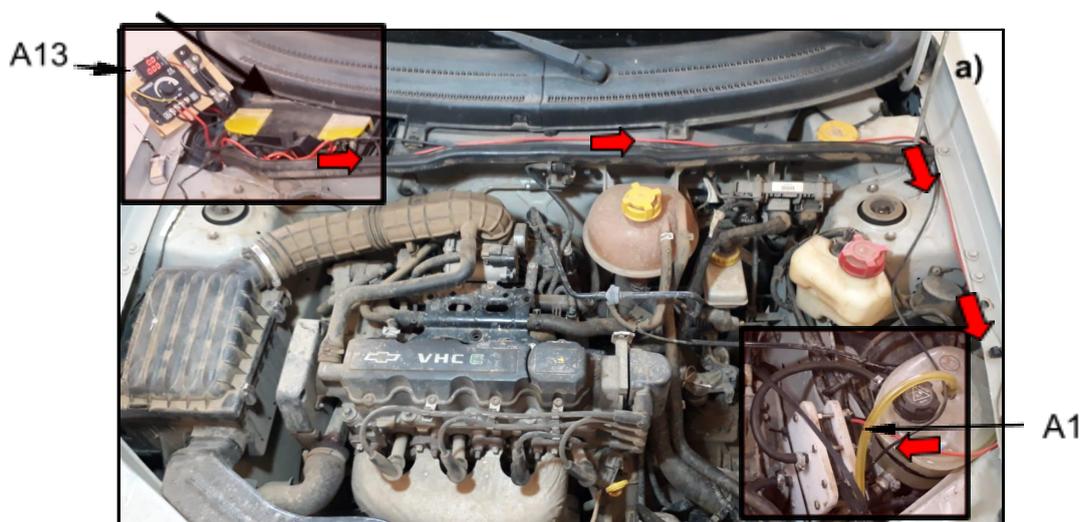


Fuente: Autor

5.4.2. Instalación Eléctrica

La instalación fue realizada en base al proyecto eléctrico de la *figura 23b*, y su montaje es registrado en la *figura 37a*, siendo en primera instancia una vista general de este. De izquierda a derecha, primero se identifica al accesorio A11 (batería) y el sistema de control de corriente A13, este último queda ubicado definitivamente dentro del espacio entre la lata de la carrocería y la batería. Luego a lo anterior, iendo en dirección de la derecha (flechas rojas) lo siguen los cables rojo y negro hasta llegar a la última estación del proceso que sería el electrolizador A1.

A11 Figura 37 – Instalación Eléctrica del Sistema HHO



Ya en la *figura 37b*, es posible observar en una mejor toma la ubicación de los accesorios, por ejemplo el sistema de control eléctrico, el relé, y el fusible, todos identificados como A13, A9 y A2 respectivamente. Paralelamente, esta ilustración registra el momento exacto cuando el vehículo se encuentra encendido, es decir, el valor del voltaje observado en la parte superior de la pantalla de A13 es producto del alternador funcionando. Los 13,9V indican un alternador en buenas condiciones (un alternador en buenas condiciones debe generar entre 13,5V - 14,5V) y esa nueva diferencia de potencial será la fuente de carga para la batería del vehículo. Los 7,46 A registrados en la pantalla de A13 corresponden al consumo de corriente de la celda electrolítica, siempre y cuando el potenciómetro esté seteado a 2/3 del máximo como es posible verlo.



Finalmente, como es ilustrado en la *figura 37c*, se visualiza la conexión tanto del terminal positivo como negativo, que viene luego del accesorio A13.



Fuente: Autor

5.5 Aplicación del Electrolizador en el Vehículo

En esta sección son abordados los diferentes test realizados al vehículo Chevrolet Classic Life 1.0 bajo todas las condiciones vistas en la tabla 15.

5.5.1. Consumo de Combustible

De acuerdo a los datos de la *tabla 16* para la prueba comparativa sin electrolizador y con electrolizador del vehículo, se expone lo siguiente.

Tabla 16 – Comparativo del Consumo de Combustible

Sin Electrolizador		Con Electrolizador	
10,0 km	0,800L	10,1 km	0,410L
10,4 km	0,850L	10,2 km	0,440L

Fuente: Autor (<https://www.youtube.com/watch?v=5rGhwsUJNZQ>)

Para proyectar estos datos provenientes de las pruebas sin electrolizador y con electrolizador en kilómetros recorridos por litro de combustible consumido, se procede extrapolar el kilometraje quedando de la siguiente manera (*Tabla 17*)

Tabla 17 – Consumo Medio de Combustible en Km por Litro

Sin Electrolizador		Con Electrolizador	
12,36 km	1L	23,88 km	1L

Fuente: Autor

De esta forma es posible interpretar que el nuevo rendimiento del vehículo gira en torno al 93% cuando se utiliza este electrolizador como generador de gas HHO. (referencia de consumo para el vehículo Chevrolet Classic Life 1.0 es de 13km/L para tramos cortos y 15km/L para tramos largos)

5.5.2. Análisis de Gases

Según Léo Machado (2017), los gases como el monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) generalmente provienen de la combustión que ocurre en diversos tipos de motores considerados altamente poluentes ya que impactan directamente en el efecto invernadero. El monóxido de carbono es producido a través de una combustión incompleta y el dióxido de carbono más agua resulta de una combustión completa. A modo específico y en base a la *tabla 18* y *tabla 19*, unos de los resultados que llama la atención para el test comparativo tanto sin

electrolizador como con electrolizador, es el CO₂, este gas fue monitoreado en alta rotación (≈ 2500 rpm) y en baja rotación (≈ 700 rpm o marcha lenta) y en ambos casos, existe una pequeña variación cuando se trata de un mismo test (sin electrolizador), pero cuando se comparan ambos test (sin y con electrolizador), los valores del gas (CO₂) se distancian aproximadamente en un 100%. Este último comparativo, explica la reacción automática de la central electrónica para reducir el envío de combustible a través de los inyectores cuando se utiliza híbridamente el gas HHO como fuente de energía.

Desde otro punto de vista y en función a la “dilución” de los gases, Léo Machado (2017), explica que este parámetro debe permanecer cercano al 15% para un vehículo normalmente ajustado. Cuanto menor sea ese porcentual, mayor será la “dilución” de los gases de CO + CO₂ producidos luego de la combustión, siempre y cuando no existan fugas fuera del tubo de escape ni entradas de aire falso al motor.

En la *tabla 18*, vemos que la “dilución” tanto en marcha lenta como en alta rotación estas se aproximan al 15%, sin embargo, en la *tabla 19* esas diluciones terminan siendo mucho menor, aludiendo rápidamente una alta “dilución” de estos gases, interpretando de un punto de vista mecánico, que en el proceso existe la presencia de aire falso en el motor. Sabemos por nuestra parte lo que se trata de justificar bajo una mirada automotriz y entendemos la dirección de este análisis en base a los datos obtenidos infiriendo nuevamente, la disminución en la inyección de combustible convencional a la cámara de combustión por el hecho de encontrarse analíticamente en una menor proporción (CO + CO₂).

Tabla 18 – Análisis de Gases sin Electrolizador

Valores Lidos								
	HC	CO	CO2	Dil.	O2	NOx	RPM	Temp.
2500 rpm	2 ppm	0 %	14,3 %	14,3 %	-	0	2645 rpm	80 °C
Marcha Lenta	0 ppm	0 %	13,8 %	13,8 %	-	0	675 rpm	83 °C
Valores Calculados				Valores Limite				
	F. Dil.	HCc	COc	F. Dil. Máx.	HCc Máx.	COc Máx.		
2500 rpm	1,05	2 ppm	0 %	2,5	100 ppm	0,3 %		
Marcha Lenta	1,09	0 ppm	0 %	2,5	100 ppm	0,3 %		
Resultado: Aprobado							Escapamento: 1 - Combustivel: Flex	

Fuente: Centec Uruguaiana

Tabla 19 – Análisis de Gases con Electrolizador

Valores Lidos								
	HC	CO	CO2	Dil.	O2	NOx	RPM	Temp.
2500 rpm	1 ppm	0,02 %	7,4 %	7,42 %	-	0	2370 rpm	99 °C
Marcha Lenta	0 ppm	0 %	5,7 %	5,7 %	-	0	700 rpm	99 °C
Valores Calculados				Valores Limite				
	F. Dil.	HCC	COc	F. Dil. Máx.	HCC Máx.	COc Máx.		
2500 rpm	2,02	2 ppm	0,04 %	2,5	100 ppm	0,3 %		
Marcha Lenta	2,63	0 ppm	0 %	2,5	100 ppm	0,3 %		
Resultado: Reprovado							Escapamento: 1 - Combustivel: Flex	

Fuente: Centec Uruguaiana

Cuando analizamos los valores límites permitidos en ambos test, verificamos ahora los “factores de dilución” que serían los valores calculados de los valores leídos. Nuevamente la explicación al fenómeno no es diferente, en *tabla 18* los “factores de dilución” respecto al máximo permitido oscilan se distancian en 2,33 veces y están asociadas a una correcta combustión, tanto para marcha lenta como para alta rotación, paralelamente es posible observar la inexistencia de hidrocarburos como de monóxido de carbono para marcha lenta y presencia de hidrocarburos sin monóxido de carbono para altas rotaciones. Mientras que en la *tabla 19* ese mismo parámetro (factor de dilución), sobrepasa el máximo cuando se encuentra en marcha lenta y próximo al máximo cuando se está en alta rotación. Complementando esta tabla en valores calculados, en marcha lenta es posible observar la inexistencia de hidrocarburos sin quemar y la nula formación de CO, es decir, existe una buena combustión. Ya en alta rotación, encontramos la presencia de hidrocarburos sin quemar y la presencia de una pequeña parte de CO ambos bajos los máximos permitidos.

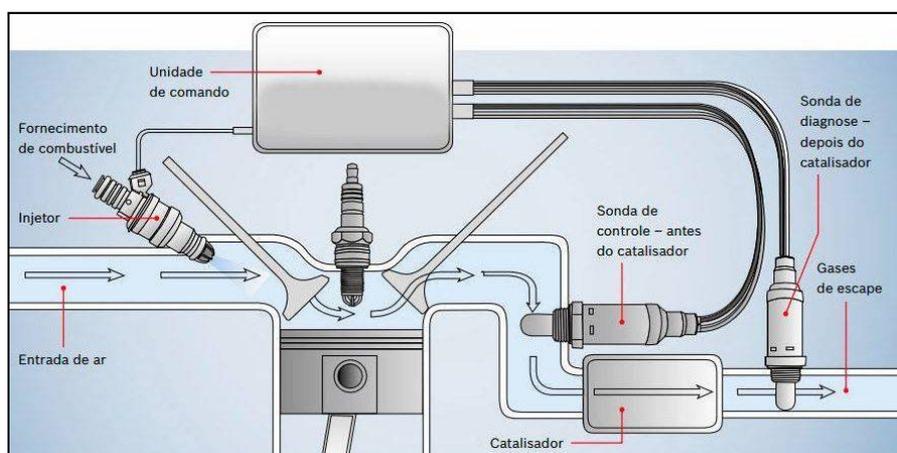
5.5.3. Diagnóstico del motor

En esta sección, se analizaron los diferentes parámetros vistos por el escáner Axone 5 para dos situaciones diferentes, cuando el vehículo se encontraba funcionando sin electrolizador y con electrolizador.

- Sensor Lambda Pre – Catalizador y Pós – Catalizador

Introduciendo brevemente en sensores lambda, estos se encuentran ubicados antes y después del catalizador (*figura 38*), leen simplemente concentraciones de oxígeno y su lectura es interpretada por la central electrónica para configurar la razón estequiométrica A/F más adecuada (sensor 1, antes del catalizador). Por otro lado, la lectura de oxígeno (sensor 2, después del catalizador) luego de la transformación de gases tóxicos a no tóxicos también puede ser monitoreada para evaluar el correcto funcionamiento del catalizador.

Figura 38 - Ubicación de los Sensores Lambda



Fuente:

<https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/para-que-serve-e-como-funciona-a-sonda-lambda/>

En un primer análisis (*tabla 20*) y en función a la relación estequiométrica de la sonda lambda del pre - catalizador sin electrolizador y con electrolizador, estos se mantienen en un tramo de oscilación permanente de la forma rico y pobre. Es decir, a través de la señal (milivolt) del sensor lambda, la central electrónica mantiene una razón aire/combustible de máxima eficiencia, es decir, $\lambda = 1$.

Tabla 20 – Comparativos de los Sensores Lambda

Sin Electrolizador		Con Electrolizador	
Pre-Catalizador	Pós-Catalizador	Pre-Catalizador	Pós-Catalizador
88 – 784 mV	234 – 273 mV	88 – 781 mV	171 – 259 mV

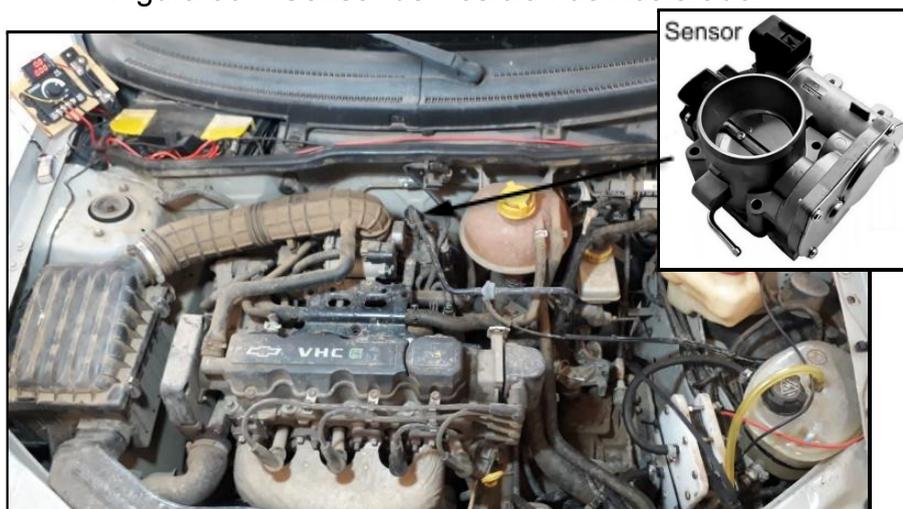
Fuente: Autor

Paralelamente y para interpretar la señal del sensor lambda p_{ós} – catalizador sin electrolizador y con electrolizador, notamos que en ambos test los tramos de lectura se establecen dentro de la zona pobre, es decir, son detectadas bajas concentraciones de oxígeno. Algo más acentuado se observa en la prueba con electrolizador, infiriendo una mejor quema estequiométrica de combustible por encontrarse en menor cantidad.

➤ Sensor de Posición de Acelerador (TPS)

Descriptivamente, el sensor TPS está ubicado en la parte superior del motor según muestra la *figura 39*.

Figura 39 – Sensor de Posición de Acelerador



Fuente: Autor

De acuerdo al diagnóstico realizado por el equipamiento Axone 5, este parámetro entrega dos lecturas para el mismo sensor en dos ángulos diferentes. Explicando de forma breve, es importante saber que el aparato debe indicar 0,5 V cuando el paso de aire está completamente cerrado y 4,5 V cuando el paso de aire está completamente abierto. Se entiende que esta pieza, es la que controla el flujo de aire que auxilia la combustión de forma estequiométrica en base a las lecturas del sensor lambda del pre-catalizador. Para entender los resultados de la *tabla 21*, el vehículo se mantuvo en marcha lenta en todo momento y las lecturas del sensor 1 al acelerar, aumentaba el potencial (V) y concomitantemente el sensor 2 disminuía el

potencial (V). Esa lógica fue utilizada para interpretar las aberturas tanto para la prueba con y sin electrolizador. Como la prueba fue basada en marcha lenta 0,76 V indica una abertura mayor que 0,70 V, es decir, la central electrónica reacciona con abriendo el paso de aire en la presencia de gas HHO.

Tabla 21 – Sensor de Posición TPS

Sin Electrolizador		Con Electrolizador	
Sensor 1	Sensor 2	Sensor 1	Sensor 2
0,70 V	4,25 V	0,76 V	4,21 V

Fuente: Autor

➤ Tiempo de Inyección

Los inyectores tienen la tarea de administrar el combustible hacia dentro de la cámara de combustión en razón estequiométrica y en base a lo calculado por la central electrónica. Como hemos visto hasta aquí, la razón A/F depende del entendimiento de muchos parámetros internos, que en esta oportunidad no serán revisados pero si se deja la inquietud para quienes se interesen en relacionar otros parámetros que ayuden entender aún más el funcionamiento del vehículo sin electrolizador y con electrolizador. A continuación, y de manera gráfica (*figura 40*) es posible observar la ubicación de este instrumento.

Figura 40 – Ubicación de los Inyectores



Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en esta prueba, indican que los tiempos de inyección del combustible convencional para el vehículo 1.0, difieren en un pequeño tramo. Para Interpretar estos datos, es necesario saber que el tiempo de inyección se refiere al tiempo de abertura del inyector para enviar gasolina a la cámara de combustión en milisegundos. Es decir, para que el motor consiga mantenerse encendido sin electrolizador, es necesario inyectar más combustible que con electrolizador (*tabla 22*).

Tabla 22 - Comparativo para el Tiempo de Inyección

Sin Electrolizador	Con Electrolizador
1,9 – 2,1 ms	1,7 – 1,9 ms

Fuente: Autor

6. CONCLUSIÓN

De esta manera es posible concluir con mucho entusiasmo, cada uno de los resultados obtenidos en esta investigación, que van desde el planteamiento de la idea, hasta el momento de la aplicación del dispositivo. No fue fácil conseguir todo el material, por costo, por logística, por mi ubicación geográfica, por los espacios de trabajo, y por el desarrollo conceptual que en virtud fue el gran soporte del estudio realizado.

Construir una celda no tiene grandes complicaciones, salvo que no exista una habilidad manual y las herramientas necesarias para su desarrollo. Sin embargo, la pesquisa técnica de diferentes modelos de electrolizadores fue de gran auxilio para llegar a un diseño estándar y funcional. Ya en un segundo momento y enfocado a los test de la celda, fue posible encontrar un 73% de eficiencia para la producción de gas HHO a un consumo de corriente de 7,5 A cuando la solución electrolítica es de hidróxido de sodio al 15% p/v.

En un tercer y último momento, luego de la instalación del electrolizador en el vehículo, se consiguen realizar tres pruebas de aplicación de la celda, para entonces conocer los cambios producidos al combinar combustible convencional y gas HHO. El nuevo rendimiento alcanzado en función al consumo de combustible, bordea el 93% para una gasolina aditivada con un teórico de 25% de etanol, por otro lado con el análisis de gases pós combustión fue posible confirmar lo anterior en base al registro de una doble dilución de los gases CO + CO₂ sin la presencia de productos de combustión incompleta, ósea sin producción de gases poluentes fuera de norma. Finalmente, se comprueba a través de un escáner, los diferentes parámetros que ayudaron a entender los cambios que realiza la central electrónica para mantener el motor encendido de manera convencional y de forma híbrida. Por ejemplo, cuando se activa el electrolizador, la central electrónica automáticamente envía la señal al sensor TPS para dejar entrar más aire a la cámara de combustión, paralelamente los tiempos de inyección disminuyen por la presencia de este gas HHO y evidentemente la señal que envía el sensor lambda 2, nos confirma una baja concentración de oxígeno después del catalizador, indicando que la combustión híbrida es aún mejor cuando se usa un electrolizador de gas HHO.

REFERENCIAS

ADÃO, É. C. Motores de Combustão Interna. **Editora e Distribuição Educacional, Londrina**. p. 214. 2019

AL-ROUSAN, AMMAR A. Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into in take manifold. **International Journal Of Hydrogen Energy**, Mutah, p. 12930-12935. 2010. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/251580451_Reduction_of_fuel_consumption_in_gasoline_engines_by_introducing_HHO_gas_into_intake_manifold. Acceso: 15 Sep 2021

ANTUNES, E. G., PENTEADO, F. C., & GIBIN, R. **Estudo e Experimento sobre kit Gerador de Hidrogênio Aplicado no Motor Ciclo Otto**. Trabajo de Graduación, Centro Paula Souza, Faculdade de Tecnologia, Mecânica Automobilística, Santo André – SP, p. 1-69, 2017. Disponible en: <http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC478.pdf>. Acceso: 10 Sep 2021

BARBOSA, C. H., & MACHADO, J. H. Redução de consumo de combustível convencional pela adição de gás hidrogênio. **Revista Caleidoscópio**, Guarulhos – SP, 8(1), 1–12. 2016. Disponible em: <https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais/article/view/416>. Acceso: 11 Sep 2021.

BELTRAN, N. R.; CARMEN, L. L. **Determinación de la densidad de corriente y distancia entre electrodos óptimos para la producción de hidrogeno en un reactor tubular**. 2017. Trabajo de Graduación, Universidad Nacional del Centro de Perú. Facultad de Ingeniería Química, Huancayo. 2017. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3784/Beltran%20Beltran-Carmen%20Romero.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acceso: 04 Mai. 2021

BERNAL, D. C., ALMEYDA, L., POMA, F. S., LINARES, C., & HUAVIL, M. F. Diseño y Construcción del Sistema Generador de Hidrógeno para Embarcaciones Pesqueras. **Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção**, Curitiba, 7(12), 92–100, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.5380/relainep.v7i12.70709>. Acceso: 25 Ago 2020

BRUNETTI, F. Motores combustão interna. v.1. 3 ed. São Paulo: **Bluecher**, 2015 reimpressão. Disponible en: https://www.academia.edu/27538485/Motores_de_Combustao_Interna_Brunetti. Acceso: 25 Ago 2021

BRUNETTI, F. Motores de combustão interna. v. 2. 1. ed. São Paulo: **Blucher**, 2012. Disponible en: https://www.academia.edu/27538485/Motores_de_Combustao_Interna_Brunetti. Acceso: 25 Ago 2021

BOCKRIS, J. O'M. et al. Comprehensive Treatise of Electrochemistry. Vol 2. **Plenum Press**, New York, 1981. Disponible en:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ange.19820940540>. Acceso: 25 Ago 2021

DE FATIMA, D. D. **Produção de Hidrogênio por Eletrólise Alcalina da Água e Energia Solar**. Dissertação, Faculdade de Engenharia Química. Universidade Federal Uberlândia, Uberlândia. 2016. Disponible en: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21286/1/Produ%C3%A7%C3%A3oHidrog%C3%AAnioEletr%C3%B3lise.pdf>. Acceso: 15 Sep 2021

DE JESUS, A., & DA SILVA, V. (2010). **Análise da Emissão de Poluentes dos Veículos flexíveis no Período de Transição de Combustíveis**. Trabajo de Graduación, Monografía, Centro Paula Souza, Faculdade de Tecnologia, Tecnologia em Autotrónica, Santo André – SP, p. 1- 58. 2010. Disponible en: <http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC044.pdf>. Acceso: 10 Sep 2021

DE OLIVEIRA, M. M. **Análise das Variações em Ciclos Operacionais em um Motor Otto em Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI)**. Trabajo de Graduación, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica. 2015. Disponible em: <https://doi.org/10.1590/s0102-33061996000200018>. Acceso: 10 Sep 2021.

FICHA TÉCNICA CHEVROLET. Disponible en: <https://www.chevrolet.com.br/content/dam/chevrolet/mercosur/brazil/portuguese/index/services/owner-manuals/05-pdf/classic/manual-classic-2009.pdf>. Acceso: 18 Oct 2021

GARCÍA, J. A. **Diseño y Construcción de Electrolizador de Agua para la Obtención de Oxihidrogeno como Gas Combustible**. Trabajo de Graduación, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Azcapotzalco, p. 1- 107, 2013. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/11800>. Acceso: 11 oct. 2017.

GILLIAM, R., GRAYDION, J., KIRK, D., & S., T. (2007). review of specific conductivities of potassium hydroxide solutions for various concentrations and temperatures. **Int. J. Hydrogen Energy**, 359-364. Disponible en: <http://mhdlab.pro/wp-content/uploads/2015/12/%D0%A3%D0%B4%D0%B5%D0%B%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F-%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C-%D0%9A%D0%9E%D0%9D-2007-2-1.pdf>. Acceso: 13 Jun 2021

JUMA, D. A., & MARTÍNEZ, H. W. **Diseño e Instalación de un Sistema de Alimentación Gasolina-HHO en el Motor de Combustión Interna del Vehículo Monoplaza tipo Buggy del Laboratorio de Mecánica de patio de la ESPE Extensión Latacunga**. Trabajo de Graduación, Departamento de Energía y Mecánica, Ingeniería Automotriz, Universidad de las Fuerzas Armadas, p. 1-122, 2015. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/10023> Acceso: 05 Jun 2021

KNOB, D. **Geração de Hidrogênio por Eletrólise da Água Utilizando Energia Solar Fotovoltaica**. Disertación para el grado Magister em Ciencias, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, p. 1-125. 2013. Disponible en: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-11062014-143621/pt-br.php>. Acceso: 12 Mar 2021

MOMIRLAN, M., VEZIROGLU, T. N. Current status of hydrogen energy. In **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 6, n. 1–2, p. 141-179, 2002. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00004-7). Acceso: 02 Maio. 2021.

LÉO MACHADO, F. et al. Detecção de CO e CO₂ emitidos por um motor a gasolina de ciclo otto. **Revista Perspectivas Online: Exatas & Engenharia**. v.7, n. 18, p. 15-21, 2017. Disponible en: DOI: 10.25242/885x71820171193. Acceso: 18 Sep 2021

OSORIO, F., MOREIRA, K., & ARAUJO, R. (2014). **Estudo da aplicação de hidrogênio e gasolina em motor ciclo Otto**. Trabajo de Graduación, Monografía, Universidade São Francisco, Engenharia Mecânica e Automação de Sistemas Itatiba, p.42. 2014. Disponible en: <http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/2629.pdf> Acceso: 10 Sep 2021

PEREIRA, V; et al. Gerador de Hidrogênio aplicado a Motor a Combustão Interna Ciclo Otto. **XV Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**. p. 1-14. Disponible en: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos18/30426360.pdf>. Acceso: 02 Maio 2021.

PI AMORÓS, G. **Sistema de Aprovechamiento de la Energía de las Olas del Mar**. Trabajo de Graduación, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2010, p.127–129. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099.1/10019>. Acceso: 31 Ago 2021.

QUEZADA, E. M., & TORRES, D. F. **Implementación de un generador de celda seca hidrógeno en un vehículo chevrolet steem 1.6L**. 2014. Trabajo de Graduación, Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, 2014. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7354/1/UPS-CT004305.pdf>. Acceso: 11 Mai. 2020.

RIVERA, E. F. **Celda seca electrolítica para la obtención de hidrógeno con aguas residuales de la empresa de muebles León**. 2015. Trabajo de Graduación, Universidad técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en sistemas Electrónica e Industrial, Ambato, 2015. **Disponible en:** Acceso: 22 Mai. 2020.

RODRIGUEZ, D. **Módulo 1 Nociones Básicas de la Electricidad** 2016. p.1- 17. il. Disponible en: <https://docplayer.es/62715155-Modulo-1-nociones-basicas-de-la-electricidad.html>. Acceso: 01 Jun 2021

ROMERO, P. J. **Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción**. Trabajo de Graduación, Universidad de Valladolid, Escuelas de Ingenierías Industriales, vallaloloid, 2018. p.1- 134. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/31495>. Acceso: 01 Jun 2021

ROSSATO, V. (2013). **Dimensionamento da Capacidade de Produção de Hidrogênio a partir da Energia Vertida Turbinável de Itapu e sua Utilização em Veículos Automotivos**. Trabajo de Graduación, Universidade Federal do Paraná, Tecnólogo em Combustíveis, Palotina, p. 1-61. 2013

SÁNCHEZ, C., & BIZZO, W. **Estequiometria das Reações de Combustão**. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, pp. 1–27. 2010. Disponible em: <https://docente.ifrn.edu.br/hanniefreitas/disciplinas/tecnologia-de-producao-de-bioma-ssa-energetica/estqueiometria-da-combustao-e-analise-energetica-de-combustiveis>. Acceso: 10 sep 2021

SEE, D., & WHITE, R. (1997). Temperature and concentration dependence of the specific conductivity of concentrated solutions of potassium hydroxide. **J. Chem. Eng. Data**, 1266–1268. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/je970140x>. Acceso: 10 Sep 2021

SILVEIRA, V. F. **Avaliação de Injeção de Gás HHO em um Gerador a Gasolina para Fins de Energização Rural**. Trabalho de Dissertação, Universidade Estadual do Oeste de Paraná. Centro de Ciências exatas e tecnológicas. Cascavel. 2012. p.1-67. Disponible en: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/830>. Acceso: 07 Sep 2021

SUÁREZ, A. W. **Diseño de una Aplicación Informática para la Titulación Conductimétrica**. Trabajo de Graduación, Universidad de Ecuador, Facultad de Ingeniería Química, Quito. 2017. p. 1-86. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/11536/1/T-UCE-0017-0032-2017.pdf>. Acceso: 03 Jun 2021

SOUZA, S. N. M. **Aproveitamento de Energia Hidroelétrica Secundaria para a Produção de Hidrogênio Eletrolítico**. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação de Planejamento de Sistemas Energéticos, Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998. Disponible en: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CAMP_bd217b288e433a262a36f08bdeac5fd7/Details. Acceso: 10 Sep 2021

TIBARQUIRÁ, J., & POSNER, J. Diseño y Construcción de una Celda de Combustible tipo Membrana de Intercambio Protónico. **Sciencia et Technica**, Pereira, 2009, v.2, n.42, p. 75–80. Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revista-ciencia/issue/view/209>. Acceso: 11 oct. 2020

VERMEERSCH, J. I. **Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua**. 2018. Trabajo de Graduación, Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Santiago, 2018. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/152701/Dise%C3%B1o-y-construcci%C3%B3n-de-una-celda-demostrativa-para-la-producci%C3%B3n-de-hidr%C3%B3geno-a-partir-de-la-electr%C3%B3lisis-del-agua.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acceso: 02 Mai. 2021

VOGEL, A. I. Química Analítica Qualitativa. **In Editora Mestre Jou**, 5^{ta} edición,

1981.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 307-326, 2010. Disponible en: https://www.epfl.ch/labs/tic/wp-content/uploads/2018/10/Art11_Alkaline-water-electrolysis.pdf. Acceso: 21 Mar 2021

YILMAZ, ALI CAN; ULUDAMAR, ERINC,; AYDIN, KADIR. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. **International Journal Of Hydrogen Energy**: elsevier, p. 1-7, 2010. Disponible en: doi:10.1016/j.ijhydene.2010.07.040. Acceso: 23 Ago 2021

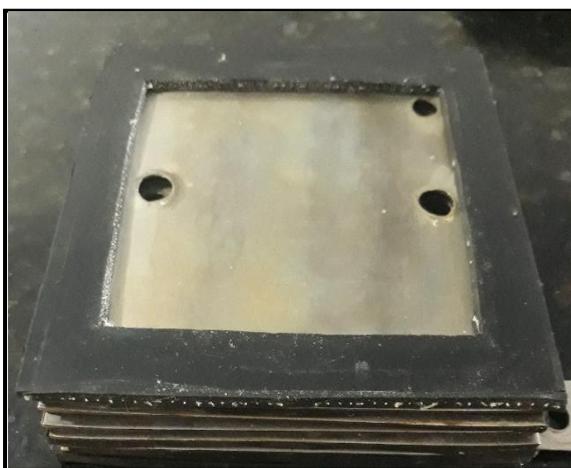
ZOSKI, C. G. Handbook of Electrochemistry. **Elsevier**, 2007. p. 3-29. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780444519580/handbook-of-electrochemistry#book-info>. Acceso: 03 Jun 2021

APÉNDICE

Piezas de la celda electrolítica seca



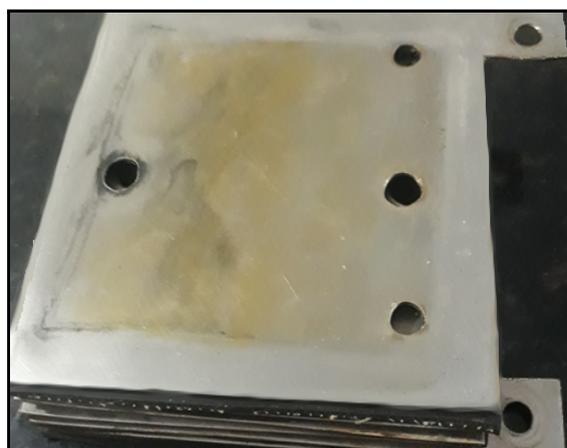
Tapa de Acrílico (Delantera)



Electrodo – Aislantes – Placas Neutras



Tapa Acrílico (Trasera)



Electrodos – Aislantes – Placas Neutras



Celda Electrolítica

ANEXO I

Constantes de acidez y basicidad a 25 °C

www.vaxasoftware.com

Ácido	Reacción	k_a	pK_a
Yodhídrico	$HI + H_2O \rightarrow I^- + H_3O^+$	Muy grande	Muy pequeña
Bromhídrico	$HBr + H_2O \rightarrow Br^- + H_3O^+$	Muy grande	Muy pequeña
Perclórico	$HClO_4 + H_2O \rightarrow ClO_4^- + H_3O^+$	Muy grande	Muy pequeña
Clorhídrico	$HCl + H_2O \rightarrow Cl^- + H_3O^+$	Muy grande	Muy pequeña
Sulfúrico	$H_2SO_4 + H_2O \rightarrow HSO_4^- + H_3O^+$	Muy grande	Muy pequeña
Nítrico	$HNO_3 + H_2O \rightarrow NO_3^- + H_3O^+$	Muy grande	Muy pequeña
Yódico	$HIO_3 + H_2O \rightleftharpoons IO_3^- + H_3O^+$	0,19	0,721
Sulfuroso	$H_2SO_3 + H_2O \rightleftharpoons HSO_3^- + H_3O^+$	0,016	1,796
Hidrogenosulfato	$HSO_4^- + H_2O \rightleftharpoons SO_4^{2-} + H_3O^+$	0,012	1,921
Cloroso	$HClO_3 + H_2O \rightleftharpoons ClO_3^- + H_3O^+$	0,011	1,96
Fosfórico	$H_3PO_4 + H_2O \rightleftharpoons H_2PO_4^- + H_3O^+$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	2,125
Fluorhídrico	$HF + H_2O \rightleftharpoons F^- + H_3O^+$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	3,155
Nitroso	$HNO_2 + H_2O \rightleftharpoons NO_2^- + H_3O^+$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	3,347
Fórmico	$HCOOH + H_2O \rightleftharpoons HCOO^- + H_3O^+$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	3,745
Benzoico	$C_6H_5COOH + H_2O \rightleftharpoons C_6H_5COO^- + H_3O^+$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	4,180
Acético	$CH_3COOH + H_2O \rightleftharpoons CH_3COO^- + H_3O^+$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	4,745
Carbónico	$H_2CO_3 + H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + H_3O^+$	$4,2 \cdot 10^{-7}$	6,377
Sulfhídrico	$H_2S + H_2O \rightleftharpoons HS^- + H_3O^+$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	7,000
Hipocloroso	$HClO + H_2O \rightleftharpoons ClO^- + H_3O^+$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	7,523
Dihidrógenofosfato	$H_2PO_4^- + H_2O \rightleftharpoons HPO_4^{2-} + H_3O^+$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	7,208
Amonio	$NH_4^+ + H_2O \rightleftharpoons NH_3 + H_3O^+$	$5,5 \cdot 10^{-10}$	9,260
Cianhídrico	$HCN + H_2O \rightleftharpoons CN^- + H_3O^+$	$4,0 \cdot 10^{-10}$	9,398
Hidrogenocarbonato	$HCO_3^- + H_2O \rightleftharpoons CO_3^{2-} + H_3O^+$	$5,6 \cdot 10^{-11}$	10,25
Hidrogenofosfato	$HPO_4^{2-} + H_2O \rightleftharpoons PO_4^{3-} + H_3O^+$	$2,2 \cdot 10^{-13}$	12,66
Hidrogenosulfuro	$HS^- + H_2O \rightleftharpoons S^{2-} + H_3O^+$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	13,00

Base	Reacción	k_b	pK_b
Hidróxido sódico	$NaOH \rightarrow Na^+ + OH^-$	Muy grande	Muy pequeña
Hidróxido potásico	$KOH \rightarrow K^+ + OH^-$	Muy grande	Muy pequeña
Etilamina	$CH_3CH_2NH_2 + H_2O \rightleftharpoons CH_3CH_2NH_3^+ + OH^-$	$6,41 \cdot 10^{-4}$	3,193
Metilamina	$CH_3NH_2 + H_2O \rightleftharpoons CH_3NH_3^+ + OH^-$	$3,70 \cdot 10^{-4}$	3,432
Amoniaco	$NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^-$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	4,752
Anilina	$C_6H_5NH_2 + H_2O \rightleftharpoons C_6H_5NH_3^+ + OH^-$	$4,27 \cdot 10^{-10}$	9,37

www.vaxasoftware.com

ANEXO II

Grado de disociación de electrolitos 0,1M en una solución acuosa

Acids	
Hydrochloric (H^+ , Cl^-)	0.92
Nitric (H^+ , NO_3^-)	0.92
Sulphuric (H^+ , HSO_4^-)	0.61
Phosphoric (H^+ , H_2PO_4^-)	0.28
Hydrofluoric (H^+ , F^-)	0.085
Acetic (H^+ , CH_3COO^-)	0.013
Carbonic (H^+ , HCO_3^-)	0.0017
Hydrosulphuric (H^+ , HS^-)	0.0007
Hydrocyanic (H^+ , CN^-)	0.0001
Boric (H^+ , H_2BO_3^-)	0.0001
Bases	
Sodium hydroxide (Na^+ , OH^-)	0.91
Potassium hydroxide (K^+ , OH^-)	0.91
Barium hydroxide (Ba^{2+} , 2OH^-)	0.81
Ammonia (NH_4^+ , OH^-)	0.013
Salts	
Potassium chloride (K^+ , Cl^-)	0.86
Sodium chloride (Na^+ , Cl^-)	0.86
Potassium nitrate (K^+ , Cl_3^-)	0.82
Silver nitrate (Ag^+ , NO_3^-)	0.82
Sodium acetate (Na^+ , CH_3COO^-)	0.80
Barium chloride (Ba^{2+} , 2Cl^-)	0.75
Potassium sulphate (2K^+ , SO_4^{2-})	0.73
Sodium carbonate (2Na^+ , CO_3^{2-})	0.70
Zinc sulphate (Zn^{2+} , SO_4^{2-})	0.40
Copper sulphate (Cu^{2+} , SO_4^{2-})	0.39
Mercuric chloride (Hg^{2+} , 2Cl^-)	<0.01
Mercuric cyanide (Hg^{2+} , 2CN^-)	very small

ANEXO III

2B POTENCIALES ESTÁNDARES A 25 °C

Potenciales en orden electroquímico

Hemirreacción de reducción	E° (V)	Hemirreacción de reducción	E° (V)
<i>Oxidante fuerte</i>			
$\text{H}_4\text{XeO}_6 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{XeO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$	+3,0	$\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{OH}^-$	+0,01
$\text{F}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{F}^-$	+2,87	$\text{Ti}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{3+}$	0,00
$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+2,07	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0, por definición
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{SO}_4^{2-}$	+2,05	$\text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,04
$\text{Ag}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}^+$	+1,98	$\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HO}_2^- + \text{OH}^-$	0,08
$\text{Co}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Co}^{2+}$	+1,81	$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,13
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1,78	$\text{In}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{In}$	-0,14
$\text{Au}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	+1,69	$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,14
$\text{Pb}^{4+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}^{2+}$	+1,67	$\text{AgI} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{I}^-$	-0,15
$2\text{HClO} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+1,63	$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,23
$\text{Ce}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ce}^{3+}$	+1,61	$\text{V}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{V}^{2+}$	-0,26
$2\text{HBrO} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Br}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+1,60	$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$	-0,28
$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	+1,51	$\text{In}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{In}$	-0,34
$\text{Mn}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}$	+1,51	$\text{Tl}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Tl}$	-0,34
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	+1,40	$\text{PbSO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$	-0,36
$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cl}^-$	+1,36	$\text{Ti}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{2+}$	-0,37
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	+1,33	$\text{In}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{In}^+$	-0,40
$\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{OH}^-$	+1,24	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,40
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1,23	$\text{Cr}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cr}^{2+}$	-0,41
$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+1,23	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,44
$\text{ClO}_4^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	+1,23	$\text{In}^{3+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{In}^+$	-0,44
$\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pt}$	+1,20	$\text{S} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{S}^{2-}$	-0,48
$\text{Br}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Br}^-$	+1,09	$\text{In}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{In}^{2+}$	-0,49
$\text{Pu}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Pu}^{3+}$	+0,97	$\text{Ga}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ga}$	-0,53
$\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$	-0,96	$\text{O}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{O}_2^-$	-0,56
$2\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}_2^{2+}$	+0,92	$\text{U}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{U}^{3+}$	-0,61
$\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$	+0,89	$\text{Se} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Se}^{2-}$	0,67
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}$	+0,85	$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,74
$\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+0,80	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,76
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	+0,80	$\text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd} + 2\text{OH}^-$	-0,81
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg}$	+0,79	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0,83
$\text{AgF} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{F}^-$	+0,78	$\text{Te} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Te}^{2-}$	-0,84
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,77	$\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,91
$\text{BrO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Br}^- + 2\text{OH}^-$	-0,76	$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}$	-1,18
$\text{MnO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$	+0,60	$\text{V}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{V}$	-1,19
$\text{MnO}_4^- + \text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_4^{2-}$	+0,56	$\text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ti}$	-1,63
$\text{I}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{I}^-$	+0,54	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1,66
$\text{I}_3^- + 2\text{e}^- \rightarrow 3\text{I}^-$	+0,53	$\text{U}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{U}$	-1,79
$\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,52	$\text{Be}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Be}$	-1,85
$\text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni}(\text{OH}) + \text{OH}^-$	+0,49	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,36
$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	+0,40	$\text{Ce}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Ce}$	-2,48
$\text{ClO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- + 2\text{OH}^-$	-0,36	$\text{La}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{La}$	-2,52
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	-0,34	$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2,71
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$	+0,27	$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}$	-2,87
$\text{AgCl} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Cl}^-$	+0,22	$\text{Sr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sr}$	-2,89
$\text{Bi}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Bi}$	+0,20	$\text{Ba}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ba}$	-2,91
$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	+0,17	$\text{Ra}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ra}$	-2,92
$\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^+$	+0,15	$\text{Cs}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cs}$	-2,92
$\text{Sn}^{4+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}^{2+}$	+0,15	$\text{Rb}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Rb}$	-2,93
$\text{AgBr} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Br}^-$	-0,07	$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2,93
		$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}$	-3,05
		<i>Reductor fuerte</i>	

Potenciales en orden alfabético

Hemirreacción de reducción	E° (V)	Hemirreacción de reducción	E° (V)
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	+0,80	$\text{In}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{In}^+$	-0,40
$\text{Ag}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}^+$	+1,98	$\text{In}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{In}^{2+}$	-0,49
$\text{AgBr} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Br}^-$	+0,07	$\text{In}^{3+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{In}^+$	-0,44
$\text{AgCl} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Cl}^-$	+0,22	$\text{In}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{In}$	-0,34
$\text{AgF} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{F}^-$	+0,78	$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2,93
$\text{AgI} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{I}^-$	-0,15	$\text{La}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{La}$	-2,52
$\text{Al}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1,66	$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}$	-3,05
$\text{Au}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	+1,69	$\text{Mg}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,36
$\text{Au}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	+1,40	$\text{Mn}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Mn}$	-1,18
$\text{Ba}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Ba}$	-2,91	$\text{Mn}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}$	+1,51
$\text{Be}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Be}$	-1,85	$\text{MnO}_2 + 4 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{Bi}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{Bi}$	+0,20	$\text{MnO}_4^- + \text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_4^{2-}$	+0,56
$\text{Br}_2 + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{Br}^-$	+1,09	$\text{MnO}_4^- + 8 \text{H}^+ + 5 \text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 4 \text{H}_2\text{O}$	+1,51
$\text{BrO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Br}^- + 2 \text{OH}^-$	+0,76	$\text{MnO}_4^{2-} + 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_2 + 4 \text{OH}^-$	+0,60
$\text{Ca}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Ca}$	-2,87	$\text{NO}_3^- + 2 \text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+0,80
$\text{Cd}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,40	$\text{NO}_3^- + 4 \text{H}^+ + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{NO} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0,96
$\text{Cd}(\text{OH})_2 + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cd} + 2 \text{OH}^-$	-0,81	$\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2^- + 2 \text{OH}^-$	+0,01
$\text{Ce}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{Ce}$	-2,48	$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2,71
$\text{Ce}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ce}^{3+}$	+1,61	$\text{Ni}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,23
$\text{Cl}_2 + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{Cl}^-$	+1,36	$\text{Ni}(\text{OH})_3 + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$	+0,49
$\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cl}^- + 2 \text{OH}^-$	+0,89	$\text{O}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{O}_2^-$	-0,56
$\text{ClO}_4^- + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	+1,23	$\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{ClO}_4^- + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- + 2 \text{OH}^-$	+0,36	$\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{HO}_2^- + \text{OH}^-$	-0,08
$\text{Co}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Co}$	-0,28	$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- \rightarrow 4 \text{OH}^-$	+0,40
$\text{Co}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Co}^{2+}$	+1,81	$\text{O}_3 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+2,07
$\text{Cr}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,91	$\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2 \text{OH}^-$	+1,24
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14 \text{H}^+ + 6 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{Cr}^{3+} + 7 \text{H}_2\text{O}$	+1,33	$\text{Pb}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,13
$\text{Cr}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,74	$\text{Pb}^{4+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Pb}^{2+}$	+1,67
$\text{Cr}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cr}^{2+}$	-0,41	$\text{PbSO}_4 + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$	-0,36
$\text{Cs}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cs}$	-2,92	$\text{Pt}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Pt}$	+1,20
$\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,52	$\text{Pu}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Pu}^{3+}$	+0,97
$\text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,34	$\text{Ra}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Ra}$	-2,92
$\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^+$	+0,15	$\text{Rb}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Rb}$	2,93
$\text{F}_2 + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{F}^-$	+2,87	$\text{S} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{S}^{2-}$	-0,48
$\text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,44	$\text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	+0,17
$\text{Fe}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,04	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{SO}_4^{2-}$	+2,05
$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0,77	$\text{Se} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Se}^{2-}$	-0,67
$\text{Ga}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ga}$	-0,53	$\text{Sn}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,14
$2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0, por definición	$\text{Sn}^{4+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Sn}^{2+}$	+0,15
$2 \text{HBrO} + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Br}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,60	$\text{Sr}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Sr}$	-2,89
$2 \text{HClO} + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,63	$\text{Te} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Te}^{2-}$	-0,84
$2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$	-0,83	$\text{Ti}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}$	-1,63
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,78	$\text{Ti}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{2+}$	-0,37
$\text{H}_4\text{XeO}_6 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{XeO}_3 + 3 \text{H}_2\text{O}$	+3,0	$\text{Ti}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{3+}$	0,00
$\text{Hg}_2^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{Hg}$	+0,79	$\text{Tl}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Tl}$	-0,34
$\text{Hg}_2^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Hg}$	-0,85	$\text{U}^{3+} + 3 \text{e}^- \rightarrow \text{U}$	-1,79
$2 \text{Hg}_2^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Hg}_2^{2+}$	+0,92	$\text{U}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{U}^{3+}$	-0,61
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{Hg} + 2 \text{Cl}^-$	+0,27	$\text{V}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{V}$	-1,19
$\text{I}_2 + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{I}^-$	+0,54	$\text{V}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{V}^{2+}$	0,26
$\text{I}_3^- + 2 \text{e}^- \rightarrow 3 \text{I}^-$	+0,53	$\text{Zn}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,76
$\text{In}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{In}$	-0,24		