

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica

Tesis

**Diseño de un generador de hidrógeno para optimizar  
la combustión de un motor Volkswagen 1.5 L  
en la ciudad de Huancayo**

Pablo Martin Baltazar Ortega

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Mecánico

Huancayo, 2020

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## **AGRADECIMIENTO**

Debo dar gracias a Dios, por guiar e iluminar mi camino, mi vida y mi profesión como ingeniero a la cual aspiro, y por el apoyo incondicional de mis padres a los que quiero mucho.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado con mucho cariño a mis queridos padres que me brindaron su apoyo incondicional y porque forjaron mi futuro, a ellos con todo el amor de mi vida.

# ÍNDICE

Agradecimiento	ii
Dedicatoria	iii
Índice	iv
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Introducción	xv
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>16</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO</b>	<b>16</b>
1.1. Planteamiento y formulación del problema	16
1.1.1. Planteamiento del problema	16
1.1.2. Formulación del problema	17
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo general	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
1.3. Justificación e importancia	18
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>19</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>19</b>
2.1. Antecedentes del problema	19
2.2. Bases teóricas	23
2.2.1. Energía	23
2.2.2. Energías alternativas	24
2.2.3. Tipos de energías	24
2.2.4. Clasificación de la fuente de energía	25
2.2.5. Hidrógeno	26
2.2.6. Electrolisis	37
2.3. Datos técnicos del motor Volkswagen 1.5 L	61
2.3.1. Parámetros de funcionalidad del motor Volkswagen	62
2.3.2. Ciclo Otto – encendido por chispa	66
2.3.3. Eficiencia térmica del ciclo Otto	67

2.3.4. Entalpía de formación y entalpía de combustión -----	68
2.3.5. Poder calorífico del combustible -----	70
2.3.6. Gasto del aire -----	71
2.3.7. Otros parámetros efectivos -----	81
2.3.8. Parámetros de pérdidas mecánicas -----	81
2.3.9. Parámetros indicados -----	82
2.3.11. Parámetros geométricos -----	83
2.3.12. Pernos (sujetadores) -----	84
2.5. Definición de términos básicos -----	88
2.5.1 Definiciones básicas -----	88
2.5.2. Simbología básica -----	88
2.5.3. Subíndices -----	89
<b>CAPÍTULO III -----</b>	<b>91</b>
<b>METODOLOGÍA -----</b>	<b>91</b>
3.1. Método aplicativo para el desarrollo del diseño de la solución -----	91
3.1.1. Planteamiento del diseño -----	91
3.1.2. Concepción de la solución -----	93
<b>CAPÍTULO IV -----</b>	<b>98</b>
<b>ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN -----</b>	<b>98</b>
4.1. Identificación de requerimientos -----	98
4.1.1. Lista de exigencias -----	98
4.1.2. Estructura de funciones -----	100
4.1.3. Secuencia de funciones -----	101
4.1.4. Fijación de los procesos técnicos -----	101
4.1.5. Representación de la estructura de función-caja blanca -----	102
4.2. Análisis de la solución -----	103
4.2.1. Matriz morfológica -----	103
4.2.2. Determinación del proyecto preliminar -----	104
4.2.3. Evaluación técnico-económica -----	106
4.3. Diseño -----	109
4.3.1 Cálculos del ciclo de trabajo del motor Volkswagen 1.5 L -----	109
4.3.2. Cuerpo del generador -----	117
4.3.3. Implementación del generador al motor Volkswagen -----	134

<b>CAPÍTULO V</b>	<b>138</b>
5.1. Construcción	138
5.1.1. Conformación del generador de hidrógeno	140
5.1.2. Consideraciones generales del cuerpo del generador	141
5.2. Pruebas y resultados	144
5.2.1. Pruebas	144
5.2.2. Resultados	145
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>149</b>
6.1. Estimación de costos	149
Conclusiones	151
Recomendaciones	153
Trabajos futuros	154
Bibliografía	155
Anexos	159

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción de hidrógeno .....	25
Figura 2. Clasificación de fuentes de energía .....	25
Figura 3. Densidad relativa del hidrógeno y gasolina.....	29
Figura 4. Energía mínima de chispa hidrógeno-aire.....	30
Figura 5. Concentración de hidrógeno y sus límites de detonación .....	30
Figura 6. Temperatura de autoignición de los combustibles .....	31
Figura 7. Límites de explosividad del hidrógeno LIE y LSE.....	32
Figura 8. Antecedentes del hidrógeno.....	34
Figura 9. Regla de octeto, iones negativo y positivo .....	38
Figura 10. Proceso básico de electrolisis .....	39
Figura 11. Aplicación de la electrolisis.....	40
Figura 12. Proceso de oxidación y reducción.....	47
Figura 13. Semirreacciones oxidación y reducción .....	48
Figura 14. Potencial eléctrico del hidrógeno.....	49
Figura 15. Energía potencial del Cu .....	50
Figura 16. Energía potencial del Zn .....	51
Figura 17. Energía potencial eléctrica de la reacción .....	52
Figura 18. Diferencias de electrodos entre la pila y la electrolisis .....	55
Figura 19. Entalpía de formación estándar.....	57
Figura 20. Algunos valores de energía de enlace .....	58
Figura 21. Relación S/D y su aplicación.....	63
Figura 22. Ciclo real e ideal de motores de encendido por chispa.....	66
Figura 23. Eficiencia térmica .....	68
Figura 24. Relación de parámetros de rendimientos $i$ , $e$ , $p_m$ .....	83
Figura 25. Geometría del pistón, biela y cigüeñal .....	84
Figura 26. Sujetador .....	85
Figura 27. Dimensiones del sujetador .....	85
Figura 28. Caja negra.....	100
Figura 29. Procesos técnicos .....	102
Figura 30. Estructura de funciones.....	102
Figura 31. Solución 1.....	104
Figura 32. Solución 2.....	105



Figura 33. Solución 3.....	106
Figura 34. Diagrama técnico-económico .....	108
Figura 35. Generador de hidrógeno .....	117
Figura 36. Reacción de la sal con agua .....	127
Figura 37. Reacción del hidróxido de sodio más agua.....	128
Figura 38. Junta de caucho .....	138
Figura 39. Electrodo de acero inoxidable .....	139
Figura 40. Diseño final del generador de hidrógeno.....	141
Figura 41. Recipiente o tanque del electrolito .....	142
Figura 42. Interruptor eléctrico .....	143
Figura 43. Batería 12 V .....	143
Figura 44. Sistema eléctrico del generador de hidrógeno .....	144

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del hidrógeno y otros combustibles .....	29
Tabla 2. Rango de inflamabilidad del hidrógeno y otros gases .....	32
Tabla 3. Comparación de energía almacenada.....	35
Tabla 4. Iones positivos y negativos.....	37
Tabla 5. Resistividad de algunos materiales .....	46
Tabla 6. Energía libre de Gibbs.....	53
Tabla 7. Pila galvánica vs electrolisis .....	54
Tabla 8. Entalpía de formación estándar $\Delta H^\circ$ (KJ/mol) .....	59
Tabla 9. Clasificación del motor de acuerdo con su S/D .....	63
Tabla 10. Límites de relación de compresión.....	64
Tabla 11. Dosado estequiométrico de los combustibles más comerciales.....	66
Tabla 12. Entalpía de formación hf.....	70
Tabla 13. Propiedades de los combustibles más utilizados .....	71
Tabla 14. Densidad del aire con relación a su nivel de altura .....	76
Tabla 15. Lista de exigencias .....	92
Tabla 16. Desarrollo del proyecto.....	92
Tabla 17. Caja negra.....	93
Tabla 18. Matriz morfológica .....	94
Tabla 19. Lista de exigencias .....	99
Tabla 20. Matriz morfológica .....	103
Tabla 21. Evaluación técnica de los proyectos preliminares .....	107
Tabla 22. Evaluación económica de los proyectos preliminares .....	108
Tabla 23. Áreas de esfuerzo de tensión de pernos .....	120
Tabla 24. Espesor de arandela según diámetro de perno.....	121
Tabla 25. Dimensiones de tuercas .....	122
Tabla 26. Módulo de elasticidad E .....	123
Tabla 27. Resistencia de prueba mínima para pernos SAE .....	125
Tabla 28. Propiedades mecánicas del acero inoxidable.....	139
Tabla 29. Parámetros característicos del motor Volkswagen.....	145
Tabla 30. Producción de hidrógeno.....	146
Tabla 31. Producción de oxígeno.....	146

Tabla 32. Potencia requerida para 1 kg de hidrógeno.....	147
Tabla 33. Volumen del hidrógeno a partir de 1 kg.....	147
Tabla 34. Volumen de oxígeno a partir de 1 kg.....	148
Tabla 35. Resultados del analizador de gases JEVOL, con gasolina y con hidrógeno.....	148
Tabla 36. Lista de requerimientos y sus costos.....	149
Tabla 37. Costos adicionales .....	150
Tabla 38. Costo total de fabricación .....	150

## RESUMEN

Hoy en día existen muy serios problemas climáticos que están atentando al medio ambiente, como es el uso de vehículos que funcionan con algún hidrocarburo y en consecuencia emiten gases tóxicos que dañan al planeta como es el CO<sub>2</sub> y, como efecto negativo se genera el efecto invernadero, ocasionando el deshielo de las grandes reservas de glaciares, la extinción de animales, la alteración de las aguas, y entre otros problemas muy serios.

La tecnología de los motores de combustión interna, presentan ciertos problemas como su eficiencia térmica y su alto grado de contaminación que producen. En la actualidad se crearon procesos limpios como eléctricos y químicos lo cual permitieron conseguir energías del agua. La electrolisis se conoce como un proceso electroquímico la producir y obtener hidrógeno y oxígeno, cuya combinación de 2 a 1 se obtiene el Oxihidrogeno (HHO). Esta molécula del HHO disminuye en gran porcentaje los gases emanados por la quema de combustible que está presente en el medio ambiente. Este trabajo de investigación permitirá conocer los beneficios positivos del HHO como uso en la mezcla de la combustión, en nuestro estudio la gasolina. Se explica y se describe el sistema como un diseño de celdas electrolíticas y se calcula los parámetros del motor Volkswagen de 1.5 L como la eficiencia térmica, procesos químicos de combustión, porcentajes de gases contaminantes (ppm).

Como aditivo en el proceso de combustión en el motor de combustión interna se ha diseñado un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen 1.5 L en la ciudad de Huancayo, para diseñar el generador de hidrógeno, se ha investigado el comportamiento y características del hidrogeno con respecto a su relación de energía y peso con cualquier otro hidrocarburo, que produce poca contaminación al medio ambiente, ya que hay liberación de vapor de agua en la combustión, con este proceso se podrá ahorrar millones de toneladas en consumo de combustible.

Las celdas del generador de hidrogeno alimentará a la combustión del combustible, que fue generado por la electricidad, esta mezcla será de combustible, Hidrógeno y Oxígeno. Este proceso químico no generará alguna toxicidad ni formará ozono. Con este diseño se quiere conseguir que el MCI obtenga un mayor rendimiento con respecto a emisiones de gases y sea ecológico.

La finalidad es diseñar y construir un generador de hidrógeno para tener un impacto positivo económico y medio ambiental, este trabajo será elaborado con materiales disponibles y muy accesibles, utilizando los recursos disponibles del medio ambiente como hidrógeno y oxígeno.

La metodología por aplicar y desarrollar en la presente tesis se basa en las recomendaciones disciplinarias y técnicas de la Norma VDI (Asociación Alemana de Ingenieros) la cual ha construido un sistema y conjunto de reglamentos técnicos, que cubren ampliamente el campo de las tecnologías, medio ambiente, energía, seguridad, ingeniería, entre otras especialidades.

**Palabras clave:** combustión, diseño, estructura, motor

## **ABSTRACT**

Today there are very serious climatic problems that are affecting the environment, such as the use of vehicles that work with some hydrocarbon and consequently emit toxic gases that damage the planet such as CO<sub>2</sub> and, as a negative effect, the greenhouse effect is generated. , causing the melting of the great reserves of glaciers, the extinction of animals, the alteration of the waters, and among other very serious problems.

The technology of internal combustion engines presents certain problems such as their thermal efficiency and the high degree of pollution they produce. At present, clean processes such as electrical and chemical were created, which made it possible to obtain energy from water. Electrolysis is known as an electrochemical process to produce and obtain hydrogen and oxygen, whose combination of 2 to 1 is obtained Oxyhydrogen (HHO). This HHO molecule greatly reduces the gases released by the burning of fuel that is present in the environment. This research work will allow us to know the positive benefits of HHO as a use in the combustion mixture, in our study gasoline. The system is explained and described as an electrolytic cell design and the parameters of the 1.5 L Volkswagen engine are calculated, such as thermal efficiency, chemical combustion processes, percentages of polluting gases (ppm).

As an additive in the combustion process in the internal combustion engine, a hydrogen generator has been designed to optimize the combustion of a Volkswagen 1.5 L engine in the city of Huancayo, to design the hydrogen generator, the behavior and characteristics have been investigated of hydrogen with respect to its energy and weight ratio with any other hydrocarbon, which produces little pollution to the environment, since there is release of water vapor during combustion, with this process it will be possible to save millions of tons in fuel consumption..

The cells of the hydrogen generator will feed the combustion of the fuel, which was generated by electricity, this mixture will be of fuel, Hydrogen and Oxygen. This chemical process will not generate any toxicity or form ozone. With this design we want to achieve that the MCI obtains a higher performance with respect to gas emissions and is ecological.

The purpose is to design and build a hydrogen generator to have a positive economic and environmental impact, this work will be prepared with available and highly accessible materials, using available resources from the environment such as hydrogen and oxygen.

The methodology to be applied and developed in this thesis is based on the disciplinary and technical recommendations of the VDI Standard (German Association of Engineers) which has built a system and set of technical regulations, which broadly cover the field of technologies, medium environment, energy, security, engineering and among other specialties.

**Keywords:** combustion, design, engine, structure

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de investigación se detallan las consideraciones generales del “*Diseño de un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen 1.5 L en la ciudad de Huancayo*”, también se detallan algunas consideraciones de la contaminación ambiental que producen los vehículos y una de las formas de cómo controlar y solucionar este problema.

Una alternativa es la producción del hidrógeno, este como energía limpia no produce reacciones del CO<sub>2</sub> (efecto invernadero) ya que solo libera vapores de agua, por lo tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub> son reducidas, lo que permite un mejor control del medio ambiente en Huancayo.

El reactor que se propone diseñar y construir es un dispositivo que consta de varias partes, que se diseñará, cada una de ellas, teniendo en cuenta las medidas y dimensiones, características, especificaciones técnicas y los materiales a utilizar; para ello se utilizará el software AutoCAD, la misma que servirá de apoyo para el diseño y los planos respectivos de cada uno de los componentes.

Posteriormente, se realizará la construcción y el ensamble preliminar de todos los elementos, lo cual permitirá realizar el pre y posprueba de funcionamiento del reactor para luego hacer las pruebas reales en el vehículo, del cual se obtendrán datos para su respectivo procesamiento que seguidamente se contrastarán los resultados obtenidos con el analizado de gases Jevol.



# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### **1.1. Planteamiento y formulación del problema**

#### **1.1.1. Planteamiento del problema**

El ser humano está agotando las fuentes naturales no renovables de energía; ante ello, es necesario plantear el uso de energías alternativas como es el caso del hidrógeno ya que existe en grandes cantidades como componente del agua y que a través de muchos procesos adecuados se puede obtener como un elemento sostenible y de gran aporte como parte de un combustible alternativo de bajo impacto a la contaminación ambiental, ya que reducirá las emisiones del CO<sub>2</sub>, y que además será un aporte eficaz como fuente energética para el buen rendimiento y funcionamiento de los MCI de vehículos motorizados como automóviles, motocicletas, entre otros vehículos de transporte en la ciudad de Huancayo.

Huancayo presenta problemas de calidad del aire, siendo el principal contaminante el material particulado (MP). El crecimiento acelerado del parque automotor en Junín no solo genera caos vehicular, también contribuye a la contaminación del aire por los gases tóxicos que emanan los vehículos y, sobre todo, se incrementan los índices de contaminación del medio ambiente producido por el incremento de los vehículos motorizados.

El hidrógeno es un tipo de energía limpia y se puede disponer de reservas

suficientes, para garantizar la reducción de gases contaminantes por la combustión que generan los vehículos haciendo de este elemento gaseoso muy importante con respecto al impacto ambiental que hoy en día se vive.

### **1.1.2. Formulación del problema**

#### **A) Problema general**

¿Cómo diseñar un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen 1,5 L en la ciudad de Huancayo?

#### **B) Problemas específicos**

- ✓ ¿Cómo diseñar un generador de hidrógeno siguiendo la metodología alemana VDI?
- ✓ ¿Cómo calcular y seleccionar los componentes del generador de hidrógeno para el motor Volkswagen de 1,5 L?
- ✓ ¿Cómo realizar pruebas de funcionamiento del generador de hidrógeno en un motor de carburador de 1,5 L?
- ✓ ¿Cómo obtener resultados esperados de optimización del proceso de disminución de ppm en la combustión del MCI?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Diseñar un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen 1.5 L en la ciudad de Huancayo.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- ✓ Diseñar un generador de hidrógeno teniendo como guía y referencia la metodología alemana de ingenieros VDI.
- ✓ Calcular y analizar los componentes básicos de funcionamiento del generador de hidrógeno.
- ✓ Realizar pruebas de funcionamiento en el motor de carburador Volkswagen de 1.5 L con el generador de hidrógeno.
- ✓ Obtener resultados esperados de optimización del proceso de combustión (ppm) del MCI.

### 1.3. Justificación e importancia

La congestión vehicular<sup>1</sup> y la contaminación ambiental son algunos de los problemas que ocasionan la gran cantidad de vehículos que sobrepasan los 70,000 y es conocido que el parque automotor de esta ciudad es uno de los más desfasados y contaminadores del país. Según un informe del Ministerio del Ambiente, Huancayo ocupa el sexto lugar en el *ranking* de las ciudades más contaminadas del país y es de entender que este puesto en gran parte se debe a los vehículos automotores que circulan por nuestra ciudad.

Esta cifra rebasa por completo la capacidad para el tránsito de las calles de Huancayo, generándose la congestión vehicular. La inmovilización de los vehículos por espacio de varias horas genera también una mayor contaminación, según informa el Consejo Nacional del Ambiente. Las congestiones son generadoras de la contaminación, un vehículo atrapado en un embotellamiento y con el motor encendido, genera más emisiones tóxicas debido a la combustión incompleta del MCI.

Este trabajo de investigación se justifica en el hecho de que el hidrógeno existe en grandes cantidades como componente del agua y que a través de un proceso de electrolisis como un fenómeno no espontáneo, artificial inducido por la persona, se busca obtener el hidrógeno como un elemento sostenible y de gran aporte como parte de un combustible alternativo limpio y de bajo impacto a la contaminación ambiental, ya que es preocupante el agotamiento de reservas de hidrocarburos, y el agotamiento de ciertos recursos naturales, y esto representará un beneficio económico; además, será un aporte para los estudiantes, instituciones, universidades con la finalidad de mejorar, estudiar y transmitir estos conocimientos como fuente de aprendizaje.

---

<sup>1</sup> Luis Suárez-Salas\*a, Daniel Álvarez Tolentino

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se mencionan las bases de investigación y desarrollo que se realizaron con anterioridad como base para el desarrollo de la presente tesis de investigación.

#### **2.1. Antecedentes del problema**

En el trabajo de grado titulado “*Construcción y adaptación de un sistema generador de gas de hidrógeno para suministrarlo a un motor de combustión interna*”. (1) En este trabajo de investigación se realiza la construcción de un sistema de generación de gas hidrógeno con lo cual da pautas para su diseño y construcción, así como los cálculos de cantidad de energía que ha de producir como combustible y se presenta al hidrógeno como alternativa energética sustentable inagotable y limpia para su uso y el montaje como parte del motor de combustión interna de un vehículo.

Este trabajo de investigación contiene los pasos para la construcción, el montaje y pruebas que se realizaron en el vehículo con la finalidad de verificar el funcionamiento del generador, modificando parámetros con el fin de llegar a una eficiencia mucho mayor en los electrolizadores. Para cumplir con este objetivo se necesita tener conocimientos que incluyan todas las capacidades de rendimiento y función que genera el motor de combustión interna así como la

disminución de la emisiones de gases producidas por las combustiones, una de las cosas más resaltantes es llegar a obtener una eficacia mayor, lo otro es identificar el electrolito más eficaz para la reacción química, por ultimo cálculos de corriente, resistencia de electrodos y su diseño final. (1)

En el trabajo de tesis titulado “*Generador de hidrógeno como reductor de gases, contaminantes para los motores KIA, en el tercero de bachillerato de la institución educativa particular ‘Latinoamericano’ en el sector de Lumbisi, año lectivo 2017-2018*”, (2) se manifiesta que la elaboración de este proyecto es de suma importancia, puesto que el estudio de este tema sobre la implementación de un generador de hidrógeno en los motores KIA, ha sido ejecutado con la finalidad de desarrollar, analizar los resultados técnicos, ambientales y económicos, para verificar el consumo de combustible, características y disminución de los gases contaminantes en el vehículo. La investigación es de campo que se apoya en herramientas de observación y experimentación, utilizando el método deductivo, base metodológica que permitió organizar pruebas y resultados, orientados al aprovechamiento de las propiedades del hidrógeno como combustible para adicionarlo al motor junto con la gasolina. (2)

En el artículo científico titulado “*Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna*”, (3) en una de sus conclusiones manifiesta que “la eficiencia obtenida para el motor de 110 cm<sup>3</sup> con la adición de gas HHO a la mezcla de combustión, se registraron valores de 0.87, y sin la adición del gas a la mezcla de 0.88. Estos valores indican una diferencia muy mínima, y que el sistema HHO disminuye ligeramente la eficiencia mecánica del motor. Se obtuvieron los valores de HP máximos alcanzados por el experimento, dando como resultado 7.605 HP a 7800 RPM sin el sistema de HHO, y 7.54 HP a 7700 RPM en un tiempo de 12 s y 13 s, respectivamente. Los resultados sin el sistema HHO son ligeramente mejores con relación a la potencia suministrada por el motor, obteniéndose como resultado un 88%, en contraste con un 87% de eficiencia obtenida con el sistema HHO. Mediante el análisis gráfico se mostró cómo la potencia y el torque disminuyen después de alcanzar sus puntos máximos más rápido en el sistema sin HHO”. (3)

En el artículo científico titulado “*Efecto del uso de hidrógeno en la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna*” (4) cuyo objetivo es disminuir las emisiones de gas contaminantes y obtener un mejor rendimiento en la potencia de los motores de combustión interna. La investigación del artículo se basa en el estudio de un motor generador accionado con un motor de un pistón. Este trabajo de investigación aporta la investigación y uso de energías renovables como el hidrógeno para funcionamiento de motores. (4)

En el trabajo de tesis doctoral titulado “*Adaptación de un motor de combustión interna alternativo de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno como combustible. Aplicaciones energéticas y de automoción*”, (5) cuyo objetivo principal es demostrar la viabilidad de la conversión de motores a gasolina para su funcionamiento con hidrógeno, este trabajo de investigación conduce a la visión y regulación de gases contaminantes, aplicando el hidrógeno a motores de combustión interna. El trabajo aporta con interés de parte de muchos profesionales con la intención de que en un futuro sea posible utilizar este elemento como una fuente de energía limpia y segura. (5)

En el trabajo de titulación “*Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrolisis*”, (6) se manifiesta en una de las conclusiones que para extraer hidrogeno de un litro de agua se obtiene en base a la energía de formación del agua líquida, a partir del hidrógeno y oxígeno moleculares, que es de 285,8 kJ/mol. 18 gramos de agua forman un mol, así que en un litro hay 55,56 moles de agua. Por lo tanto, la energía necesaria para separar 1 litro de agua por el proceso de electrolisis en sus componentes de oxígeno e hidrógeno es: 15793,31 kJ, esta cantidad corresponde a 4,39 kWh. Luego de la separacion de dos moles de agua se obtienen dos moles de hidrógeno y un mol de oxígeno; por lo tanto, de un litro de agua se obtienen 111,1 g H<sub>2</sub>. Este trabajo de investigación aporta mucho conocimiento técnico en la obtención del hidrógeno, ya que almacenar este tipo de gas conlleva mucha energía y costos altos, además toma en cuenta muchos factores para la obtención de hidrógeno como el diseño, tipo de materiales a usar en los electrodos y el almacenamiento de dicho gas. (6)

En el trabajo de tesis titulado “*Estudio del desempeño de un motor a gasolina operando con el combustible premezclado gasolina – hidrógeno*”, (7) se da a conocer como objetivo principal la realización de ensayos de la premezcla de combustibles el cual utiliza un banco de pruebas motor-volante.

En este trabajo se menciona la importancia de reducir los gases contaminantes como el  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_x$ , e hidruros no quemados que influyen negativamente al medio ambiente, es por ello que se realizan pruebas de operación, rendimiento, con el premezclado de hidrógeno y el combustible, como una de sus conclusiones demostró que el motor al operar con mezcla aire-combustible enriquecido, desarrolla una mayor potencia que cuando se opera con mezcla pobre (en el régimen de máxima aceleración), tal y como lo señalan sus resultados. La primera secuencia, operando con una mezcla pobre obtuvo menor cantidad de emisiones contaminantes y menor potencia máxima del motor, la segunda con una mezcla rica desarrolló una mayor potencia, pero con una disminución pequeña en la emisión de gases de escape, exceptuando los hidrocarburos cuyos resultados no fueron concluyentes. (7)

En el trabajo de tesis titulado “*Diseño de un generador de hidrógeno como combustible para los motores de combustión de ciclo Otto en la región Puno 2015*”, (8) explica que el Hidrógeno es muy importante como un medio energético y ambiental, Otro de sus planteamientos es diseñar un generador de hidrógeno para ser utilizado en vehículos MCI de ciclo Otto.

También, en una de sus conclusiones, manifiesta que el “hidrógeno por sus propiedades y por su abundancia, constituye una excelente alternativa energética para el futuro”, siendo trascendental en este tema “su fase inicial y muy temprana para emplearlo en el medio, enfocándose a potenciar y concientizar el uso de energías renovables que hasta ahora siguen avanzando, no solo por la salud humana, sino que también para futuras generaciones”. (8)

El impacto positivo del hidrógeno demostró que sus propiedades físicas y químicas, en funcionamiento con los motores de Otto, tiene que ser adaptado y diseñado para la capacidad de liberación de energía en la combustión. (8)

En el trabajo de tesis titulado “*Determinación de la densidad de corriente y distancia entre electrodos óptimos para la producción de hidrógeno en un reactor tubular*”, (9) se tiene como objetivo principal la producción de hidrógeno basado en la distancia entre electrodos, utilizando un material como el acero inoxidable AISI 316, de tal manera que no reaccione en la reacción.

En este trabajo se utiliza una mayor cantidad de cátodo, con el fin de obtener más hidrógeno, también en una de sus conclusiones manifiesta que la distancia entre electrodos y la densidad de corriente influyen en la producción de hidrógeno. (9)

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Energía**

La energía es sinónimo de fuerza, vigor que posee un cuerpo en el espacio, la tierra está rodeada de inmensa energía, significa que todo cuerpo existente en la tierra posee algún tipo de energía.

El ser humano vive rodeado de tantos elementos como las plantas, el aire, el agua, la corteza terrestre, las cuales todas ellas precisan algún tipo de energía.

La segunda ley de la termodinámica manifiesta que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma.

La energía también está en los cambios químicos y físicos de los materiales, por ejemplo, el agua al pasar la corriente eléctrica, libera energía por su descomposición en elementos que lo conforman, esto es el hidrógeno y el oxígeno.



La energía es la fuerza vital de la sociedad. De ella dependen el movimiento general de todo artefacto, equipos, funcionamiento e iluminación de exteriores e interiores, el calentamiento y refrigeración de alimentos, acondicionamiento de aire de viviendas, el transporte de personas y vehículos, movimiento de personas y mercancías, la obtención, cocción de los alimentos y su preparación, etc. Todos ellos requieren la utilización de la energía ya que es una propiedad vinculada a las cosas, a la materia y que ocurre en las transformaciones que se dan en el medio natural.

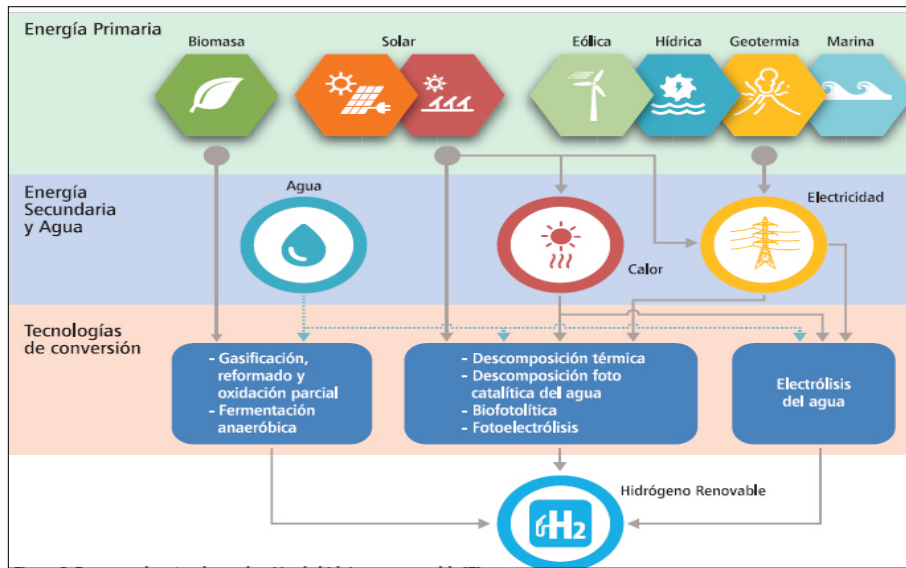
### **2.2.2. Energías alternativas**

En la Figura 1 se analiza la relación que existe entre los diferentes tipos de energía y los procesos que se requieren para obtener cada una de ellas, por eso es necesario clasificarlas de acuerdo con su existencia y abundancia en la tierra. Se clasifican en energías renovables y energías no renovables.

Las energías no renovables son los elementos depositados en la corteza terrestre de los restos fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón. Son energías no renovables porque al ser extraídas, estos combustibles, no se los vuelven a reponer y ocurre que su disponibilidad en el tiempo es cada vez menor. Se forman debido a la descomposición de los restos fósiles que se han producido durante millones de años. La energía nuclear es una energía no renovable.

### **2.2.3. Tipos de energías**

Existen muchas formas de energía que son fuentes para el desarrollo de tecnologías, lo cual significa que podemos aprovechar de una manera racional el uso de estas energías.



**Figura 1. Producción de hidrógeno**  
**Tomada de Tecnologías de hidrógeno y perspectivas para Chile (10)**

#### 2.2.4. Clasificación de la fuente de energía

Generalmente la clasificación de las fuentes de energía se asocia con su forma, origen, producción y su aplicación; sin embargo, dentro de esta clasificación existen energías limpias, que no genera residuos contaminantes y las otras energías que si generan residuos, como indica la Figura 2.

Forma	Origen	Producción	Uso
<b>Térmica</b>	Fricción, combustión, energía cinética	Solar, geotérmica, electricidad, química	Cocinar, calefacción, vapor
<b>Radiante</b>	Sol, electricidad, radiación	Solar, electricidad, química	Iluminación, comunicaciones, medicina
<b>Mecánica</b>	Energía Potencial	Eólica, Hidráulica, Mareomotriz, resortes	Iluminación, comunicaciones, medicinas
<b>Eléctrica</b>	Electromagnetismo, piezoelectricidad, electricidad estática, pilas y baterías	Centrales térmicas, centrales hidráulicas, fotovoltaica, celdas de combustible, pilas y baterías	Motores, electrónica, calentamiento, almacenamiento de energía
<b>Química</b>	Combustibles, plantas, animales, elementos químicos, biomasa	Biomasa, petróleo, gas, carbón	Motores de combustión interna, cocinar alimentos, transformación química
<b>Gravitacional</b>	Tierra	Hidráulico	Mover máquinas
<b>Magnética</b>	Tierra, imanes	Electricidad	Electromagnetismo
<b>Nuclear</b>	Átomo	Centrales nucleares	Centrales nucleares, electromedicina, radiología

**Figura 2. Clasificación de fuentes de energía**  
**Tomada de Formas de energía (11) (p. 7)**

### 2.2.5. Hidrógeno

El hidrógeno es un elemento no aislado, es un componente del agua ( $H_2O$ ), también se encuentra combinado con otros compuestos como los hidrocarburos, específicamente no es un combustible, tiene propiedades físicas y químicas que lo diferencian de los demás combustibles. Se obtiene a través de distintos procedimientos entre ellos la electrolisis del agua.

La energía química del hidrógeno se puede convertir de manera directa en energía eléctrica, esta conversión directa se realiza en las llamadas pilas de combustible<sup>2</sup>. Inclusive se puede utilizar en aplicaciones como la típica batería que se puede reemplazar por un cartucho de hidrógeno.

En la actualidad los países del mundo se han hecho dependientes de los combustibles fósiles<sup>3</sup> a pesar de que su existencia día a día se va reduciendo debido a que no son renovables, las reservas del petróleo están dadas para un promedio de 50 años, gas natural 60 años y carbón 200 años, lo que facilita las presiones políticas por parte de los países productores.

Estas condiciones obligan a recurrir a otras fuentes de energía renovable y nuclear, en el caso de producción de hidrógeno, es una mejor alternativa de hecho que su producción acarrea la reducción de la dependencia energética de los restos fósiles y algo más importante es su elevado rendimiento en la conversión.

Otra alternativa de la producción del hidrógeno es que como energía limpia no produce reacciones del  $CO_2$  ya que solo libera vapores de agua, por lo tanto las emisiones de  $CO_2$  son reducidas, lo que permite un mejor control del medio ambiente en Huancayo.

---

<sup>2</sup> Pilas de combustible, disponible en: [<https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>]

<sup>3</sup> Combustibles fósiles, disponible en: [<https://solar-energia.net/energias-no-renovables/combustibles-fosiles>]

- **Generalidades del hidrógeno**

El hidrógeno<sup>4</sup> “es el primer elemento de la tabla periódica y el más abundante del universo conocido: constituye más de las tres cuartas partes de toda la materia observable. Es un elemento liviano, con la forma atómica más simple conocida, y usualmente se presenta como un gas monoatómico incoloro, inodoro e inflamable”.

El físico Henry Cavendish descubrió el Hidrogeno en 1766 y este elemento está presente en muchas estrellas como en el Sol, también forma parte de muchos compuestos orgánicos, y especialmente forma a la molécula del agua. Según algunos científicos afirman que el hidrogeno fue el primer elemento químico en formarse en el universo.

Actualmente el hidrógeno se produce industrialmente y su aplicación encierra muchos usos, como en el área de soldadura, hidrocarburos, pilas de combustible, vehículos espaciales, fabricación de amoniaco y muchas más utilizaciones. Se detalla las características más importantes de este elemento.

Este elemento químico es considerado el más liviano y tiene un solo electrón en su última capa de su estructura molecular, con numero de valencia uno. Es un elemento químico muy importante .no metálico.

- **Características generales como elemento químico**

- Lugar en la tabla periódica = 1
- Peso atómico = 1,00794
- Símbolo = H
- Punto de Fusión = 259,3°C
- Punto de Ebullición = 252,87°C
- Volumen atómico 14,24

---

<sup>4</sup> Hidrógeno, disponible en: [<https://www.caracteristicas.co/hidrogeno/>]

- **Propiedades físicas del hidrógeno**

El hidrógeno en condiciones normales de presión y temperatura es un gas ideal incoloro, insípido, no tóxico. Y gracias a esta característica el hidrógeno pasa por el proceso de licuado usando altas presiones y energías para poder ser envasado en tanques y ser utilizado.

- **Inflamabilidad del hidrógeno**

El hidrógeno por su naturaleza natural al medio ambiente no es explosivo, es un elemento químico estable, si no que requiere de una fuente de ignición para que arda.

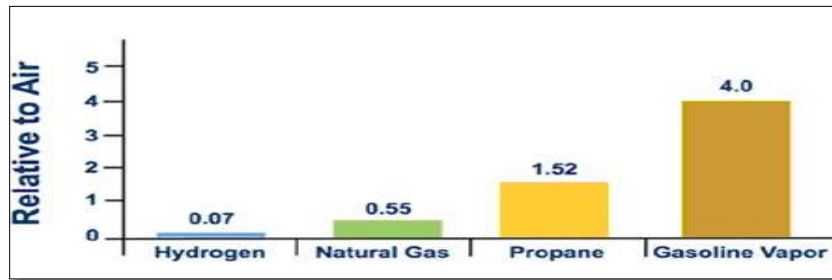
Y para que el hidrógeno arda, se requiere de tres condiciones, primero que se mezcle con un combustible, que esta mezcla cumpla las condiciones de límites de ignición, una buena y apropiada ignición y, por último, que se mezcle con un buen oxidante que es el oxígeno.

Estas características de inflamabilidad del hidrógeno son dependientes de la temperatura, presión, fuente de ignición, diseño o configuración del equipo o tamaño del equipo.

El hidrógeno<sup>5</sup> es aproximadamente 57 veces más ligero que el vapor de gasolina, y 14 veces más ligero que el aire. Esto significa que si se libera en un entorno abierto, generalmente aumentará y se dispersará rápidamente. Esta es una ventaja de seguridad en un entorno exterior, Figura 3.

---

<sup>5</sup> Densidad del hidrógeno, disponible en:  
[<https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>]



**Figura 3. Densidad relativa del hidrógeno y gasolina Tomada de Hidrógeno gaseoso.<sup>6</sup>**

Es entonces que la densidad del hidrógeno es más bajo comparado con los otros combustibles gaseosos, y esto supone que si existiera una fuga de hidrógeno en un espacio reducido con presencia de O<sub>2</sub> y aire desencadenaría una detonación, y al producirse la detonación el resultado sería una onda de choque que estaría acompañado de un gran potencial que podría causar daños alrededor, tales como a equipos y personas, como se ve en la Tabla 1.

Una combustión de aire-hidrógeno y/o combustible puede originar una detonación (explosión rápida y brusca) o una deflagración (es una combustión sin explosión).

**Tabla 1. Características del hidrógeno y otros combustibles**

COMBUSTIBLE	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	LIMITES DE INFLAMABILIDAD (%vol)	TEMPERATURA AUTOIGNICION (°C)	MINIMA ENERGIA DE IGNICION(mj)	TEMPERATURA LLAMA (°C)	COEFICIENTE DE DIFUSION (cm <sup>2</sup> /s)	LIMITE INFERIOR DE DETONACION (% vol)
HIDROGENO	0.0838	4-75%	536-538	0.021-29%	2025-2403	0.61	13%
METANO	0.656	5.3-15%	537	0.21-8.5%	1914	0.16	6.30%
BUTANO	2.52	1.6-8.4%	405	0.25-4.7%			
PROPANO	1.83	2.1-9.5%	480	0.25-5.2%	1925		
GASOLINA	4.78	1.0-7.6%	247	0.29-2%	2307	0.05	1.10%
DIESEL		0.6-7.5%	210		2307		

**Tomada de Características del hidrógeno<sup>7</sup>**

- **Energía mínima de chispa**

El hidrógeno para que detone requiere una mínima energía de chispa, que comparado con el metano y gasolina es inferior a estos combustibles, Figura 4.

<sup>6</sup> Hidrógeno gaseoso, "Herramientas de hidrógeno", disponible en: <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-compared-other-fuels>

<sup>7</sup> Características del hidrógeno, "Apilados". Disponible en: [<http://apilados.com/blog/es-el-hidrogeno-peligroso/>]

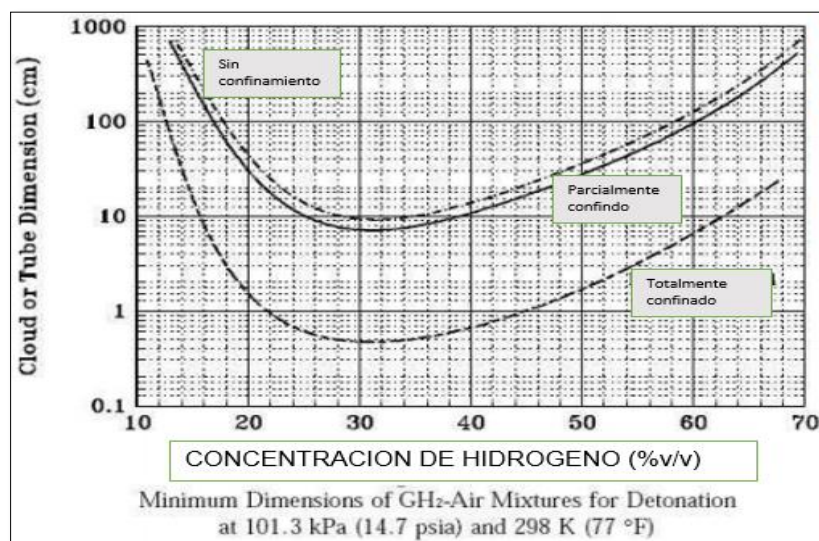
<i>Energía mínima de la chispa (mJ)</i>	<i>Presión (kPa)</i>
<i>0.017</i>	<i>101.3</i>
<i>0.09</i>	<i>5.1</i>
<i>0.56</i>	<i>2.03</i>

**Figura 4. Energía mínima de chispa hidrógeno-aire  
Tomada de Estudio de la reacción de la hidrólisis (12) (p. 76)**

Teniendo en cuenta que la chispa que requiere el metano es 0.029 mJ y el de la gasolina es de 0.024 mJ y la del hidrógeno es inferior al de los dos combustibles mencionados. (12)

La energía de estos tres combustibles es mínima, lo cual quiere decir que a un mínimo contacto con un fósforo (cerillo), una frotación del cuerpo, un objeto o superficie caliente, puede ser suficiente para que cualquiera de estos combustibles pueda incendiarse. (12)

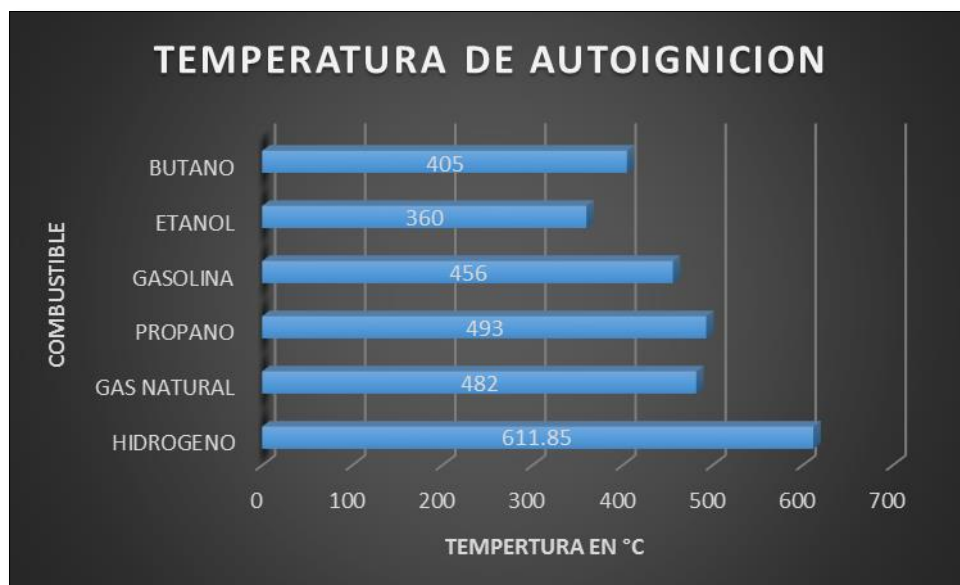
Los límites de detonación varían considerablemente con la naturaleza y dimensiones del confinamiento y no pueden ser especificados para ninguna mezcla combustible-oxidante a menos que la naturaleza y dimensiones del confinamiento estén también especificadas. En la Figura 5 se muestran las dimensiones mínimas para que se origine una detonación. (12)



**Figura 5. Concentración de hidrógeno y sus límites de detonación  
Tomada de Detonación (12)**

- **Combustión del hidrógeno**

La temperatura de autoinflamación o más conocido como autoignición, ver Figura 6, es una característica de los combustibles ya sea que esté en cualquiera de sus estados sólido, líquido o gaseoso, a temperatura ambiente y a la presión de 1 atm, estos combustibles arderán sin la presencia de un agente externo como una fuente de calor, estas características de temperatura y presión es suficiente para que se inicie una reacción en cadena. (13)



**Figura 6. Temperatura de autoignición de los combustibles**

- **Rango de inflamabilidad**

Los campos de inflamabilidad o más conocido como límites de explosividad para los combustibles, ver Tabla 2, tienen un rango de mezcla combustible-comburente, que justamente hace que este concepto nos haga entender el comportamiento del fuego, los cuales se originan cuando existe una fuente de ignición.

Por debajo de LIE (Límite inferior de explosividad) la mezcla es pobre en combustible y no puede inflamarse. Por encima del LSE (Límite superior de explosividad), la mezcla es muy rica y tampoco puede inflamarse. Por lo tanto, la explosividad o inflamabilidad de un combustible depende de sus dos límites LIE Y LSE, temperatura y un aporte mínimo de calor.



Tabla 2. Rango de inflamabilidad del hidrógeno y otros gases

GAS	COMBURENTE			
	AIRE		OXIGENO	
LIMITES	INFERIOR %	SUPERIOR %	INFERIOR %	SUPERIOR %
METANO	5	15	5	60
ETANO	3	12.4	3	66
ETILENO	2.7	36	2.9	80
PROPANO	2.8	9.5	2.3	45
PROPILENO	2	11.1	2.1	52.8
BUTANO	1.8	8.4	1.8	40
CO	12	75		
HIDROGENO	4	75	4	94
ACETILENO	2.2	80	2.8	93

El LIE y su LSE para el hidrógeno está comprendido entre el 4% y 75%, entre este rango se encuentra toda la mezcla inflamable donde se realiza la combustión, además deberá tener un aporte o fuente de calor. Es por eso que a una mínima chispa a la mezcla, este se encenderá tal como lo muestra la Figura 7.

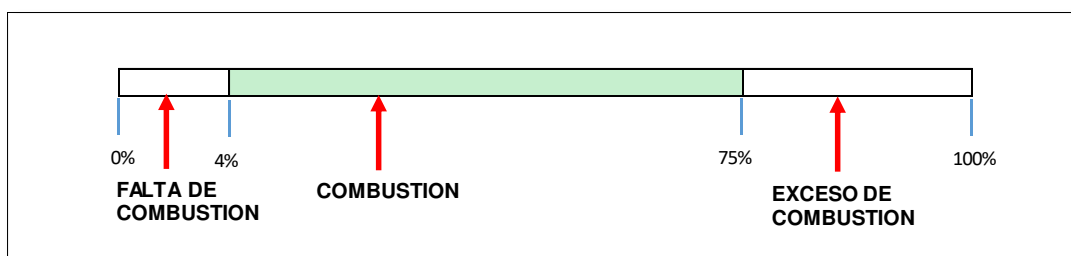


Figura 7. Límites de explosividad del hidrógeno LIE y LSE

En su forma monoatómica gaseosa el Hidrogeno ( $H_2$ ) es un gas muy inflamable, y este reacciona espontáneamente con elementos químicos oxidantes como el oxígeno, flúor y cloro. Además, este elemento químico forma parte de los hidrocarburos (hidrógeno y carbono), o conocido como los combustibles fósiles. (12)

- **Otras propiedades del hidrógeno**

- el hidrógeno como molécula se comporta en condiciones normales como un gas incoloro, inodoro e insípido

- Es la molécula más pequeña que se conoce.
- Su densidad es 0,089 kg/m<sup>3</sup>

Tiene gran rapidez de transición de las moléculas a la fase gaseosa, de ahí la ausencia casi total del hidrógeno en la atmosfera terrestre. Gran facilidad de fusión y difusión. Buena conductividad calórica.

#### • Usos del hidrógeno

Mucha gente se pregunta ¿Cuáles son algunos de los usos comunes de hidrógeno. Si alguna vez surgió la pregunta para qué sirve este elemento, a continuación se muestra una lista de sus posibles usos<sup>8</sup>.

- Procesamiento de combustibles fósiles
- Producción de amoníaco para la industria minera o doméstica
- Producción de metanol, grasas
- Utilizado en algunos termómetros, cuando esté en su punto triple de sus tres estados.
- Producción de ácidos como el ácido clorhídrico (HCL), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S)
- En estado gaseoso, se usa como un gas de protección en la soldadura de hidrógeno atómico.

#### • Antecedentes del hidrógeno

Se presenta un orden cronológico de la aparición del hidrógeno que cabe mencionar los descubrimientos recientes para su aplicación dada en el siglo XX donde su aplicación fue lenta como una energía limpia y económica, ver Figura 8. (1)

#### • Velocidad de combustión del hidrógeno

La velocidad de combustión del hidrógeno conocida como la velocidad subsónica que se propaga a través de la mezcla del aire-combustible, es de 2.7 a 3.5 m/s, esta característica del hidrógeno indica su gran potencial explosivo. (12)

---

<sup>8</sup> Usos del hidrógeno, "Ok Diario", Disponible en:  
[<https://okdiario.com/curiosidades/hidrogeno-caracteristicas-h2o-450494>]

1783	El químico francés <b>Antoine Lavoisier</b> dio al hidrógeno su nombre, que fue sacado de las palabras griegas - "hydro" "y genes", queriendo decir "el agua" " y nacer de. "
1783	<b>Jacques Alexander Cesar Charles</b> , un físico francés, realiza el primer vuelo de globo de hidrógeno.
1800	Los científicos ingleses <b>Guillermo Nicholson</b> y <b>Antonio Carlisle</b> descubren la electrolisis, aunque se le atribuye a M. faraday en 1833.
1838	El químico suizo <b>Christian Friedrich Schoenbein</b> descubre el efecto de pila de combustible por la combinación de hidrógeno y oxígeno para producir agua y corriente eléctrica.
1889	<b>Ludwig Mond</b> y <b>C. Langer</b> construyen el primer dispositivo fuel-cell usando de combustible aire y el gas de hulla industrial.
1900	<b>Ferdinand von Zeppelin</b> crea el primer dirigible, el cual era elevado mediante el uso de hidrógeno.
1920	<b>Rudolf Erren</b> , ingeniero alemán, convierte los motores de combustión interna de camiones a motores de combustión por hidrogeno
1952	Se detona la " <b>Ivy Mike</b> ", primera bomba de Hidrógeno.
1959	<b>Francis Bacon T.</b> de la Universidad de Cambridge en Inglaterra construyó la primera batería de tecnología fuel cell que utilizaba hidrogeno.

**Figura 8. Antecedentes del hidrógeno**  
**Tomada de Evolución del estudio del hidrógeno (1)**

- **Energía almacenada en algunos combustibles**

Dadas las propiedades termodinámicas de los elementos como combustibles, ver Tabla 3, la energía almacenada del gas producido como el hidrógeno cuya masa a temperatura y presión ambiental es de 33.59 kWh/kg.

**Tabla 3. Comparación de energía almacenada**

	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Energía almacenada		
		Volumen [kWh/m <sup>3</sup> ]	Volumen [kWh/Nm <sup>3</sup> ]	Masa [kWh/kg]
H <sub>2</sub> líquido (1 bar; -252,8°C)	70,71	2.375	3	33,59
H <sub>2</sub> gas (300 bar; 25°C)	20,55	690		
H <sub>2</sub> gas (700 bar; 25°C)	47,96	1.611		
Gas natural (1 bar; 25°C)	0,65	9,1	10	13,93
Butano líquido (25°C)	550	7.000	33	12,73
Gasolina	750	9.270	–	12,36

**Tomada de Densidades energéticas (14)**

- **Obtención del hidrógeno**

Hoy en día el Hidrogeno, se está estudiando y aplicando con más interés, por lo que se debe considerar que es un elemento que no se encuentra aislado de la naturaleza, sino que por su naturaleza química está combinado con otras sustancias, como el agua o hidruros. Por lo cual el hidrógeno se convierte en un vector energético a futuro, pero con ciertas limitaciones, ya que hoy en día producir dicho elemento llevaría a diferentes formas de energía para su obtención (nuclear, renovables, fósiles). (14)

Hoy en día se produce hidrógeno, pero en pequeñas escalas que no cubren la demanda de consumo, es por lo que compañías de automóviles están creando vehículos híbridos con doble función.

El hidrógeno, por sus características químicas y físicas, hacen que sea dificultoso su transporte, almacenaje y distribución. (14)

La pila de combustible es el más común y utilizado hoy en día, se está utilizando en vehículos con poca autonomía que no requieran de parámetros elevados de aceleración como vehículos de transporte, vehículos de reparto, y su sistema es recomendable ya que no contamina.

Una de las características de la pila de combustible es que directamente la energía química del hidrógeno se convierte en energía eléctrica, a diferencia de un proceso térmico de ciclo de potencia como los motores de combustión interna.

Evidenciando elevados rendimientos a comparación de los procesos electrolíticos, pero este sistema se emplea con fines estacionarios. (14)

En esta clasificación se encuentra diversas formas de obtener el gas hidrógeno como:

➤ **Energía eléctrica**

- ✓ Electrolisis (agua)
- ✓ Descomposición de gas natural por arco de plasma (gas natural)
- ✓ Energía térmica
- ✓ Termólisis
- ✓ Termo catálisis
- ✓ Proceso termoquímico
- ✓ Conversión de biomasa
- ✓ División de agua
- ✓ Gasificación
- ✓ Reformación de metano
- ✓ Energía fotónica
- ✓ PV-electrolisis (agua)
- ✓ Fotocatálisis (agua)
- ✓ Método fotoelectroquímico (agua)
- ✓ Biofotólisis (agua)

➤ **Energía bioquímica**

- ✓ Fermentación oscura (biomasa)
- ✓ Enzimática (agua)

A continuación, se explican las formas más utilizadas para obtener el hidrógeno y especialmente la electrolisis, como caso específico de este estudio.

### 2.2.6. Electrolisis

Es un proceso fenómeno-químico no espontáneo, que da como resultado la descomposición del agua a condiciones normales de presión y temperatura (NTP), en sus dos componentes oxígeno e hidrógeno, por efecto del paso de la corriente eléctrica.

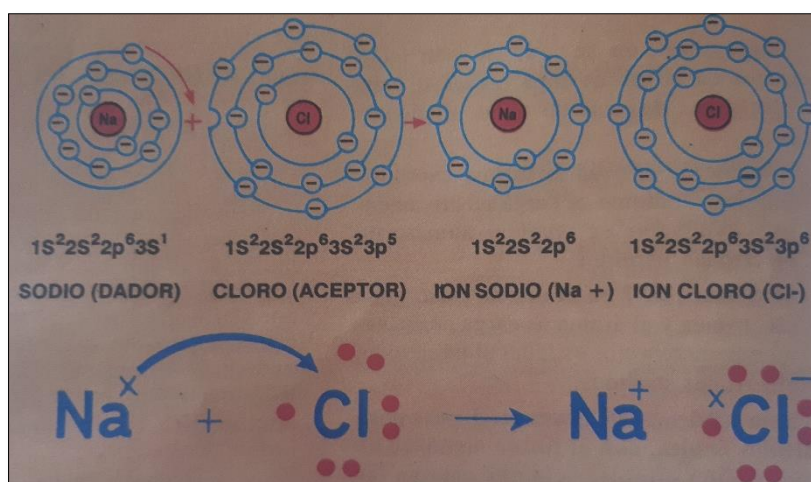
Como el agua pura es mala conductora para el paso de la corriente es necesario agregarle una sustancia como solución ya sea una sal o un ácido para descomponerlo en iones positivos y negativos y esta solución se volverá buena conductora para el paso de la corriente, ver Tabla 4.

Tabla 4. Iones positivos y negativos

IONES			
IONES POSITIVOS		IONES NEGATIVOS	
ALUMNIO	AL +3	CLORURO	Cl -1
BARIO	Ba +2	BROMURO	Br -1
CALCIO	Ca +2	FLUORURO	F -1
CROMO II	Cr +2	YODURO	I -1
CROMO III	Cr +3	SULFURO	S -2
COBRE I	Cu +1	CLORATO	ClO <sub>3</sub> -1
COBRE II	Cu +2	CARBONATO	CO <sub>3</sub> -2
HIERRO II	Fe +2	CROMATO	CrO <sub>4</sub> -2
HIERRO III	Fe +3	HIPOCLORITO	ClO -1
PLOMO III	Pb+2	FOSFATO	PO <sub>4</sub> -3
MERCURIO I	Hg +1	PERCLORATO	ClO <sub>3</sub> -1
MERCURIO II	Hg +2	SULFATO	SO <sub>4</sub>
SODIO	Na+1		

- **Ion**

Es todo átomo o grupo de átomos con carga eléctrica, que se clasifican en positivos y negativos, los iones positivos se caracterizan por la pérdida de electrones en su última órbita de energía. (15) En cambio los iones negativos son átomos que ganaron electrones en su última capa, para completar la regla del octeto, Figura 9. La carga del ion siempre va a ser igual a la cantidad de electrones perdidos o ganados.



**Figura 9. Regla de octeto, iones negativo y positivo  
Tomada de Iones (15)**

- **Agua destilada**

Esta clase de agua es mala conductora para el paso de la corriente eléctrica, ya que se obtiene por destilación de aguas minerales, siguiendo los procesos de evaporación y condensación. En medicina solo se usa como disolvente de inyectables, en baterías como aislantes, no contiene sustancias extrañas y no es apto para el consumo humano. Para que se pueda aplicar la electrolisis es necesario combinar con alguna sal, para que pueda dejar pasar la corriente.<sup>9</sup>

- **Agua potable**

El agua potable o agua para el consumo humano contiene valores mínimos de sales minerales y de iones, tales como sulfatos, nitratos, calcio; además de contener algunos gérmenes, por eso es necesario hacer hervir este tipo de agua.

El pH de este tipo de agua varía entre los 6,5 a 8.5, es por todas estas características que no es buena conductora de la electricidad, en algunos casos se dice que sí es buena, eso dependerá del % de sales y minerales que esta contenga.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Agua destilada, "Definición". Disponible en: [<https://definicion.de/agua-destilada/>]

<sup>10</sup> Agua potable, "Concepto". Disponible en: [<https://concepto.de/agua-potable/>]

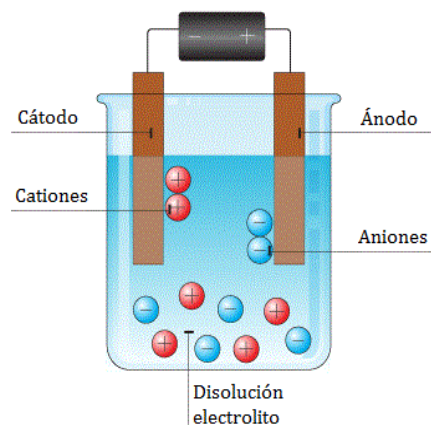
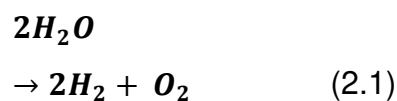
- **Agua mineral**

Este tipo de agua se extrae desde los manantiales y tiene un origen natural que contiene sales minerales únicos y constantes, y no requieren de tratamiento de filtrado o destilación, y su consumo es directo. En efecto, la cantidad de minerales o sales que contenga este tipo de aguas dejará pasar cierta corriente eléctrica y presentará cierta turbidez y color en el agua, por la oxidación de los minerales.<sup>11</sup>

- **Proceso de electrolisis**

En el proceso de electrolisis se obtendrá hidrógeno y oxígeno o algún ion positivo o negativo, esto va a depender con qué sustancia habrá sido combinada la solución. (16)

Los electrodos serán los conductores de la corriente eléctrica que serán utilizados como polo positivo y negativo, es así como el polo positivo o ánodo será conectado al polo positivo de la batería, y el cátodo o polo negativo será conectado al polo negativo de la batería, ver Figura 10.



**Figura 10. Proceso básico de electrolisis  
Tomada de Celda electrolítica.<sup>12</sup>**

<sup>11</sup>Agua mineral, "Instituto de investigación de agua y salud". Disponible en: [http://institutoaguaysalud.es/agua-mineral-natural/]

<sup>12</sup> Celda electrolítica, "Visualavi". Disponible en: [https://www.visualavi.com/una-celda-electrolitica-esta-formada/]



- Algunas aplicaciones de la electrolisis en la industria se observan en la Figura 11.

<b>APLICACIÓN DE LA ELECTROLISIS</b>	
<b>Aplicacion</b>	<b>Procedimiento</b>
<b>GALVANOPLASTIA</b>	Mediante la corriente electrica , se usa para recubrir un metal solido con una capa fina del metal en liquido,se obtendra cromdo, niquelado,plateado.
<b>PURIFICACION</b>	Al hacer pasar corriente por una solucion amoniaca de $ClAg$ , se obtiene plata.
<b>ACUMULADORES</b>	Fabricacion de acumuladores de plomo
<b>IONES</b>	En la electrolisis ,tambien se obtendra algunos elementos como el $Cl,Na,K,H, O$ , etc.que se depositan y se desprenden

*Figura 11. Aplicación de la electrolisis*

- En efecto, a partir de la ecuación 2.1, se obtiene una cierta electricidad para disociar 1 mol de agua a 25 °C que es 237.75 kJ, dando como resultado 1 mol de hidrógeno. Como el PCI del hidrógeno es 241.8 kJ resulta que se consume 237.8 kJ eléctricos por cada 241.8 kJ, es decir, se producen 1.02 kJ de hidrógeno por cada kJ eléctrico consumido, pero esto sería distinto si se trabajara con vapor de agua 1.000 °C que produce 1.36 kJ de hidrógeno por cada kJ eléctrico consumido. (14)

- **Generador de hidrógeno**

“Un generador de hidrógeno es un mecanismo de tablero que trasforma el agua en hidrógeno y que alimenta ese hidrógeno en un motor para que se quem. El agua debe purificarse y estilizarse para obtener mejores resultados”, (17) (p. 6) pero en una definición más sencilla se dice que un generador de hidrógeno "Se basa en unos electrodos que al hacer pasar corriente por el agua generan hidrógeno por electrolisis, separando los átomos del  $H_2O$  y dejando HHO". "El gas que se genera se hace pasar por el colector de admisión

enriqueciendo la mezcla y por consiguiente más potencia y menos consumo".  
(17) (p. 7)

Además, está catalogado dentro de categorías como:

- Energías subalternas para el cuidado del medio ambiente
- Ahorro económico
- El futuro combustible universal
- Invento innovador
- Futuras adaptaciones para automóviles

Y hablando de manera concisa y redactada en cuanto al proceso, se puede decir que este funciona a través de un proceso llamado electrolisis. Cuando el agua, con un electrolito presente, cuenta con una corriente eléctrica a través de ella, el agua quiere acceder en sus partes que la componen. (17) (p. 7)

Estas partes componen, por supuesto, dos partes de hidrógeno y una parte de oxígeno, que son todos los gases. El motor está enganchado al generador hasta crear un vacío que absorbe el nitrógeno en este y, después, el hidrógeno se usa en la combustión interna de gasolina que maneja el motor encendido con gasolina. (17)

Las baterías contienen varias celdas voltaicas en serie y pueden ser primarias (como una pila seca, alcalina, de mercurio o de plata), recargables (como de plomo-ácido y níquel-cadmio o de flujo con 8 celdas de combustible).

El suministro de electricidad a una batería recargable invierte la reacción redox, con lo que se forma más reactivo para uso posterior. Las celdas de combustible liberan electrones y generan una corriente a través de la oxidación controlada de un combustible como,  $H_2O$   $CH_2$ . (17)

Debido a que son compactas y móviles, las baterías tienen una gran influencia en el modo de vida. En países industrializados se usa un promedio por año de

10 baterías por persona. Una batería, exactamente hablando, es un grupo de celdas voltaicas autónomas ordenadas en serie (positivo a negativo a positivo y así sucesivamente) de tal manera que sus voltajes individuales se suman entre sí. (17)

Las baterías son dispositivos diseñados ingeniosamente que utilizan semirreacciones y semiceldas muy poco comunes, pero que operan bajo los mismos principios electroquímicos. (17)

Con los precios del combustible siempre en ascenso, la electricidad con hidrógeno está de moda como alternativa, así como las soluciones de combustible híbrido para los fabricantes de automóviles. Sin embargo, algunos entusiastas nacionales no esperan por la próxima gran innovación de una importante empresa para introducir la energía de hidrógeno en sus vehículos. (17)

Muchos consumidores utilizan la tecnología del bricolaje<sup>13</sup> para fabricar sus propios generadores de hidrógeno para sus automóviles. Esta tecnología está disponible hoy en día y se puede utilizar en un motor de gasolina o diésel. (17)

- **Proceso de producción del hidrógeno**

Uno de los métodos de producción del hidrógeno es a través de la separación del agua, que por medios electroquímicos como es un proceso de electrolisis utilizando la energía eléctrica facilita una forma económica de producir este elemento químico. (14)

- **Seguridad**

Existen riesgos asociados a la utilización de combustibles, de hecho, utilizar los combustibles, ya sea en sus diferentes formas, genera expectativas de

---

<sup>13</sup> Bricolaje, "Tecnología". Disponible en : "<https://ferreteria-y-bricolaje.cdecomunicacion.es/reportajes/8362/la-tecnologia-en-ferreteria-y-bricolaje-puede-marcar-la-diferencia>

condiciones peligrosas, y el hidrógeno no está exento a esto, para entender mejor se mencionan sus ventajas (14):

- El hidrógeno no es tóxico.
- Es más difícil que se produzca una combustión en concentraciones pobres de hidrógeno.
- El hidrógeno tiene una baja densidad, por lo cual tiende a difundirse hacia la atmósfera, esto impide que se formen concentraciones.
- Es altamente volátil.

Y entre sus desventajas se tiene:

- Una baja energía de activación, esto permite que en procesos de combustión se utilice pocas cantidades suministradas de hidrógeno, ya que si se aumentan las cantidades suministradas activaría una reacción no deseada por acción de la chispa.
- Por su propiedad física que se presenta de forma inodora e invisible es difícil percibir fugas en ambientes cerrados y más aún en espacios abiertos (con los sentidos humanos), se requiere de equipos muy tecnificados para poder percibirlos.
- En mezclas ricas de combustible, el hidrógeno, por sus altos rangos de inflamabilidad lo hace peligroso.
- Tiene una llama invisible a plena luz del día.
- Mantener el hidrógeno licuado complica su almacenamiento y transporte.
- Es un elemento químico muy pequeño y eso lo hace un gas con posibilidad de fuga ante cualquier presencia de espacio por donde pueda salir.

- **Normalización**

Existen normas, reglamentos o leyes que regulan los cumplimientos para su producción, distribución y almacenaje con el objetivo de proteger a la persona y favorecer a las industrias, entre estas organizaciones y comités están (14):

- NFPA, *National Fire Protection Association*

- ISO, *International Organization for Standardization*, (ISO\_TC 197)
- IEC, *International Electrotechnical Committee*, (IEC\_TC 105)

- **Electroquímica**

Como ciencia, forma parte de la química y se encarga del estudio de las reacciones químicas que ocurrieron en un fenómeno químico en las que interviene la corriente eléctrica.

Así mismo, estudia el efecto de las reacciones como el de la transformación de la energía química en eléctrica. Mejor dicho, muchas de las reacciones químicas pueden manifestarse de modo que se produzca energía eléctrica. A su vez esta energía eléctrica es introducida en muchos sistemas químicos. (16)

Como objetivo principal y primordial será verificar la transformación química en energía eléctrica y viceversa.

Este campo de estudio abarcará todo proceso químico que intervino la corriente eléctrica, mas no se estudiarán aquellas reacciones o mezclas gaseosas que produzcan descargas eléctricas.

- **Ley de Faraday**

La Ley de Faraday<sup>14</sup> o ley de la electrolisis fue descubierta por el fisicoquímico Miguel Faraday en el año 1834, que mediante mediciones cuidadosas determinó las relaciones entre la cantidad de electricidad que circula a través de un electrolito y la cantidad de materia depositada en el electrodo. Sus conclusiones dieron lugar a dos leyes muy conocidas.

$$M = \frac{PE * Q}{F} \quad (2.2)$$

---

<sup>14</sup> Ley de Faraday, "Hyperphysics". Disponible en: [<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electric/farlaw.html>]

**Donde:**

**M:** masa del gas (kg)

**PE:** peso equivalente de la sustancia (kg/kmol)

**Q:** carga eléctrica

**F:** constante de Faraday 96500 coulomb

$$Q = I * T \quad (2.2.1)$$

**Donde:**

**I:** intensidad de corriente (A)

**T:** tiempo (s)

$$PE = \frac{PA}{V} \quad (2.2.2)$$

**Donde:**

**PA:** peso atómico del elemento químico (g)

**V:** número de valencia

- **Ley de Pouille**

Esta ley<sup>15</sup> establece que los conductores ofrecen una resistencia al paso de la corriente, que depende del tipo de material y su dimensión como lo muestra la Tabla 5. La resistencia de un material es DP a su longitud (m) e IP a su área transversal del conductor eléctrico (m<sup>2</sup>).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.3)$$

**Donde:**

**R:** resistencia del conductor ( $\Omega$ )

---

<sup>15</sup> Ley de Pouille, "Nymburk". Disponible en: [<https://nymburk.info/ley-de-pouillet-40/>]

**$\rho$** : resistividad eléctrica ( $\Omega\text{m}$ )

**L**: longitud del conductor eléctrico (m)

**A**: área transversal del conductor eléctrico ( $\text{m}^2$ )

Una de las características de los metales es que al aumentar su temperatura aumenta su resistividad, al contrario de los semiconductores que al aumentar su temperatura decrece su resistividad. El inverso de la resistividad es la conductividad ( $\sigma$ ).

**Tabla 5. Resistividad de algunos materiales**

<b>MATERIAL</b>	<b>RESISTIVIDAD <math>\rho</math> a 20° C (<math>\Omega\cdot\text{m}</math>)</b>
COBRE	$1.7 \times 10^{-8}$
CARBONO	$3.5 \times 10^{-5}$
ALUMINIO	$2.8 \times 10^{-8}$
HIERRO	$10 \times 10^{-8}$
MERCURIO	$96 \times 10^{-8}$
PLATA	$1.6 \times 10^{-8}$
PLATINO	$100 \times 10^{-8}$
PLOMO	$22 \times 10^{-8}$
ORO	$2.4 \times 10^{-8}$
TUNGSTENO	$5.5 \times 10^{-8}$
NIQUEL	$7.2 \times 10^{-8}$
AC. INOX	$71.1 \times 10^{-8}$
GRAFITO	$3.5 \times 10^{-5}$
MERCURIO	$95 \times 10^{-8}$

- **Ley de ohm**

La Ley de Ohm establece que la tensión entre los extremos del material conductor es directamente proporcional a la corriente que fluye a través del material<sup>16</sup>.

$$V = I * R \quad (2.4)$$

**Donde:**

**V**: voltaje o tensión (V)

**I**: intensidad (A)

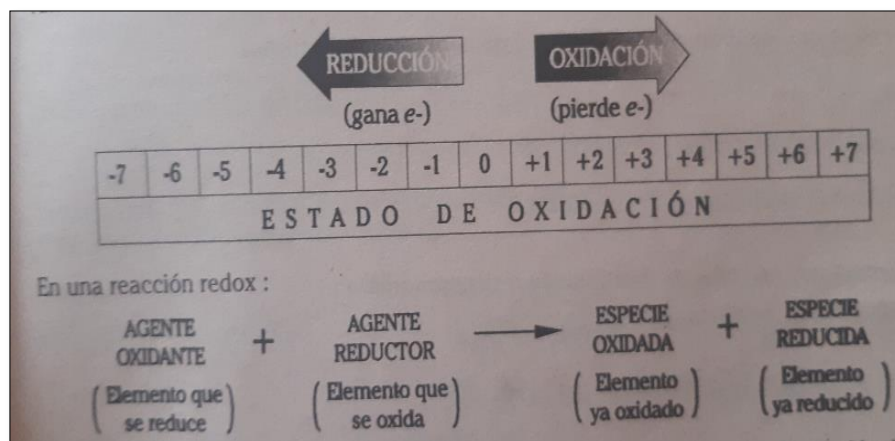
**R**: resistencia ( $\Omega$ )

---

<sup>16</sup> Ley de Ohm, "Euston". Disponible en: [<https://www.euston96.com/ley-de-ohm/>]

- **Método Redox**

Es una reacción de oxidación-reducción donde un elemento se oxida cuando su estado de oxidación aumenta, por lo tanto pierde electrones, y en el caso de la reducción es la que gana electrones, en todo este proceso existe transferencia de electrones tal como se explica en la Figura 12.



**Figura 12. Proceso de oxidación y reducción**  
*Tomada de Química II (16)*

El agente oxidante es el que se reduce y el agente reductor es el que se oxida, dando lugar a una especie oxidada que es el elemento ya oxidado y la especie reducida ya el elemento reducido, por lo tanto, en una reacción redox el número de electrones que se da es igual al número de electrones que recibe el otro elemento. (16)

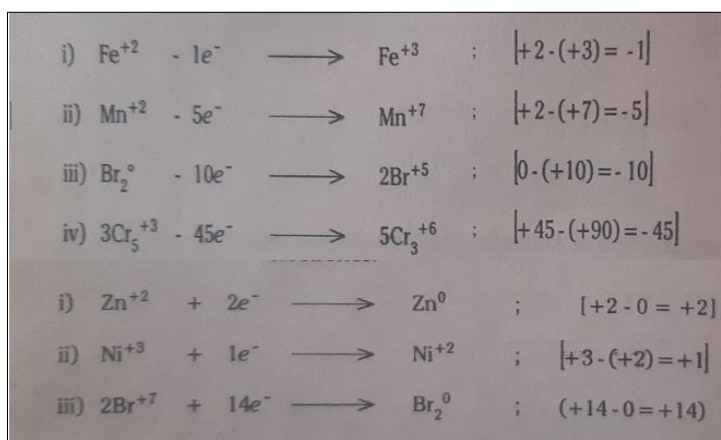
- **Semirreacciones**

En una oxidación, el elemento a oxidarse aumenta su EO (estado de oxidación), por lo que pierde electrones.

En una reducción, el elemento disminuye su EO por lo que gana electrones, si el elemento químico cede, se carga positivamente; si el elemento químico acepta, se carga negativamente. El origen principal de un elemento en ceder o recibir electrones, radica fundamentalmente en su capacidad de electronegatividad, los metales se caracterizan por ser menos electronegativos (ceden electrones) y forman cationes, en cambio los elementos no metálicos son



muy electronegativos (captan electrones) y forman aniones. Todo elemento químico sin combinarse tiene su  $EO=0$ , ver Figura 13. (16)



**Figura 13. Semirreacciones oxidación y reducción**  
Tomada de Química II (16)

- **Potencial estándar de celda-pila**

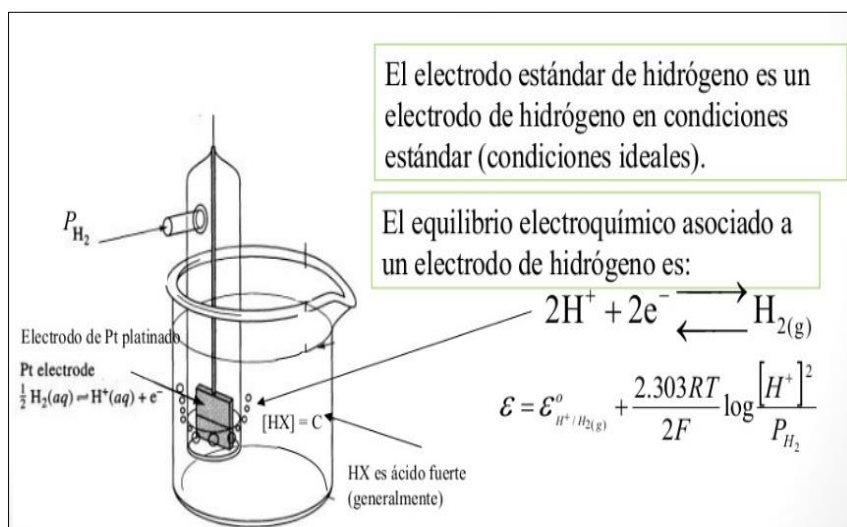
El potencial estándar de celda<sup>17</sup> (E), es un modelo que permite explicar el funcionamiento y la reacción que se produce en una pila o en una batería, ver Figura 14, también explica por qué los electrones se mueven del ánodo al cátodo, y cuánto de energía eléctrica producen en ese instante de movimiento o de salto que es conocido como diferencial de potencia de celda  $E^0_{\text{celda}}$  y coincide con la fuerza electromotriz.

El electrodo de referencia de estudio que fue creada por Luigi Galvano y Alessandro Volta<sup>18</sup> quienes tomaron como base para su aplicación al electrodo estándar del hidrógeno y a partir de ello poder medir las energías eléctricas de los demás electrodos en condiciones normales de presión (1atm) y temperatura (25°C) y 1 mol para soluciones.

Y es así como mediante la celda galvánica del hidrógeno se pudo determinar arbitrariamente el potencial eléctrico del hidrógeno.  $\epsilon_H = 0.00 \text{ V}$ .

<sup>17</sup> Potencial estándar de celda," Química General". Disponible en:  
[<http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/421-potenciales-estandar-de-reduccion.html>]

<sup>18</sup> Luigi Galvano y Alessandro Volta, "Cecs". Disponible en:  
[<http://www.cecs.cl/educacion/index.php?section=fisica&classe=28&id=42>]



**Figura 14. Potencial eléctrico del hidrógeno Tomada de Hidrógeno.<sup>19</sup>**

Siempre que tengamos una concentración de carga en una región del espacio, tendremos una energía potencial eléctrica,  $\epsilon$ . Este  $\epsilon$  siempre es más alto en regiones donde existe una concentración de carga negativa es decir en el Ánodo, y va a ser baja en regiones con concentración de carga positiva, es decir en el Cátodo. La consecuencia de esto es que se compara la energía potencial eléctrica ( $\epsilon$ ) de las dos regiones, se ve que existe un diferencial de energía potencial de energía  $\Delta \epsilon$ , que existe entre el ánodo (oxidación) y cátodo (reducción).

$$\Delta \epsilon^{\circ}_{celda} = \Delta \epsilon^{\circ}_{catodo} - \Delta \epsilon^{\circ}_{anodo} \quad (2.5)$$

$$\Delta \epsilon^{\circ}_{celda} = \Delta \epsilon^{\circ}_{reduccion} - \Delta \epsilon^{\circ}_{oxidacion} \quad (2.5.1)$$

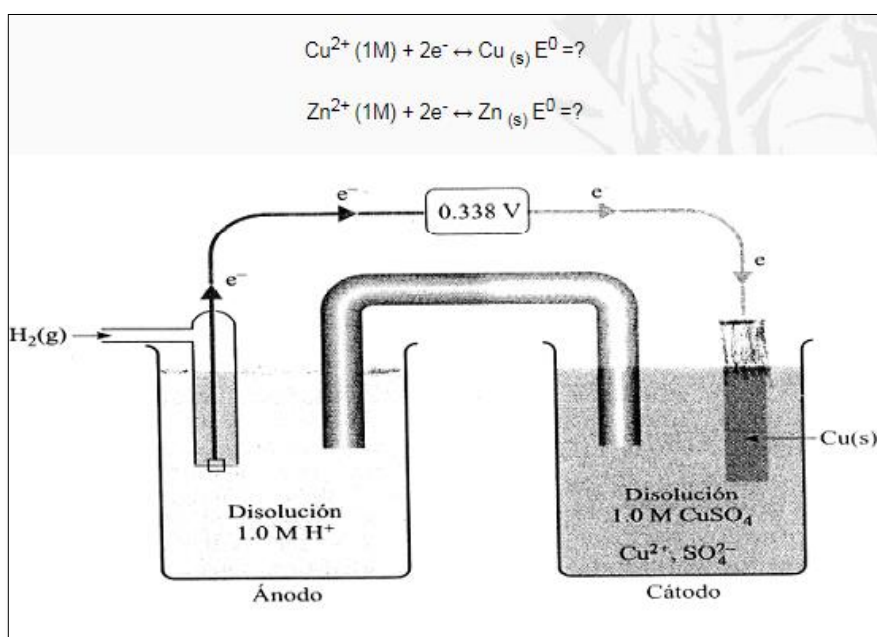
Este diferencial de potencial  $\Delta \epsilon^{\circ}$  es el que produce que los electrones se muevan del ánodo al cátodo, gracias a esta energía es que se va a mover los

<sup>19</sup> Potencial eléctrico del hidrógeno, Slideshare". Disponible en: [https://es.slideshare.net/EduardoRamirez/electrodo-estndar-de-hidrgeno]

electrones, su unidad de medida es Voltio (V) con sus unidades Joule/ unidad de carga (J/c).

Es entonces cuando hablamos del diferencial de energía potencial eléctrica que existe en una celda, se está hablando en Voltaje de la celda, siempre se va a medir en (V), y va a indicar cuanta energía es capaz de entregar una pila o batería por cada electrón que se va a mover en ella.

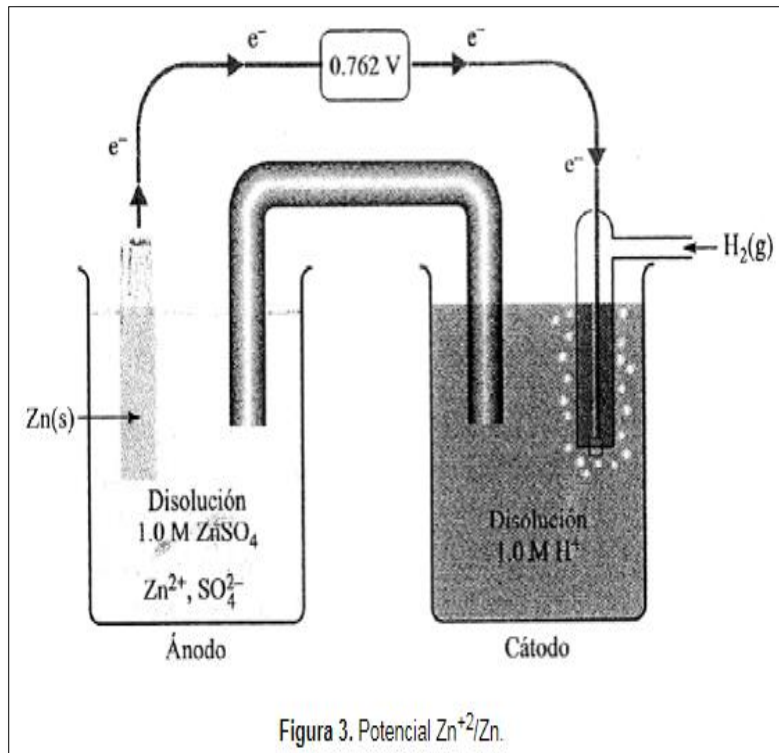
Esto va a depender también del tipo de elemento químico que se va a utilizar para fabricar la celda electroquímica, y esto dará diferentes valores de energía potencia. Un ejemplo de este proceso se tomó para hablar de la  $\epsilon$  del Cu que fue de 0.338, ver Figura 15.



**Figura 15. Energía potencial del Cu Tomada de Química General.<sup>20</sup>**

- Siguiendo con el cálculo de la energía potencial del Zn, con un valor, -0.762V, como se puede ver en la Figura 16.

<sup>20</sup> Energía potencial del Cu. "Química General". Disponible en: [http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/421-potenciales-estandar-de-reduccion.html]



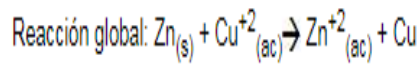
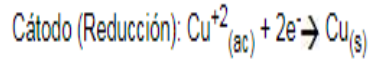
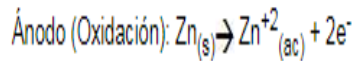
**Figura 16. Energía potencial del Zn  
Tomada de Química General. <sup>21</sup>**

Ahora, si se unen estos dos electrodos se determina si la reacción va a reaccionar de forma espontánea, esto significa que el valor positivo o negativo va a determinar la espontaneidad de la reacción, en este caso el valor salió positivo +1.100V, el cual significa que es una reacción natural que sí se da de forma espontánea, tal como se puede ver en la Figura 17.

- $\epsilon^\circ > 0$  es una reacción espontánea.
- $\epsilon^\circ < 0$  no es una reacción espontánea.

<sup>21</sup> ENERGIA POTENCIAL DEL Zn. "Química General". Disponible en: [http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/421-potenciales-estandar-de-reduccion.html]

En la celda formada se dan por tanto las siguientes reacciones:



Por convención, la f.e.m. estándar de la celda,  $E^{\circ}_{\text{celda}}$ , que resulta de las contribuciones del ánodo y del cátodo, está dada por:

$$E^{\circ}_{\text{celda}} = E^{\circ}_{\text{cátodo}} - E^{\circ}_{\text{ánodo}} = E^{\circ}_{\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}} - E^{\circ}_{\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}} = +0,338\text{V} - (-0,762)\text{V} = 1,100\text{V}$$

**Figura 17. Energía potencial eléctrica de la reacción  
Tomada de Química General.<sup>22</sup>**

- **Energía libre de Gibbs y la espontaneidad**

La energía libre de Gibbs<sup>23</sup> va a permitir determinar si una reacción se realiza en forma natural o simplemente va a necesitar de alguna fuente externa para que se pueda efectuar, que se dará a presión y temperatura constante, tal como se puede ver en la Tabla 6.

Según la segunda ley de la Termodinámica, es una función de estado a fin de poder determinar de una manera más directa la espontaneidad de una reacción química.

<sup>22</sup> Energía potencial eléctrica de la reacción. "Química General". Disponible en: [<http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/421-potenciales-estandar-de-reduccion.html>]

<sup>23</sup> Energía libre de Gibbs. "Química General". Disponible en: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/17-energia-libre-de-gibbs.html>

**Tabla 6. Energía libre de Gibbs**

Sistema	Proceso	Universo
$\Delta G < 0$	Espontáneo en el sentido directo.	$T \Delta S > 0$
$\Delta G = 0$	En equilibrio, pues $\Delta H = T \Delta S$ (ecuación que permite estimar la temperatura a la cual el proceso está en equilibrio).	$T \Delta S = 0$
$\Delta G > 0$	No espontáneo en el sentido directo. Es espontáneo en la dirección opuesta.	$T \Delta S < 0$

**Tomada de Valores de la energía libre de Gibbs.**<sup>24</sup>

Donde la energía libre de Gibbs está dada por la siguiente fórmula:

$$\Delta G = -n * F * \varepsilon \quad (2.6)$$

**Donde:**

**$\Delta G$ :** energía libre de Gibbs

**n:** número de electrones que se intercambian en el proceso

**F:** constante de Faraday (96500 coulomb)

**$\varepsilon$ :** energía potencial eléctrica de la reacción (cátodo – ánodo)

Si el valor obtenido sale positivo, la reacción no reaccionará de forma natural, pero si el valor sale negativo la reacción se dará de forma espontánea.

- **$\Delta G > 0$**  no se dará la reacción química.
- **$\Delta G < 0$**  la reacción química se dará de forma natural.

Tomando como ejemplo la Figura 17, se halla  **$\Delta G$** .

Se obtuvo un resultado de  **$\Delta \varepsilon = 1.100 \text{ V}$** .

<sup>24</sup> Energía libre de Gibbs. "Portal educativo". Disponible en: <https://www.portaleducativo.net/tercero-medio/25/energia-libre-de-gibbs>

Aplicando la fórmula, se determina si esta reacción va a poder reaccionar.

$$\Delta G = -nF(1.100)$$

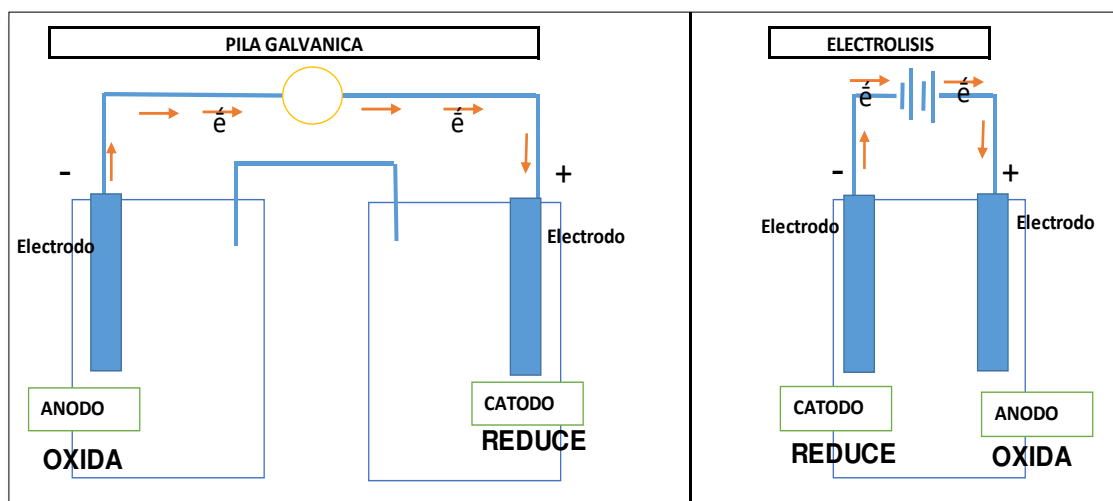
En este caso, con la constante de Gibbs, no es necesario desarrollar toda la fórmula, ya que una vez que se obtiene el resultado de la  $\Delta\varepsilon$  (energía de potencial eléctrica), con el signo que salió en el desarrollo, la constante de Gibbs solo afirmará e indica si la reacción se podrá dar de forma natural. Para concluir la fórmula tomando el valor positivo y multiplicado por el signo menos, da un valor negativo (-), independientemente de los otros valores (n, F), con esto se concluye que al poner el Cu y el Zn en la celda, estos van a reaccionar espontáneamente, haciendo que el Zn se oxide y el Cu se reduzca.

- Determinación de los signos entre una pila y la electrolisis

Si bien es cierto que en una celda o pila galvánica suceden procesos espontáneos de forma natural, sin la intervención de alguna disolución, comparada con el proceso de electrolisis, son procesos de reacción no espontáneos; donde, interviene una fuente eléctrica para poder obtener elementos químicos, se explica el comportamiento de los signos, las cargas y los procesos que suceden en la Tabla 7 y en la Figura 18.

**Tabla 7. Pila galvánica vs electrolisis**

DIFERENCIA ENTRE PILA vs ELECTROLISIS			
	PILA	ELECTROLISIS	
ENERGIA POTENCIAL ELECTRICA	$\varepsilon > 0$	$\varepsilon < 0$	PROCESO
CATODO	+	-	REDUCE
ANODO	-	+	OXIDA
REACCION	ESPONTANEA	NO ESPONTANEA	



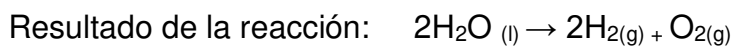
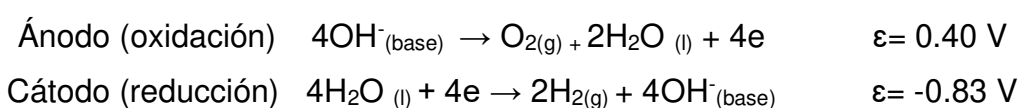
**Figura 18. Diferencias de electrodos entre la pila y la electrolisis**

- Voltaje mínimo para iniciar el proceso de la electrolisis

En la reacción química del agua por medio de la electrolisis, para obtener oxígeno e hidrógeno gaseoso, no se da en forma natural o espontánea, sino que fue necesario aplicar cierto voltaje al cambio de la energía libre de Gibbs  $\Delta G$ , para lograr esta separación se tuvo que aplicar un mínimo voltaje en medio de una solución alcalina. Según la tabla del Anexo 3 se tomaron los valores para la reacción del agua.

- Hallando el voltaje mínimo de la electrolisis

Mediante la Tabla 9 de los potenciales estándar de reducción se toman los valores para calcular el mínimo voltaje para la obtención de hidrógeno y oxígeno.



Aplicando el  $\Delta\epsilon = \epsilon_{\text{cátodo}} - \epsilon_{\text{ánodo}} = -0.83\text{v} - 0.40 = -1.23 \text{ V}$

Hallando la energía libre de Gibbs:

$$\Delta G = -nF\epsilon = -n \cdot F \cdot (-1.23) = (\text{valor positivo})$$



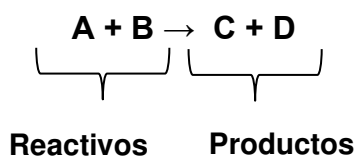
Estos valores obtenidos indican que esta reacción no es espontánea y para lograr la separación será necesario aplicar un mínimo de voltaje de + 1.23 V para obtener oxígeno e hidrógeno en sus estados gaseosos.

- Entalpía de formación estándar  $\Delta H$

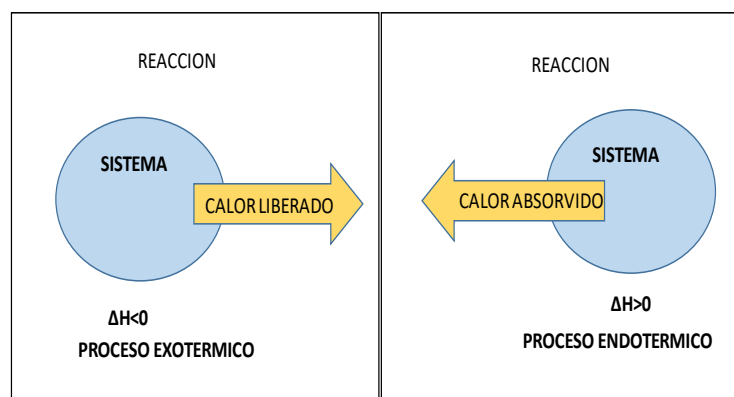
Todos los procesos químicos de la naturaleza al formar productos implican un intercambio de energía, cuando se forman enlaces químicos estos desprenden una cierta energía que está expresada en calor. Entonces se puede decir que la energía de entalpía es la energía que está involucrada en una reacción química a presión constante 1 atm, a temperatura ambiente (25 °C), y a 1 mol.

Es una propiedad extensiva que depende de la cantidad de reactivos o productos a formarse. La entalpía de la reacción inversa es igual en magnitud, pero con signo cambiado, porque se convierte en una reacción endotérmica, la Figura 19 explica este tipo de comportamiento producido en la reacción.

El estado de formación de cualquier elemento químico en su forma más estable siempre es nulo,  $O_2=0$ .



En una transformación química al liberarse calor (reacción exotérmica) la entalpía de reacción es negativa, y cuando el sistema absorbe calor la entalpía de reacción es positiva.



**Figura 19. Entalpía de formación estándar  
Tomada de Termodinámica<sup>25</sup>**

Donde la fórmula de la entalpía de formación estándar está dada por la diferencia de la sumatoria de los enlaces rotos y la sumatoria de los enlaces formados:

$$\Delta H^{\circ}_{reaccion} \rightarrow \sum \Delta H^{\circ}_{enl.rotos} - \sum \Delta H^{\circ}_{enl.formados} \quad (2.7)$$

$$\Delta H^{\circ}_{reaccion} \rightarrow (\text{signo})(\text{Valor})KJ/mol \quad (2.7.1)$$

- Signo : positivo ( proceso endotérmico), negativo (proceso exotérmico)
- Valor : es el resultado de la diferencia de entalpías, que puede estar en las siguientes unidades (KJ/mol, Cal)

- Entalpía de formación estándar del agua

Como ya se sabe que el agua es una formación espontánea, ya que sus elementos químicos reaccionan en el medio, ahora, para poder obtener sus dos elementos químicos en sus estados gaseosos es necesario romper los enlaces que une a la molécula del agua, y para ello fue necesario una energía que pudo romper esos enlaces. Para el cálculo de la entalpía del agua, a de guiarse desde la Tabla 8, la cual ya está tabulada para diferentes sustancias.

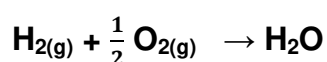
<sup>25</sup> Entalpía de formación estándar. "Portal Educativo". Disponible en: [https://www.portaleducativo.net/contenidos-psu/23/2/primera-ley-de-la-termodinamica]

Se encuentran los valores de las energías de enlace del agua de acuerdo con los datos de la Figura 20.

**Datos:**

- Energía de enlace doble oxígeno (O<sub>2</sub>) 498 KJ/mol.
- Energía del enlace simple hidrógeno (H<sub>2</sub>) 463 KJ/mol.
- Energía del enlace oxígeno – hidrógeno (OH) 463 KJ/mol.

Se toma la reacción balanceada del agua.



Se rompen los enlaces para obtener la molécula del agua.



Aplicando la fórmula de 2.7:

$$\Delta H^\circ = 438 \text{ KJ/mol} + \frac{498}{2} \text{ KJ/mol} - 2(463) \text{ KJ/mol} = -241 \text{ KJ/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Formación del agua}} = -241 \text{ KJ/mol}$$

Esto quiere decir que la formación del agua es una reacción exotérmica y se libera 241 KJ/mol.

Enlace	$E_e$ (kJ/mol)	Enlace	$E_e$ (kJ/mol)	Enlace	$E_e$ (kJ/mol)
H - Cl	432	C - N	305	Cl - Cl	242
H - O	463	C - C	346	O = O en O <sub>2</sub>	498
H - N	391	N - O	201	C = O en CO <sub>2</sub>	803
H - C	413	O - Cl	218	C ≡ O	1046
H - H	436	O - O	138	C = C	610
C - Cl	339	F - Cl	253	N ≡ N	945

**Figura 20. Algunos valores de energía de enlace Tomada de Termodinámica.<sup>26</sup>**

<sup>26</sup> Energías de enlaces. "Portal educativo". Disponible en: [https://www.portaleducativo.net/contenidos-psu/23/2/primer-ley-de-la-termodinamica]

Tabla 8. Entalpía de formación estándar  $\Delta H^\circ_f$  (KJ/mol)

Fórmula	Nombre compuesto	$\Delta H^\circ_f$	Fórmula	Nombre compuesto	$\Delta H^\circ_f$
CO (g)	Monóxido de carbono	-110,4	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH (l)	Etanol	-277,7
CO <sub>2</sub> (g)	Dióxido de carbono	-393,5	HCHO (g)	Formaldehído	-117,2
NO (g)	Monóxido de nitrógeno	90,3	HCOOH (l)	Ácido fórmico o metanoico	-424,7
NO <sub>2</sub> (g)	Dióxido de nitrógeno	33,2	CH <sub>3</sub> COOH (l)	Ácido acético	-484,5
N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (g)	Tetróxido de dinitrógeno	9,7	CCl <sub>4</sub> (l)	Tetracloruro de carbono	-138,7
SO <sub>2</sub> (g)	Dióxido de azufre	-296,9	CH <sub>3</sub> Cl (g)	Clorometano	-81,9
SO <sub>3</sub> (g)	Trióxido de azufre	-394,8	CHCl <sub>3</sub> (l)	Cloroformo	-131,8
C (grafito)	Carbono grafito	0,0	CH <sub>2</sub> Cl-CH <sub>3</sub> (g)	Cloroetano	-105,0
C (diamante)	Carbono diamante	1,9	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> (s)	Glucosa	-1274,4
O <sub>2</sub> (g)	Oxígeno	0,0	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub> (s)	Sacarosa	-2221,2
O <sub>3</sub> (g)	Ozono	142,0	CH <sub>3</sub> CHO (l)	Acetaldehído	-166,4
S (rómbo)	Azufre rómbo	0,0	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> (l)	Acetona	-216,7
S (monoclínico)	Azufre monoclinico	0,3	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH (l)	1-Propanol	-255,0
CS <sub>2</sub> (l)	Disulfuro de carbono	-110,5	CH <sub>3</sub> CH=CH <sub>2</sub> (g)	Propeno o propileno	20,4
NH <sub>3</sub> (g)	Amoníaco (gas)	-46,2	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -CH <sub>3</sub> (l)	Tolueno	50,0
NH <sub>3</sub> (l)	Amoníaco (líquido)	-67,2	AgCl (s)	Cloruro de plata	-127,0
PCl <sub>3</sub> (g)	Tricloruro de fósforo	-306,4	Ca(OH) <sub>2</sub> (s)	Hidróxido de calcio	-352,0
PCl <sub>5</sub> (g)	Pentacloruro de fósforo	-398,9	CaCO <sub>3</sub> (s)	Carbonato cálcico (calcita)	-1207,6
PH <sub>3</sub> (g)	Fosfina	9,3	CaO (s)	Óxido de calcio	-635,0
AsH <sub>3</sub> (g)	Arsina	41,0	CaSO <sub>4</sub> (s)	Sulfato cálcico	-1430,0
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (s)	Ácido fosfórico	-1281,1	CuO (s)	Óxido de cobre (II)	-155,0
HNO <sub>3</sub> (l)	Ácido nítrico	-173,2	FeCl <sub>2</sub> (s)	Cloruro de hierro (II)	-342,7
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (l)	Ácido sulfúrico	-811,3	FeCl <sub>3</sub> (s)	Cloruro de hierro (III)	-403,3

Tomada de Tabla de entalpía.<sup>27</sup>

- Ecuación de Volmer- Butler

Esta ecuación permite reconocer el comportamiento de los electrones en el proceso de transferencia en los procesos de reacción y oxidación de los electrodos. Es decir, la corriente anódica se debe a la pérdida de electrones y la corriente catódica se debe a la ganancia de electrones, por lo que la densidad de corriente es el resultado de la diferencia entre las dos corrientes catódicas y anódicas, donde la  $i_0$  es la densidad de corriente en ausencia de la electrolisis que va a depender del tipo de material del electrodo, una característica del electrodo es que tiene que tener un comportamiento neutro a la reacción química; es decir, no debe reaccionar y no tiene que alterarse su estado químico, donde la fórmula de la ecuación Butler-Volmer de densidad de corriente de intercambio es:<sup>28</sup>

$$i_0 = i_a - i_c$$

<sup>27</sup> Entalpías de formación. "Quimitube". Disponible en: [http://www.quimitube.com/wp-content/uploads/2013/04/Tabla-entalpías-estandar-formacion-compuestos-organicos-e-inorganicos.pdf]

<sup>28</sup> Ecuación de Volmer-Butler, "Electrocatalisis". Disponible en: [http://docencia.udea.edu.co/cen/electroquimical/electrocatalisis/electrocatalisis.pdf]

**Donde:**

$i_a$  densidad de corriente anódica

$i_c$  densidad de corriente catódica

$i_0$  densidad de corriente de intercambio

Entonces si  $i_a > i_c$  y  $i_0 > 0$  será una corriente anódica, ahora si  $i_c > i_a$  y  $i_0 < 0$  será una corriente catódica.

$$i_a = i_0 * e^{\frac{\alpha z F n}{RT}}, i_c = i_0 * e^{\frac{(1-\alpha) z F n}{RT}}$$

**Donde:**

$e$  : constante de velocidad

$\alpha$  : coeficiente de carga  $\approx 0.5$  (anódico y catódico)

$z$  : número de electrones transferido

$F$  : constante de Faraday (96500 c)

$R$  : constante de los gases (8.31 J/mol k)

$T$  : temperatura en Kelvin

$n$  : sobrepotencial (V)

- Electroodos

Son aquellos que intervienen en el movimiento o transferencia de electrones en el proceso de la electrolisis, que para acelerar este fenómeno se le agrega una sustancia que altera el pH del agua y ayuda a romper enlaces del agua y así se obtienen átomos de hidrógeno y oxígeno.

Por lo general, se tiene que trabajar con electroodos que no reaccionen a la solución llamados electroodos inertes, de tal manera que no intervenga en la reacción química de la electrolisis, ya que nuestro objetivo es obtener el elemento hidrógeno. Es así como los electroodos presentan tres tipos de características, que sean resistentes a la solución, mínima resistencia al paso de la corriente eléctrica, y que tengan una estabilidad química. (18)

Para hallar los sobrepotenciales de los electroodos (anódico y catódico) se utilizará la fórmula de Tafel:

$$\eta_a = 2.3 * \frac{RT}{(1-\alpha)nF} + \log\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad \eta_c = 2.3 * \frac{R*T}{\alpha*n*F} * \text{Log}\left(\frac{i}{i_0}\right)$$

A mayores intensidades de corriente eléctrica la ecuación de Tafel dará altos sobrepotenciales.

### ➤ Clases de electrodo

- a) **Electrodos inertes:** aquellos que no participan en la reacción, solo dan el paso a la corriente eléctrica, (platino Pt, el Grafito, acero inoxidable).
- b) **Electrodos activos:** aquellos que participan en la reacción y se van consumiendo a medida que ocurre la reacción, (cinc Zn, Cobre Cu).
- c) **Electrodos de gases:** en esta reacción participa un electrodo inerte sumergido en la solución, el cual da por resultado un tipo de gas, (Pt/H<sub>2</sub>).
- d) **Electrodo de oxidación y reducción:** aquello donde participa un metal inerte como electrodo y puede realizar dos procesos como oxidación y reducción (Pt/Fe).
- e) **Electrodo metal ion-metal:** consiste en que un metal entra en contacto con una sal que es insoluble que a su vez está en una disolución, que contiene aniones de la sal y esta genera un cierto anión, (Ag/AgCl/Cl<sup>-</sup>).

### 2.3. Datos técnicos del motor Volkswagen 1.5 L

El motor Volkswagen presenta los siguientes datos técnicos.

- ✓ R/C de 8.3 – 1
- ✓ Cilindrada total 1493.3 cc
- ✓ Volumen cilíndrico del cilindro unitario 373.3 cc
- ✓ Volumen cámara de combustión 50.99 cc
- ✓ Diámetro del pistón 8.3 cm
- ✓ Carrera del pistón PMI-PMS 6.9 cm
- ✓ Consumo de combustible (gasolina) 8.5 L por cada 100 km
- ✓ Potencia máxima 44 cv a 4000 rpm
- ✓ Tipo de motor 4 cilindros

- ✓ Capacidad del tanque 40 L
- ✓ Par motor máximo 10 mkg – 98.067 N.m a 2800 rpm

El trabajo por realizar en base a estos parámetros técnicos sirve para poder implementar el generador de hidrógeno y sus efectos que tendrá en el motor.

### 2.3.1. Parámetros de funcionalidad del motor Volkswagen

- Velocidad lineal del pistón

Es la velocidad media con que se mueve el pistón. (19)

$$C_m = 2 * n * S \quad (2.8)$$

- Relación carrera-pistón y velocidad lineal

Este parámetro permite clasificar el tipo de motor con sus ventajas y desventajas mediante la relación  $S/D$  (carrera / pistón), la Tabla 9 muestra los valores para clasificar a nuestro motor. (19) (p. 46)

$$Relacion = \frac{S}{D} \quad (2.9)$$

**Tabla 9. Clasificación del motor de acuerdo con su S/D**

Denominación	S/D	Ventajas	Inconvenientes
Supercuadrados	< 1	Pueden girar muy deprisa (ver velocidad lineal media del pistón) Mucho espacio para válvulas	Cámara poco compacta Muchas pérdidas de calor (elevada superficie/volumen) Cigüeñal robusto por ser menor
Cuadrados	= 1	En torno a este valor están muchos motores	
Alargados	> 1	Cámara compacta.	No puede girar muy deprisa

**Tomada de Motores de combustión (19) (p. 46)**

En la Figura 21 muestra la relación del valor de S/D para la clasificación y su aplicación.

Motor MEP	S/D	Motor MEC	S/D
Competición	$\leq 0,6$	Automóvil	1,0-1,2
4T Motocicletas	0,65-0,9	Industrial / Vehículo pesado	1,1-1,2
Automóvil	0,9-1,1		
2T 2T de pequeño tamaño	1,0-1,1	2T de gran tamaño	1,8-2,8

**Figura 21. Relación S/D y su aplicación  
Tomada de Motores de combustión (19) (p. 48)**

En base al valor (S/D) el motor se fabricó para la línea de automóviles.

- Relación de compresión

La relación de compresión ( $r$ ), es que la diferencia entre el volumen unitario del cilindro y el volumen de la cámara de combustión en el PMS. (19) (p. 48)



$$r = \frac{V_h + V_c}{V_c} \quad (2.10)$$

La Tabla 10 muestra los valores de ( $r$ ) con relación al tipo de combustible que usa, en este caso el valor del motor Volkswagen  $r = 7.3$  que es un tipo de motor MPE hace referencia a que no debe ser este valor excesivo para evitar el autoencendido, a diferencia de los MEC que tienen que tener un valor elevado. (19)

**Tabla 10. Límites de relación de compresión**

Tipo de motor	$r$	Límite	Tipo de motor	$r$	Límite
MEP 4T	8,0–11	- Autoencendido $\approx 14$ para carga estratificada	MEC DI <sup>1</sup>	12–21	- Presión máxima - Arranque en frío - Pérdida de rendimiento - Cámara poco compacta - Toque de válvulas con el pistón
MEP 2T	7,5–11	Autoencendido	MEC IDI	18–24	Igual que MEC DI

<sup>1)</sup>DI significa de inyección directa al cilindro y IDI de inyección en precámara.

**Tomada de Motores de combustión (19) (p. 48)**

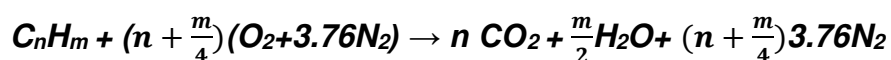
- Dosado

Este parámetro permite hallar el consumo del aire por cada kilogramo de combustible consumido, se caracteriza por la mezcla de aire-combustible. Para ello se tiene que balancear la reacción química de la combustión. (19) (p. 54)

$$F = \frac{m^{\circ}_f}{m^{\circ}_a} \quad (2.11)$$

- Dosado estequiométrico

Este parámetro estudia la relación de aire-combustible que existe en la reacción química de la combustión con la finalidad que no sobre ni aire ni combustible, se representa con la siguiente fórmula de la reacción. (19)



$$F_e = \frac{12n + m}{\left(n + \frac{m}{4}\right) * (28 + 3.76N_2)} \quad (2.12)$$

Para los combustibles más usados el rango del  $F_e$  está entre los valores de (1/14.5 – 1/15.5)

- Dosado relativo

Este parámetro mide la riqueza de la mezcla de aire y combustibles que van en la reacción químicamente en el proceso de la combustión. Se calculará con la siguiente fórmula. **(19) (p. 54)**

$$F_r = \frac{F}{F_e} \quad (2.13)$$

Según la combustión del dosado se podrá clasificar en tres tipos:

- Dosado pobre =  $F_r < 1$
- Dosado estequiométrico =  $F_r = 1$
- Dosado rico =  $F_r > 1$

Los rangos usuales del dosado relativo de acuerdo con el tipo de motor están en los siguientes valores:

- MEC=  $F_r$  (0.04,0.7)
- MEP automoción =  $F_r$  (0.9,1.3)
- MEP industrial=  $F_r$  (0.6,0.8)

De tal manera se demuestra que el  $F_e$  (dosado estequiométrico) se ajusta a los valores de la Tabla 11.

**Tabla 11. Dosado estequiométrico de los combustibles más comerciales**

Combustible	H <sub>2</sub>	Gas natural	Propano	Gasolinas	Gasóleos	Fuel-oil	Etanol
$F_e$	1/34	1/17	1/15,6	1/14,6	1/14,5	1/13,8	1/9

*Tomada de Motores de combustión (19) (p. 48)*

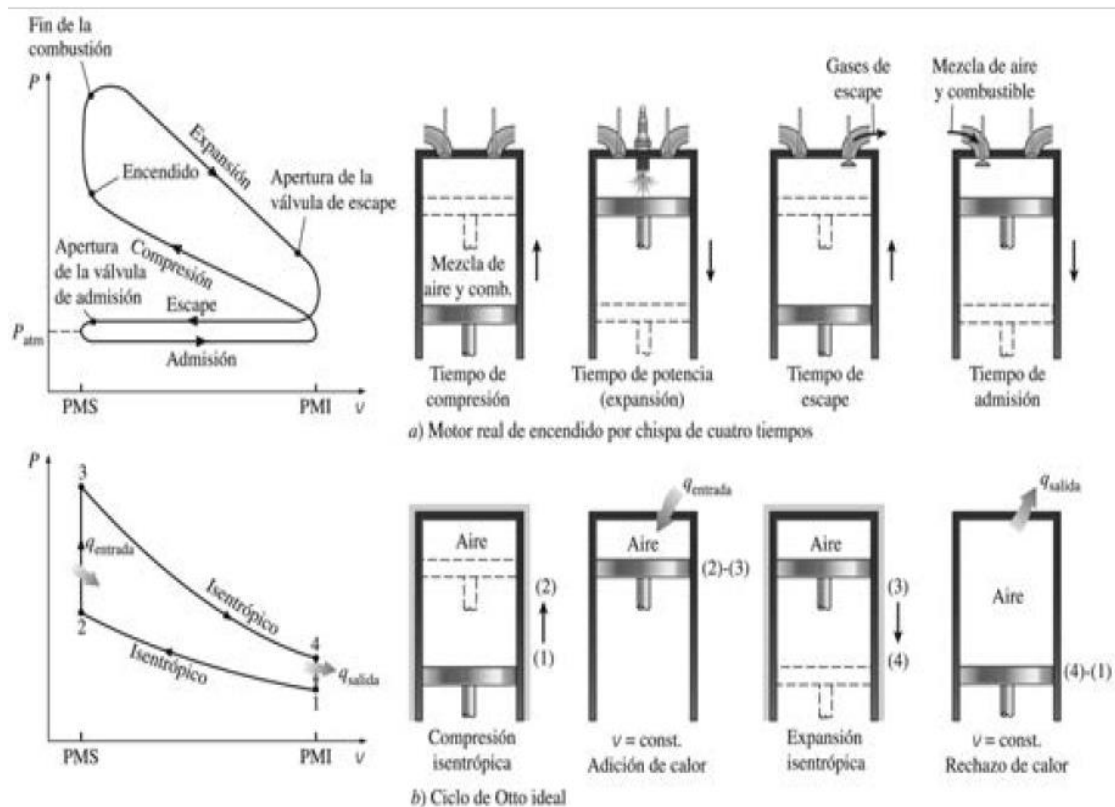
- AFR -  $\lambda$

Este parámetro que por sus siglas significa Aire-Fuel-Ratio<sup>29</sup>, va a determinar el exceso de aire, con la siguiente fórmula.

$$\lambda = \frac{F}{F_r} \quad (2.14)$$

### 2.3.2. Ciclo Otto – encendido por chispa

Este nombre Otto que reciben las máquinas reciprocantes se dio en honor a Nikolaus A. Otto, que en el año 1876 en Alemania, construyó una máquina de combustión interna, como se muestra en la Figura 22. (20)



**Figura 22. Ciclo real e ideal de motores de encendido por chispa**  
*Tomada de Termodinámica (20) (p. 498)*

<sup>29</sup> Facto Lambda. "Norma oficial Mexicana". Disponible en: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5396063](http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5396063)

### 2.3.3. Eficiencia térmica del ciclo Otto

Como se sabe, el proceso químico de la combustión se realiza en un sistema cerrado, en condiciones de aire frío, entonces la transferencia de calor que ingresa y la que sale del sistema se puede expresar mediante la fórmula (20) (p. 500):

$$\eta_{rendi.otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (2.15)$$

**Donde:**

k : relación de calores específicos ( $C_p / C_v$ )

r : relación de compresión

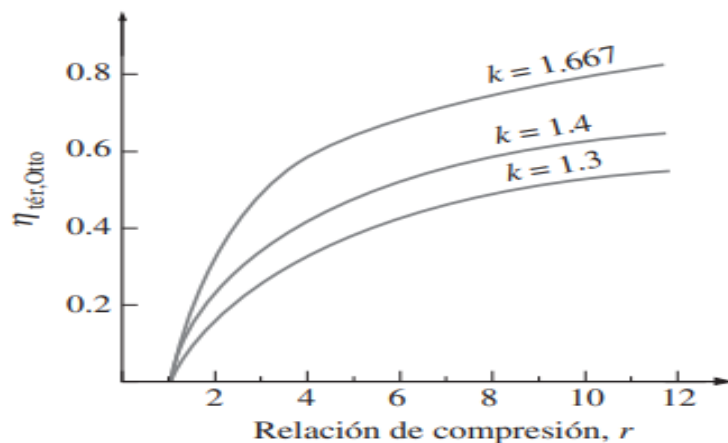
La eficiencia térmica ideal del ciclo Otto, aumenta con la relación de compresión y con la relación de calores específicos, es decir mientras se tiene una relación de compresión elevada y la temperatura de la mezcla aire-combustible se incrementa por encima de la temperatura de autoencendido (temperatura donde el combustible se enciende sin presencia de una chispa), con la que se producirá un rápido quemado del combustible y un rápida combustión instantánea, a este prematuro encendido del combustible se le conoce como autoencendido y este ocasiona ciertas anomalías en el motor como golpeteos, vibraciones, cascabeleos, haciendo que el rendimiento del motor baje. (20)

El uso de relación de compresión altas, aproximadamente de 12, con relación a la eficiencia térmica en máquinas con gasolina sin que se produzcan problemas de autoencendido, ha sido posible gracias a las mejores características químicas antidetonantes como el uso de tetraetilo de plomo, es así como este tipo de gasolina desde 1920 se había convertido en un método muy económico para elevar el octanaje de su resistencia al golpeteo del motor. (20)

En 1970 el gobierno de los Estados Unidos dio una política para dejar de producir gasolina con plomo ya que este compuesto al quemarse producía daños muy severos para los seres vivos y el medio ambiente. A partir de 1975 se

empezaron a fabricar autos con diseño de uso de gasolina sin plomo y con relaciones de compresión bajas, esto para evitar los golpeteos, esto estuvo también relacionado con los diseños del mismo vehículo como su peso, diseño aerodinámico u otro tipo de sistemas de inyección; en efecto, estos cambios permitieron hasta la actualidad que los vehículos recorran más kilometraje con menos combustible. (20)

La relación de calores específicos  $k$  es uno de los parámetros que afecta directamente la eficiencia térmica del ciclo Otto, la Figura 23 indica la relación que existe entre la eficiencia térmica del ciclo Otto que aumenta con respecto a los calores específicos en el sistema. (20)



**Figura 23. Eficiencia térmica Tomada de Termodinámica (21)**

#### 2.3.4. Entalpía de formación y entalpía de combustión

En una reacción química se rompen enlaces químicos de los reactivos y como resultado originan otros compuestos químicos en los productos, en todo este proceso la energía liberada o absorbida es diferente en el proceso químico de los reactivos y productos. (21)

Durante una reacción química los elementos que salen en el proceso, como ingresaron en el proceso de reactivos y no han cambiado su composición química su  $\Delta E = 0$ .

En una reacción química cuando el proceso no ha sufrido cambios químicos en las sustancias, su estado de referencia no tiene efectos, pero si en una reacción química da como resultados cambios químicos, es decir lo que entró al sistema sale con otra formación de sustancias, entonces se tomará con el nombre de estado de referencia estándar, que es a 25 °C y a 1 atm. (21)

Es entonces que la transferencia de calor que se libera en un proceso exotérmico se define como la diferencia de entalpía de los productos y la entalpía de los reactivos.

$$Q = H_{\text{prod}} - H_{\text{react}}$$

En cambio, en la reacción química de la combustión, la entalpía de combustión  $h_c$  se define como la diferencia entre la entalpía de los productos y, la entalpía de los reactivos a condiciones normales, indica el calor liberado cuando se quema 1 kg de combustible, se expresa mediante la siguiente fórmula. (21)

$$h_c = H_{\text{prod.}} - H_{\text{reacc.}} \quad (2.16)$$

Se tiene en claro que la entalpía de combustión es distinta para la quema de los diferentes combustibles y que indican particularmente su temperatura y presión específica. La entalpía de formación  $h_f$  establece que todos los elementos químicos estables como el ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$  y  $C$ ) tienen un valor de cero, en sus estados de referencia estándar (25 °C y 1 atm),  $h_f = 0$ , por ejemplo en la formación del  $CO_2$ , el carbono en su estado de referencia estándar es un elemento químico monoatómico. (20)

Mientras que el oxígeno en su estado de referencia estándar existe como un elemento químico diatómico, obteniendo que su cambio de entalpía en esta reacción química es de -393520 KJ/kmol, puesto que la  $H_{\text{reactivos}} = 0$ , puesto que ambos elementos reactivos están en su estado estable con  $h = 0$ . (20)

El signo positivo indica que en esta reacción hubo liberación de calor que se manifiesta en los alrededores de la máquina, en cambio un valor positivo indicará

que hubo absorción de energía, en la Tabla 12 se dan algunos valores de entalpías de formación. (20)

**Tabla 12. Entalpía de formación  $h_f$**

Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a 25°C, 1 atm				
Sustancia	Fórmula	$\bar{h}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{g}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol · K
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	+226,730	+209,170	200.85
Agua	H <sub>2</sub> O(l)	-285,830	-237,180	69.92
Alcohol etílico	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(g)	-235,310	-168,570	282.59
Alcohol etílico	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(l)	-277,690	-174,890	160.70
Alcohol metílico	CH <sub>3</sub> OH(g)	-200,670	-162,000	239.70
Alcohol metílico	CH <sub>3</sub> OH(l)	-238,660	-166,360	126.80
Amoniaco	NH <sub>3</sub> (g)	-46,190	-16,590	192.33
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)	+82,930	+129,660	269.20
n-butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	-126,150	-15,710	310.12
Carbón	C(s)	0	0	5.74
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub> (g)	-393,520	-394,360	213.80
n-dodecano	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> (g)	-291,010	+50,150	622.83
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	-84,680	-32,890	229.49
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	+52,280	+68,120	219.83
Hidrógeno	H <sub>2</sub> (g)	0	0	130.68
Hidrógeno	H(g)	+218,000	+203,290	114.72
Hidroxilo	OH(g)	+39,460	+34,280	183.70
Metano	CH <sub>4</sub> (g)	-74,850	-50,790	186.16
Monóxido de carbono	CO(g)	-110,530	-137,150	197.65
Nitrógeno	N <sub>2</sub> (g)	0	0	191.61
Nitrógeno	N(g)	+472,650	+455,510	153.30
n-octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g)	-208,450	+16,530	466.73
n-octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (l)	-249,950	+6,610	360.79
Oxígeno	O <sub>2</sub> (g)	0	0	205.04
Oxígeno	O(g)	+249,190	+231,770	161.06
Peróxido de hidrógeno	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	-136,310	-105,600	232.63
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	-103,850	-23,490	269.91
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g)	+20,410	+62,720	266.94
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O(g)	-241,820	-228,590	188.83

Fuente: De JANAF, *Thermochemical Tables*, Midland, MI, Dow Chemical Co., 1971, *Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties*, NBS Technical Note 270-3, 1968; y *API Research Project 44*, Carnegie Press, 1953.

Tomada de *Termodinámica (20)* (p. 948)

### 2.3.5. Poder calorífico del combustible

Es el calor que se libera cuando se quema una cantidad de combustible, y esto no es más que el valor absoluto de la entalpía de combustión del combustible. (19)

$$\text{Poder calorífico} = |h_c|$$

El poder calorífico depende de la fase con la que se encuentra el agua en los productos. Tomando como nombre poder calorífico superior cuando el agua está en la fase líquida y se llama poder calorífico inferior cuando la fase del agua esta como vapor. (19)

$$\text{PCS} = \text{PCI} + mh_{fg}$$

**Donde:**

m: masa del agua en los productos

$h_{fg}$ : entalpía de agua en la fase de vaporización

En la Tabla 13 se proporcionan los valores superiores e inferiores de los poderes caloríficos de los combustibles más utilizados.

**Tabla 13. Propiedades de los combustibles más utilizados**

Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos comunes							
Combustible (fase)	Fórmula	Masa molar, kg/kmol	Densidad, <sup>1</sup> kg/L	Entalpía de vaporización, <sup>2</sup> kJ/kg	Calor específico, <sup>1</sup> $c_p$ kJ/kg · K	Poder calorífico superior, <sup>3</sup> kJ/kg	Poder calorífico inferior, <sup>3</sup> kJ/kg
Acetileno (g)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Benceno (ℓ)	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Butano (ℓ)	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
Carbono (s)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Decano (ℓ)	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Diesel ligero (ℓ)	C <sub>n</sub> H <sub>1.8n</sub>	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Diesel pesado (ℓ)	C <sub>n</sub> H <sub>1.7n</sub>	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Etano (g)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Etanol (ℓ)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Gas natural (g)	C <sub>n</sub> H <sub>3.8n</sub> N <sub>0.1n</sub>	18	—	—	2	50,000	45,000
Gasolina (ℓ)	C <sub>n</sub> H <sub>1.87n</sub>	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Heptano (ℓ)	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Hexano (ℓ)	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexeno (ℓ)	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Hidrógeno (g)	H <sub>2</sub>	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Isopentano (ℓ)	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Metano (g)	CH <sub>4</sub>	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Metanol (ℓ)	CH <sub>4</sub> O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Monóx. de carbono (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Octano (ℓ)	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
1-Penteno (ℓ)	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Propano (ℓ)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	0.500	335	2.77	50,330	46,340
Tolueno (ℓ)	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500

<sup>1</sup>A 1 atm y 20°C.

<sup>2</sup>A 25°C para combustibles líquidos, y 1 atm y temperatura normal de ebullición para combustibles gaseosos.

<sup>3</sup>A 25°C. Multiplique por la masa molar para obtener los valores caloríficos en kJ/kmol.

**Tomada de Termodinámica (20) (p. 948)**

### 2.3.6. Gasto del aire

La menor cantidad de oxígeno que se necesita suministrar desde el exterior al combustible para que se produzca su completa oxidación, considerando que la masa del aire es aproximadamente 23% y su volumen 21%, se obtiene la



cantidad teórica de aire necesario para quemar 1 kg de combustible (kg). (22) (p. 48)

- Cantidad teórica en kg

Es el consumo teórico de masa de aire con relación a la masa de aire. (22) (p. 48)

$$l_0 = \frac{1}{0.23} * \left( \frac{8}{3}C + 8H - O \right) \quad (2.17)$$

- Cantidad teórica en Kmol. (22) (p. 48)

$$L_0 = \frac{1}{0.21} * \left( \frac{C}{21} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = \frac{C}{21} (0.79 + \beta) \quad (2.18)$$

La masa molecular del aire es  $\mu_a=28.97$  por lo que el consumo teórico quedaría así (22) (p. 48):

$$l_0 = \mu_a * L_0 = 28.97 * L_0 \quad (2.17.1)$$

Las características de  $\beta$  dependerán de la composición del combustible y de la cantidad de aire, se puede ver en la Tabla 13. (22) (p. 49)

$$\beta = \frac{2.37}{C} * \left( H - \frac{O}{8} \right) \quad (2.18.1)$$

- Coeficiente de exceso de aire

Es la relación de la cantidad real de aire que ingresa al cilindro del motor y la cantidad de aire teórico necesario para quemar 1 kg de carburante, para una mezcla estequiométrica. (22) (p. 49)

$$\alpha = \frac{L}{L_0} = \frac{l}{l_0} \quad (2.19)$$

Si  $\alpha < 1$  (insuficiente oxígeno, mezcla rica), si  $\alpha > 1$  (exceso de oxígeno, mezcla pobre). En los motores de gasolina la máxima potencia se obtiene enriqueciendo ligeramente la mezcla ( $\alpha = 8.85 \dots 0.90$ ), (22) (p. 50)

- Mezcla carburante y productos de la combustión

En una combustión completa por encendido por chispa, donde se suministra mezcla de combustible y aire (kmol), está constituida por vapores de combustible y aire, la cantidad total de mezcla carburante está dada por la siguiente fórmula, cuando  $\alpha > 1$ . (22) (p. 50)

$$M_1 = \alpha L_0 + \frac{1}{\mu_c} \quad (2.20)$$

- Masa de la mezcla (kg)

Este parámetro cumple para cualquier combustible. (22) (p. 51)

$$G_1 = 1 + \alpha l_0 \quad (2.21)$$

- Cantidad total de productos de la combustión (kmol)

Cuando la mezcla de aire y combustible se quema (combustión completa o incompleta), se producen ciertos fenómenos químicos por acción de la ausencia de oxígeno, es entonces que parte del carbono de la gasolina no se quema y forma monóxido de carbono, así parte del hidrógeno del combustible no reacciona con el oxígeno, este fenómeno termoquímico no se relaciona con el valor que pueda tomar  $\alpha$ , si es  $>1$ , o  $<1$ . (22) (p. 53)

Sin embargo existen equipos de medición de gases que comprueban esta teoría, tales como el analizador *Orsat*, el cromatógrafo de gases, el analizador de gases por infrarrojo y el detector de ionización de llamas. Todos estos instrumentos se utilizan para determinar el porcentaje de los productos quemados por efecto de la combustión. (21) (p. 429)

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{O_2} + M_{N_2} + M_{H_2} + M_{CO} \quad (2.22)$$

Donde:

- $M_{CO} = 0.42 \frac{1-\alpha}{1+k} L_0$
- $M_{CO_2} = \frac{c}{12} - M_{CO}$
- $M_{H_2} = kM_{CO}$
- $M_{H_2O} = \frac{H}{2} - M_{H_2}$
- $M_{O_2} = \frac{c}{12 \cdot 0.79} (0.79 + \beta)(\alpha - 1)$
- $M_{N_2} = 0.79\alpha L_0$

El valor de K estará en el rango de (0.45...0.5)

- Variación de volumen

Para determinar si todos los productos se quemaron en una combustión completa, se infiere que el número de moles que ingresaron no es igual al número de moles de los productos, para lo cual existe una variación y está determinada por la siguiente fórmula. (22) (p. 63)

$$\Delta M = M_2 - M_1 \quad (2.23)$$

- Coeficiente teórico (22) (p. 64)

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1} \quad (2.24)$$

- Parámetros de admisión

El llenado del cilindro por la carga fresca de aire depende de ciertos factores como la resistencia hidráulica en el sistema de admisión, la existencia de ciertas cantidades de productos quemados, de la temperatura de las paredes del motor por acción del mismo funcionamiento, estos fenómenos mencionados en la recarga y barrido del pistón hacen posible hallar aproximadamente la presión

dentro del cilindro durante el tiempo de admisión, con la siguiente ecuación. (22)  
(pp. 87, 89)

$$P_a = P_0 - (\beta^2 + \xi) * \frac{w_{ad}^2}{2} * \rho_0 * 10^{-6} \quad (2.25)$$

**Donde:**

- $P_a$  presión de admisión (Mpa), está entre los valores de (0.8...0.9)
  - $P_0$  presión inicial (Pa)
  - $(\beta^2 + \xi)$  coeficiente de amortiguación y resistencia (adimensional), se encuentra entre los valores (2.5...3...4). (22)
  - $w_{ad}$  velocidad de aire en la entrada de admisión, se encuentra entre los valores de (50...90...130), (m/s). (22)
  - $\rho_0$  densidad de la carga de admisión ( kg/m<sup>3</sup>)
- Densidad de carga ( $\rho_0$ )

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R * T_0} \quad (2.25.1)$$

**Donde:**

- $P_0$  equivalente a 1 atm (0.1013 Mpa)
- $T_0$  temperatura inicial 15 °C (288.15 °K)
- $R$  constante de los gases, 286.9 (J/kg K).
- $Y_r$  coeficiente residual de los gases. (22) (p. 97)

$$Y_r = \frac{P_r}{P_{ar} - P_r} * \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \quad (2.26)$$

**Donde:**

- $P_r$  presión de los gases residuales = 0.12 Mpa
- $\Delta T$  variación de temperatura ambiente =15 °C

- $T_r$  temperatura de los gases residuales = 1050 K  
Estos parámetros se están tomando como referencia en NTP. (22)
- $T_a$  temperatura al final de la admisión

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + Y_r T_r}{1 + Y_r} \quad (2.27)$$

**Tabla 14. Densidad del aire con relación a su nivel de altura**

<b>Composición química elemental de la gasolina</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Gasolina</b>	<b>Unidades</b>
C	0.855	
H	0.145	
O	--	
Masa molar media $\mu_c$	110-120	
Poder calorífico	44	MJ/kg
Poder calorífico $\alpha=1$	83.9	MJ/kmol
Cantidad de aire teórico para quemar 1 kg de gasolina	0.516	Kmol
Características del combustible $\beta$	0.402	

**Tomada de Características del aire (23)**

- Rendimiento volumétrico

Este parámetro mide el llenado real del motor, comparado con el llenado teórico a una temperatura referencial (g/s). (22) (p. 96)

$$n_v = \frac{m_{real}^o}{m_{referencial}^o} = \frac{r}{r-1} * \frac{P_a}{P_0} * \frac{T_0}{T_a(1-Y_r)} \quad (2.28)$$

- Parámetros de compresión

Presión y temperatura al final de la compresión. (22)

$$P_c = P_a * r^{n_1} \quad (2.29)$$

$$T_c = T_a * r^{n_1-1} \quad (2.30)$$

**Donde:**

➤  $n_1$  exponente politrópico, utilizado en motores con encendido por chispa con carburador. (22) (p. 118)

- Parámetros al final de la combustión

$$\mu_t = \frac{\mu_0 + Y_r}{1 + Y_r} \quad (2.31)$$

**Donde:**

➤  $\mu_t$  coeficiente real de la variación molecular. (22) (p. 118)

$$\Delta H_u = 114 * 10^6 (1 - \alpha) L_0 \quad (2.32)$$

**Donde:**

➤  $\Delta H_u$  calor no desprendido por efecto de la combustión  $\alpha < 1$ , (MJ/Kmol)

- Ecuación de la combustión  $\alpha < 1$  (22) (p. 155)

$$\mu_t U''_z = \frac{\xi_z [\text{PCI} - \Delta H_u]}{M_1 (1 + Y_r)} + \frac{U_c - Y_r U''_c}{(1 + Y_r)} \quad (2.33)$$

**Donde:**

➤  $\xi_z$  coeficiente de aprovechamiento de calor = 0.85. (22) (p. 156)

➤  $U_c$  energía interna de mezcla fresca de 1mol al final del proceso de compresión.  $= (\mu c_v) T_c$ ,  $T_c$  la temperatura del final de la compresión en °C,  $\mu c_v$  es el calor específico de la mezcla fresca a la temperatura de  $T_c$  (KJ/Kmol C°). (22)

➤ Del Anexo 7, se interpola y halla el calor específico  $\mu c_v$ .

➤  $U''_c$  energía interna de 1mol de productos de la combustión al final del ciclo de compresión  $= (\mu c_v)'' T_c$ , (KJ/Kmol), donde  $(\mu c_v)''$  es el calor específico de los productos de combustión al final de ciclo de la compresión. (22)

- El calor específico de mezcla resultará de multiplicar los calores específicos de cada uno de los componentes en los productos por sus fracciones volumétricas. (22)
- $U''_z$  energía interna en los productos de la combustión, para  $\alpha < 1$ , y el valor de la  $T_z$  dependerá del valor obtenido  $U''_c$  el cual se interpolarán valores del Anexo 8.

Presión al final de la combustión. (22) (p. 159)

$$P_z = \mu_t P_c \frac{T_z}{T_c} \quad (2.34)$$

**Donde:**

- $P''_z$  presión máxima del ciclo, se multiplica por su factor de corrección, (Mpa). (22) (p. 159)

$$P''_z = P_z * 0.85 \quad (2.34.1)$$

- Parámetros del proceso de expansión

Presión y temperatura al final de la expansión. (22) (p. 159)

$$P_b = \frac{P_z}{r^{n_1}} \quad (2.35)$$

$$T_b = \frac{T_z}{r^{n_1-1}} \quad (2.36)$$

- Presión media indicada (pmi)

Potencia que se desarrolla en los pistones por acción de la combustión y parte de esta potencia se deriva para vencer las fricciones de metales, el bombeo, la admisión de aire, mover elementos mecánicos como alternador, bomba de agua, etc. (19) (p. 59)

$$\text{pmi} = P_a \frac{r^{n_1}}{r-1} \left[ \frac{\lambda}{n_2-1} \left( 1 - \frac{1}{r^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left( 1 - \frac{1}{r^{n_1-1}} \right) \right] \quad (2.37)$$

**Donde:**

- $n_1$  exponente politrópico = 1.34, Anexo 12. (22) (p. 118)
- $n_2$  exponente politrópico = 1.24. Anexo 11. (22) (p. 161)
- $\lambda$  grado de elevación de la Presión. (22) (p. 156)

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c} \quad (2.37.1)$$

La pmi se multiplica por su factor de corrección, como indica la expresión, (Mpa). (22) (p. 168)

$$p_{mi}'' = p_{mi} * 0.97 \quad (2.37.2)$$

- Parámetros principales del ciclo  
Presión media por pérdidas mecánicas.

$$p_{mpm} = A + BC_m \quad (2.38)$$

Los coeficientes A, B son insertados del Anexo 9. (22) (p. 212)

- Presión media efectiva. (19) (p. 63)

$$p_{me} = p_{mi} - p_{mpm} \quad (2.39)$$

- Rendimiento mecánico  
Relación entre la energía mecánica que se obtiene del cigüeñal y la del pistón.  
(19) (p. 62)

$$n_m = \frac{p_{me}}{p_{mi}} = \frac{N_e}{N_i} = \frac{W_e}{W_i} \quad (2.40)$$



- Consumo específico indicado de combustible

Este parámetro mide el consumo en gramos o litros del combustible con relación a la potencia que produce el motor, y se calcula mediante la siguiente fórmula. (22) (p. 174)

$$g_i = \frac{1}{n * PCI} = 3600 \frac{n_v * \rho_0}{pmi * \alpha * l_0} \quad (2.41)$$

Rango del consumo específico MEP= (245,300) g/kWh. (22) (p. 179)

- Consumo específico efectivo del combustible. (g/kWh). (22) (p. 178)

$$g_e = \frac{g_i}{n_m} \quad (2.42)$$

- Consumo horario de combustible (kg/h). (22) (p. 179)

$$G_e = g_e N_e * 10^{-3} \quad (2.42.1)$$

- Rendimiento indicado

El rendimiento indicado del ciclo se expresa cuando el PCI del combustible  $H_u$  está en estas unidades (MJ/kg), con la siguiente expresión (22) (p. 174):

$$n_i = \frac{3600}{g_i H_u} \quad (2.43)$$

- Rendimiento efectivo (22) (p. 178)

$$n_e = n_i n_m \quad (2.44)$$

### 2.3.7. Otros parámetros efectivos

Estos parámetros se relacionan con los aspectos mecánicos y termodinámicos del ciclo de motor. (19)

- Par efectivo (19) (p. 61)

$$T_e = \frac{N_e}{2 * n * \pi} \quad (2.45)$$

- Potencia efectiva

Este tipo de potencia se calcula desde los esfuerzos que realizan las bielas sobre el eje cigüeñal para que realice los ciclos de trabajo de combustión. Se calcula con las siguientes fórmulas. (19) (p. 61)

$$N_e = \frac{tV_h * p_{me} * n}{0.507 * \tau} \quad (2.46)$$

**Donde:**

- $tV_h$  cilindrada total en  $m^3$
- $n$  números revoluciones por segundo
- $\tau$  número de ciclos de trabajo

- Trabajo efectivo ( $W_e$ )

Trabajo que realiza un motor desde su cigüeñal en sus ciclos de trabajo y se calcula mediante la siguiente fórmula. (19) (p. 62)

$$W_e = \frac{N_e}{i * n} \quad (2.47)$$

### 2.3.8. Parámetros de pérdidas mecánicas

Estos parámetros son atribuidos a las pérdidas de energía mecánica que se producen o existen en el pistón con las que se tienen en el eje del cigüeñal, el cual se relaciona con las tres pérdidas (19):

- Pérdidas por fricción
- Pérdidas de bombeo
- Pérdidas por accionamientos auxiliares

- Potencia absorbida por pérdidas mecánicas ( $N_{pm}$ )

Potencia que se relaciona con las pérdidas en la energía en el cigüeñal y en el pistón. (19) (p. 65)

$$N_{pm} = N_i - N_e \quad (2.48)$$

- Trabajo de pérdidas mecánicas ( $W_{pm}$ )

Es el resultado de la diferencia del trabajo indicado y el trabajo efectivo, que se expresa a través de pérdidas mecánicas como fricción, bombeo, y otros componentes. (19) (p. 62)

$$W_{pm} = W_i - W_e \quad (2.49)$$

### 2.3.9. Parámetros indicados

Estos parámetros se relacionan con los aspectos termodinámicos.

- Potencia indicada ( $N_i$ )

Esta potencia es la que se desarrolla en el cilindro durante el proceso real de combustión, se puede calcular desde un ciclo determinado con la siguiente fórmula. (19) (p. 66)

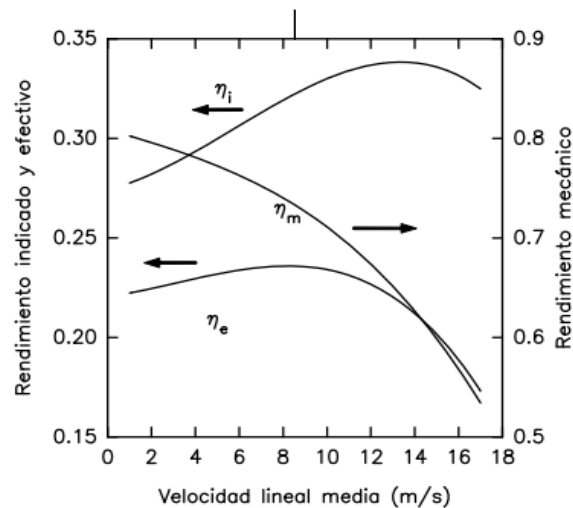
$$N_i = \frac{tV_h * p_{mi} * n}{0.507 * \tau} \quad (2.50)$$

- Trabajo indicado ( $W_i$ )

Es el trabajo que se obtiene en el proceso mecánico y químico en los ciclos de admisión y compresión, y se calcula con la siguiente fórmula. (19) (p. 67)

$$W_i = \frac{N_i}{i * n} \quad (2.51)$$

En la Figura 24 se muestra la relación entre los rendimientos mecánicos, efectivos e indicados.



**Figura 24. Relación de parámetros de rendimientos  $i, e, pm$   
Tomada de Parámetros (19)**

- Fuerza

Fuerza *que* los gases ejercen sobre el embolo o pistón. (19) (p. 65)

$$F = p_{me} * A_p \quad (2.52)$$

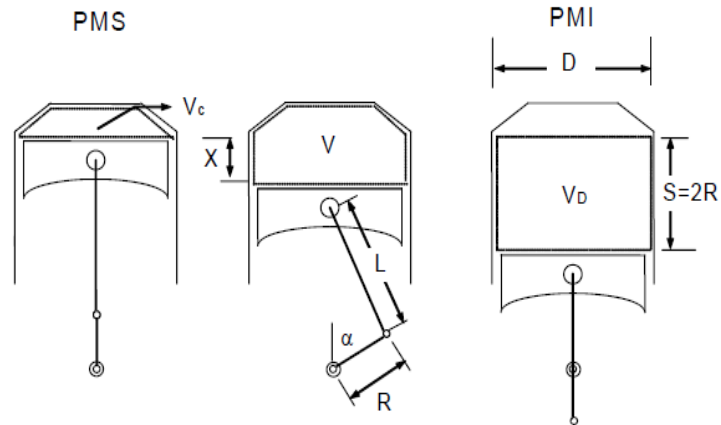
**Donde:**

$A_p$ : área del pistón  $cm^2$

### 2.3.10. Parámetros geométricos

Estos parámetros indican las dimensiones, distancias mecánicas del motor, como (23):

- Carrera (S)
- Diámetro del pistón (D)
- Radio muñequilla (R)
- Ángulo de giro del cigüeñal ( $\alpha$ )



**Figura 25. Geometría del pistón, biela y cigüeñal**  
Tomada de *Motores de combustión* (19)

**Donde:**

- **$A_p$** : área de pistón
  - **$V_h$** : volumen desplazado
  - **$V_c$** : volumen de la cámara de combustión
  - **$tV_h$** : cilindrada total
- Z: números de cilindros

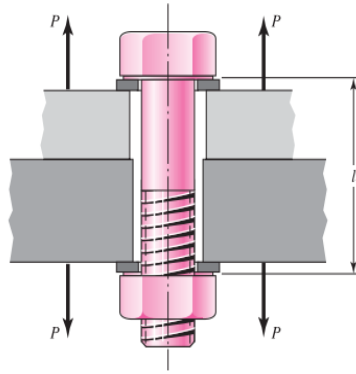
$$A_p = \frac{\pi * D}{4} \quad (2.53)$$

$$V_h = \frac{\pi * D^2}{4} * S \quad (2.54)$$

$$tV_h = Z * V_d \quad (2.55)$$

### 2.3.11. Pernos (sujetadores)

Los pernos no roscados, al aplicar una precarga para su ajuste a un determinado cuerpo soportan ciertos esfuerzos como la tensión, como se puede ver en la Figura 26.



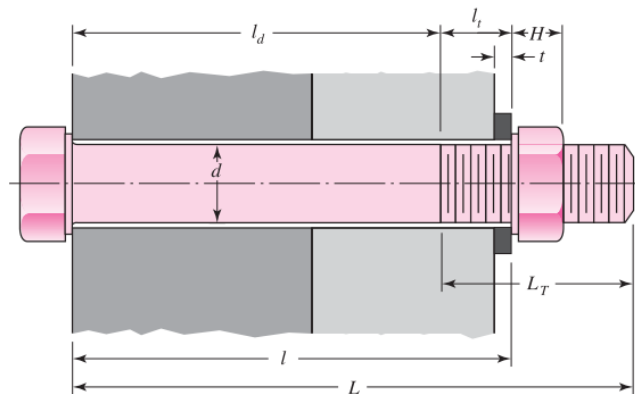
**Figura 26. Sujetador**  
Tomada de Tornillos y sujetadores (24)

- Rigidez del perno

Para el cálculo de la rigidez del perno se determinará mediante las siguientes fórmulas:

- Espesor de arandela

Para determinar el espesor de la arandela a utilizar se debe aclarar primero si el perno es milimétrico o es en pulgadas, para ello se usa la guía de la Figura 27.



**Figura 27. Dimensiones del sujetador**  
Tomada de Rigidez del elemento (24)

**Donde:**

- $L_t$  longitud roscada

$$L_t = 2d + \frac{1}{4}pulg, L \leq 6pulg \quad (2.56)$$

$$L_t = 2d + \frac{1}{2}pulg, L \geq 6pulg \quad (2.57)$$

- $l$  espesor de agarre
- $L$  longitud del sujetador
- $l_d$  longitud de la parte útil sin roscar

$$l_d = L * L_t \quad (2.57.1)$$

- $l_t$  longitud de la parte roscada

$$l_t = l * l_d \quad (2.57.2)$$

- $d$  diámetro del perno

- Rigidez del perno

La rigidez de la parte de un perno o de un tornillo dentro de la zona de sujeción en general consistirá en dos partes, la de la parte del cuerpo sin rosca y la de la parte roscada. (24)

$$k_b = \frac{A_d E}{l} \quad (2.58)$$

**Donde:**

- $l$  longitud Figura 27
- $A_d$  área del diámetro mayor del sujetador
- $E$  módulo de elasticidad Tabla 26

- Precarga

Se considera a la fuerza externa aplicada a la unión de pernos, o más conocido el apriete y está dado por la siguiente fórmula, para conexiones no permanentes  $0.75 * F_p$ , para conexiones permanentes  $0.9 * F_p$ . (24) (p. 427)

$$F_i = 0.75A_t * S_p \quad (2.59)$$

**Donde:**

➤  $S_p$  resistencia de prueba de la Tabla 27

- Esfuerzo de precarga. (24) (p. 399)

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_t} \quad (2.59.1)$$

**Donde:**

➤  $A_t$  área de esfuerzo de tensión, Tabla 23

- Rigidez de los elementos

Todo elemento que es sometido a esfuerzo de compresión se comporta como unos resortes, que es una manera de reaccionar ante la carga sometida, se calcula con la siguiente fórmula. (24)

$$k_m = \frac{A_m E}{l} \quad (2.60)$$

**Donde:**

➤  $A_m$  área del cuerpo sometido a presión.

- Contante de rigidez de la unión

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} \quad (2.61)$$

- Esfuerzo del perno (24) (p. 430)

$$\sigma_a = \frac{CP}{2 A_t} \quad (2.62)$$



- Ecuación de Goodman del perno (24) (p. 431)

$$S_a = \frac{S_e(S_{ut} - \sigma_i)}{S_{ut} + S_e} \quad (2.63)$$

**Donde:**

- $S_e$  resistencia a la fatiga (24) (p. 430)
- $S_{ut}$  resistencia mínima a la tensión, Tabla 27

## 2.4. Definición de términos básicos

### 2.4.1 Definiciones básicas

SAE	Sociedad de Ingenieros Automotores
ASTM	Asociación Americana de Ensayos Materiales
LIE	Límite inferior de explosividad
LSE	Límite superior de explosividad
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
HC	Hidrocarburos sin quemar
CAD	Diseño asistido por computadora
AWG	Calibres de alambres estadounidense
VDI	Asociación Alemana de Ingenieros
MEC	Motor encendido por combustión
MEP	Motor encendido provocado
PCI	Poder calor inferior
PCS	Poder calor superior

### 2.4.2. Simbología básica

Densidad de corriente de celda	$i_0$	A/m <sup>2</sup>
Intensidad de corriente	$I$	A
Par	$M$	Nm
Calor	$Q$	J
Calor por unidad de tiempo	$Q^\circ$	W

Volumen	$V$	$m^3$
Constante de Faraday	$F$	$c$
Entalpía de formación estándar	$\Delta H^\circ$	$KJ/mol$
Constante de los gases	$R$	$8.31 J/mol k$
Potencial estándar de reducción y oxidación	$\varepsilon^\circ$	$V$
Presión media efectiva	$p_{me}$	$Pa (bar)$
Presión media indicada	$p_{mi}$	$Pa (bar)$
Presión media de pérdidas mecánicas	$p_{mpm}$	$Pa (bar)$
Trabajo efectivo, trabajo indicado	$W_e, W_i$	$Joule$
Cilindrada unitaria	$V_h$	$m^3$
Cilindrada total	$tV_h$	$m^3$
Diferencial de potencial	$\Delta\varepsilon^\circ$	$V$
Energía libre de Gibbs	$\Delta G$	$J/mol$
Temperatura kelvin	$k$	
Sobrepotencial anódico, catódico	$\eta_a, \eta_c$	$V$
Relación de compresión	$r$	
Poder calorífico	$PC$	$J/kg^{-1}$
Potencia efectiva, potencia indicada	$N_e, N_i$	$W$
Régimen de giro	$n$	$s^{-1}$
Masa de aire, masa de combustible	$m_a, m_f$	$kg$
Consumo específico de combustible	$g_{ef}$	$g/kWh$
Gasto de aire, gasto de combustible	$m^\circ_a, m^\circ_f$	$kg/s^{-1}$
Dosado estequiométrico, relativo, absoluto	$F_e, F_r, F$	
Velocidad lineal media de pistón	$cm$	$m/s^{-1}$
Aceleración de la gravedad	$g$	$m/s^{-2}$
Rendimiento efectivo, indicado	$\eta_e, \eta_i$	
Rendimiento mecánico, volumétrico	$\eta_m, \eta_v$	
Área de superficie de pistones	$A_p$	$m^2$

### 2.4.3. Subíndices

Incremento	$\Delta$
Cilindro y ciclo	$cc$
Efectivo, indicado	$e, i$

Combustible	$f$
Pérdidas mecánicas	$p_m$
Densidad	$\rho$
Numero de ciclos por vuelta	$i$
Relación de semejanza	$\lambda$
Número de cilindros	$z$

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

Para el presente trabajo de tesis, se está tomando como base, modelo y recomendación la norma Alemana VDI2221 que por sus siglas significa (Asociación Alemana de Ingenieros), y que lleva por título “Metodología de Diseño en Ingeniería Mecánica”, a partir de ello se direccionó la estructura del modelo metodológico, para determinar la óptima solución al trabajo estudiado con la finalidad que se cumpla con todos los objetivos propuestos. (25)

#### **3.1. Método aplicativo para el desarrollo del diseño de la solución**

##### **3.1.1. Planteamiento del diseño**

Para la realización y ejecución del trabajo de investigación se realizó en base a una necesidad ya que se evaluó de un modelo teórico a una solución con una realización física.

- Inicio de la fase del diseño

En esta fase se relaciona la situación actual o situación problemática con respecto al problema estudiado de acuerdo con sus exigencias.

- Asumir el problema en forma crítica

En esta fase se asume el problema en forma crítica; es decir, se deberá tener en cuenta aspectos verdaderos poniéndolos como legales, a fin de evitar

inconvenientes como falsos datos, duplicidad de trabajo de investigación, falsos diseños, incumplimiento con el tiempo de entrega.

➤ Indagar el estado de arte

En esta fase se asocia toda la información o literatura como libros, folletos científicos, revistas, catálogos, con la finalidad de que toda esta información sirva para reunir información de estudio, y sirva como información y soporte al diseñador.

➤ Poner las exigencias, ordenar y cuantificar

En esta fase se tiene como objetivo satisfacer el diseño, para lo cual se empezará a ordenar y completar la lista para elaboración del diseño, de acuerdo con las exigencias establecidas y su prioridad como se muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15. Lista de exigencias**

LISTA DE EXIGENCIAS		EDICION:	Pág. __ de __
PROYECTO		CLIENTES	Fecha:
			Autor:
Características	Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

*Tomada de Barriga Gamarra (25)*

➤ Programar el desarrollo del proyecto de tesis

En esta base se establecerán los plazos para la elaboración de la tesis, teniendo en cuenta la buena distribución de todos los recursos y los materiales como se muestra en la Tabla 16.

**Tabla 16. Desarrollo del proyecto**

ACTIVIDAD	SEMANAS							TIEMPO
	1	2	3	4	5	..	...	
1. Lista de exigencias								
2. Estructura de funciones								
3. ....								
.....								
....								
...								
TOTAL								

*Tomada de Barriga Gamarra (25)*

### 3.1.2. Concepción de la solución

En esta fase se da a conocer la parte creativa de desarrollo del diseño.

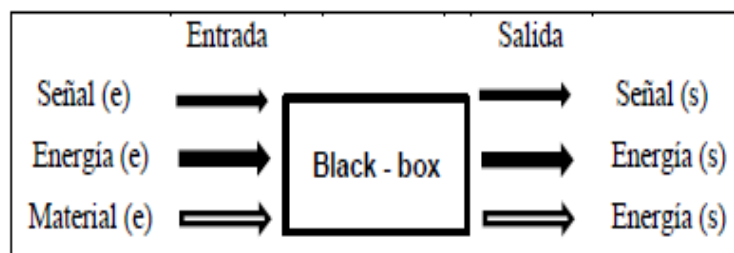
- Estructura de funciones

Aquí se trata de englobar todas las posibles soluciones de diseño como un proceso abstracto o de imaginación.

- Caja negra

En esta etapa la caja negra representa todas esas funciones de entrada y salida, mas no sus funciones internas, del cual se tomó en cuenta solo tres magnitudes, energía, materia y señales.

**Tabla 17. Caja negra**



*Tomada de Barriga Gamarra (25)*

- Determinar la secuencia operacional

Aquí se estructuran los procedimientos de trabajo, secuencia y los procesos técnicos.

- Fijar procesos técnicos

En esta etapa se utilizó el diagrama de flujo y sus posibles soluciones para la preparación, ejecución, control y verificación del diseño.

- Determinar la aplicación de los sistemas técnicos y sus limitaciones

En la ejecución de un sistema de un proceso este puede ser operado por el hombre a algún sistema técnico o automatizado, en lo cual podemos distinguir tres procesos manuales, mecánicos y automatizados.

➤ Agrupación de las funciones

En esta etapa se determina la agrupación aleatoria teniendo en cuenta las tareas funcionales, que se pueden subdividir o unir.

➤ Caja blanca

En esta etapa se determina y representa la estructura interna así como las entradas y salidas de sus funciones del sistema que guarda relación entre componentes.

➤ Elaborar concepto de solución

En esta etapa se pretende llegar a la síntesis basada en los procesos que guardan relación con la estructura y sus funciones de acuerdo con la lista de exigencias.

➤ Matriz morfológica

Esta etapa permite generar muchas ideas en tiempos cortos, cuya función consiste en dividir la función principal y generar otra función parcial y finalmente cuyas combinaciones generen posibles soluciones de diseño.

**Tabla 18. Matriz morfológica**

Funciones Parciales (o elementales)		Alternativas de efectos, de portadores, de principios de solución, de formas, de grupos funcionales, de bloques funcionales					
		1	2	3	4	.....	n
1		S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>		S <sub>1n</sub>
2		S <sub>21</sub>	S <sub>22</sub>	S <sub>23</sub>	S <sub>24</sub>		S <sub>2n</sub>
3		S <sub>31</sub>	S <sub>32</sub>	S <sub>33</sub>	S <sub>34</sub>		S <sub>3n</sub>
4		S <sub>41</sub>	S <sub>42</sub>	S <sub>43</sub>	S <sub>44</sub>		S <sub>4n</sub>
⋮							
n							

solución 2
solución 1
solución 3

*Tomada de Barriga Gamarra (25)*

➤ Análisis técnico de conceptos

En esta etapa la estructura de diseño busca la satisfacción entre los numerosos elementos combinados para conseguir la solución más factible.

➤ Análisis económicos

En esta etapa el análisis económico de los conceptos de solución involucra una serie de aspectos importantes para el diseño que lo hacen viable económicamente.

• Elaboración del proyecto

➤ Proyecto preliminar

En esta fase los conceptos de soluciones darán como resultado final un bosquejo del proyecto el cual tendrá relación con las exigencias recomendadas, como dimensiones, normas, durabilidad, cálculos.

➤ Determinación del proyecto óptimo

En esta etapa se pulirá el proyecto preliminar de tal manera que se haya cumplido con todos los requisitos de diseño final, el cual no bastará con los cálculos matemáticos sino que dicho diseño tendrá que cumplir restricciones para su buen funcionamiento.

a) Restricciones de diseño:

• Técnicas:

1. Seguridad, montaje, fabricación, funcionabilidad, pruebas, confiabilidad.
2. Impacto ambiental, mantenimiento, peso, dimensiones, resistencia de materiales.

• Económicas:

1. Costo de adquisición de materiales, costo de operación, costo de materiales e insumos.

• Condiciones ambientales:

1. Emisiones de gases, recirculación de gases, efecto de los gases.



- Condiciones de seguridad:

1. Protección contra incendios, protección contra golpes, choques.

- Condiciones de mercado:

1. Diseño

2. Patente

- Elaboración de detalle

En esta fase se reúne toda la documentación completa y final para la fabricación del proyecto.

- Fundamentos

El objetivo de esta fase es terminar de completar aquellos parámetros como cálculos de diseño, dimensiones del proyecto, lo cual se debe adjuntar al informe.

- Elaboración de formas

En esta fase se elaboraron los dibujos de diseños de las piezas mecánicas que finalmente van adjuntados a planos de acuerdo a sus dimensiones.

- Determinar el material

En esta etapa se define el proceso final de la selección del material a utilizar, teniendo en cuenta factores como su resistencia mecánica, química, acabado, tolerancias.

- Estado de montaje

En esta fase se determina el estado de montaje, si han variado las piezas después de someterlas a procesos mecanizados o cortes, o si no ha variado en nada, de ser así, tal vez sea necesario realizar otros planos y adjuntarlos.

- Representación de piezas

En esta etapa se hizo énfasis al cumplimiento del diseño a escala cumpliendo las reglas y normas del dibujo mecánico.

➤ Detalles de planos

En esta etapa se detallaron los planos conjunto y el despiece del diseño, de tal manera que a la hora de ensamblar las piezas mecánicas coincidan y no haya problemas de dimensiones.

➤ Evaluar, verificar y mejorar

En esta última fase se pulen los últimos detalles de diseño y algunas características como su tipo de material, ajustes y tolerancias, tamaño, forma; todo esto cumple tres puntos fundamentales, función, montaje y fabricación; a esto se le agregó el estudio técnico-económico, con la finalidad de poder adquirir los materiales en un mercado comercial.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN**

En este capítulo se identificaron los requerimientos para el diseño, se analizaron las posibles soluciones y como parte final correspondió mencionar el diseño terminado en base a todos los requerimientos mencionados.

#### **4.1. Identificación de requerimientos**

##### **4.1.1. Lista de exigencias**

El desarrollo de esta lista de exigencias corresponde para proponer, desarrollar y determinar el diseño óptimo que cumpla todas las exigencias y necesidades mencionadas de cada capítulo.

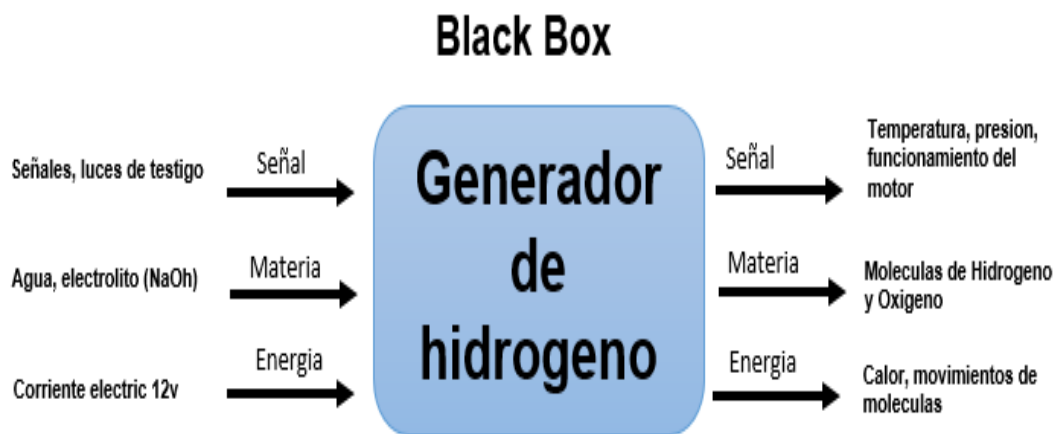
**Tabla 19. Lista de exigencias**

Lista de exigencias			p. 1-4	
Diseño de un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen 1.5 L en la ciudad de Huancayo			11/8/2019	
Área de diseño			Autor: Martin Baltazar	
Características	Deseo	Exigencia	Descripción	Responsable
Función		E	Producir los gases de hidrógeno	M. Baltazar
Función		E	El sistema debe ser capaz de integrar sus funciones con componentes y/o partes móviles.	M. Baltazar
Función		E	Eficiencia de producción global superior al 30%.	M. Baltazar
Geometría		E	El sistema debe contar con una estructura compacta, ligera y resistente.	M. Baltazar
Geometría		E	El sistema cuenta con estructuras como soporte para fijación interna dentro del motor.	M. Baltazar
Geometría		E	Ningún componente queda al exterior de la estructura principal.	M. Baltazar
Cinemática		E	El sistema debe trabajar en un espacio reducido.	M. Baltazar
Cinemática		E	Debe contar con un sistema de ductos para el desplazamiento del vapor de hidrógeno.	M. Baltazar
Cinemática		E	El sistema de almacenamiento de hidrógeno debe ser un recipiente ligero.	M. Baltazar
Cinemática		E	No deben producirse ruidos o vibraciones en el funcionamiento.	M. Baltazar
Fuerza		E	La estructura del sistema soporta fuerzas por presiones internas.	M. Baltazar
Fuerzas		E	El sistema debe tolerar deformaciones en sus componentes producto de las fuerzas internas.	M. Baltazar
Energía		E	El sistema debe operar en su totalidad 12 V.	M. Baltazar
Energía	D		El sistema debe garantizar una temperatura de 30 °C como máximo en las partes internas.	M. Baltazar
Energía	D		El sistema debe contar con aislamiento térmico en los componentes con interacciones termodinámicas.	M. Baltazar
Energía		E	La alimentación para la hidrólisis debe ser de 12 V.	M. Baltazar
Energía		E	La generación de calor debe ser mínima.	M. Baltazar
Materia		E	El agua utilizada debe ser agua destilada más un electrolito.	M. Baltazar
Materia	D		Debe garantizarse un flujo de aire fresco en el interior del motor.	M. Baltazar
Materia		E	Los electrodos utilizados no deben formar parte de la reacción química.	M. Baltazar
Materia		E	Los materiales utilizados deben soportar efectos de corrosión y oxidación.	M. Baltazar
Señales	D		Deben usarse señales analógicas.	M. Baltazar
Señales		E	El procesamiento de datos se realiza con analizador de gases.	M. Baltazar
Señales		E	Todo el sistema opera por aplicación de la hidrólisis.	M. Baltazar
Seguridad	D		El sistema debe estar protegido contra descargas eléctricas.	M. Baltazar
Seguridad		E	No deben existir elementos o partes punzocortantes expuestas en el diseño.	M. Baltazar
Ergonomía	D		El acceso hacia el generador debe ser sencillo e intuitivo.	M. Baltazar

Fabricación		E	Los componentes deben garantizar ser producidos en la industria nacional o encontrarse disponibles en el mercado.	M. Baltazar
Montaje		E	El sistema debe garantizar su ensamble con herramientas conocidas.	M. Baltazar
Transporte	D		Debe ser liviano y de fácil manejo para su manipulación.	M. Baltazar
Uso		E	El sistema es completamente silencioso.	M. Baltazar
Uso		E	El sistema empieza a operar automáticamente al pulsar los contactos.	M. Baltazar
Uso		E	El sistema debe poder ser utilizado por personas con conocimientos específicos de mecánica, electricidad, física, química.	M. Baltazar
Mantenimiento		E	Las partes deben requerir el mínimo de mantenimiento.	M. Baltazar
Mantenimiento		E	No se deben utilizar lubricantes.	M. Baltazar
Mantenimiento		E	El sistema no debe requerir labores de limpieza o revisión constantes.	M. Baltazar
Mantenimiento		E	El sistema es completamente autónomo.	M. Baltazar
Costos	D		El costo de fabricación general debe ser menor del de sistemas convencionales de la misma capacidad.	M. Baltazar
Plazos	D		El desarrollo del sistema no debe superar los dos meses para la etapa de diseño y los dos meses para la etapa de prueba.	M. Baltazar

#### 4.1.2. Estructura de funciones

Se desarrollará la caja negra “*Black Box*”, indicando sus entradas específicas y para obtener salidas esperadas.



**Figura 28. Caja negra**

En la caja negra se ven las entradas que son señales, luces de testigo, agua, hidróxido de sodio (electrolito) y corriente eléctrica de 12 V.

Como salidas se ven que se genera temperatura, presión, funcionamiento, moléculas de hidrógeno y oxígeno, calor y movimiento de moléculas en el reactor.

#### **4.1.3. Secuencia de funciones**

Una vez armado el generador de hidrógeno, se realizó el cableado de los polos positivo y negativo hacia el reactor, se llenó de agua con alguna solución al 20%, y se colocaron los tubos en los lugares correspondientes.

Se instaló un soporte fijo al lado derecho del motor para el generador, asegurando los tornillos de fijación al chasis.

Luego de haber realizado todas estas funciones, se enciende el motor y se dejó que funcione sin hidrógeno unos 5 min.

En cambio el generador está funcionando, generando el hidrógeno, pero está limitado con un válvula de apertura de tal manera que después de los 5 min se abrirá la válvula y el gas entrará en el carburador.

Posteriormente se coloca en el tubo de escape el analizador de gases, con la finalidad de comprobar los cálculos y el rendimiento del generador.

#### **4.1.4. Fijación de los procesos técnicos**

Esta etapa se muestra mediante un diagrama de flujo, para explicar mejor el funcionamiento del generador de hidrógeno. Tomando en cuenta las entradas y salidas del proceso.

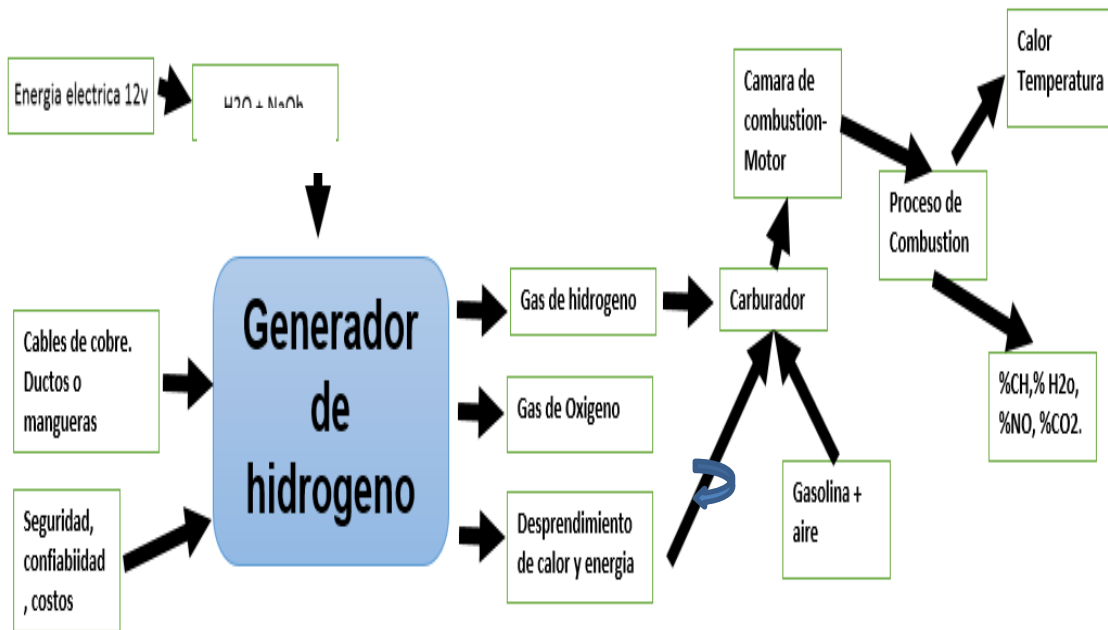


Figura 29. Procesos técnicos

#### 4.1.5. Representación de la estructura de función-caja blanca

En esta etapa se explica lo que pasa en el interior de la caja negra, ahora llamada caja blanca.

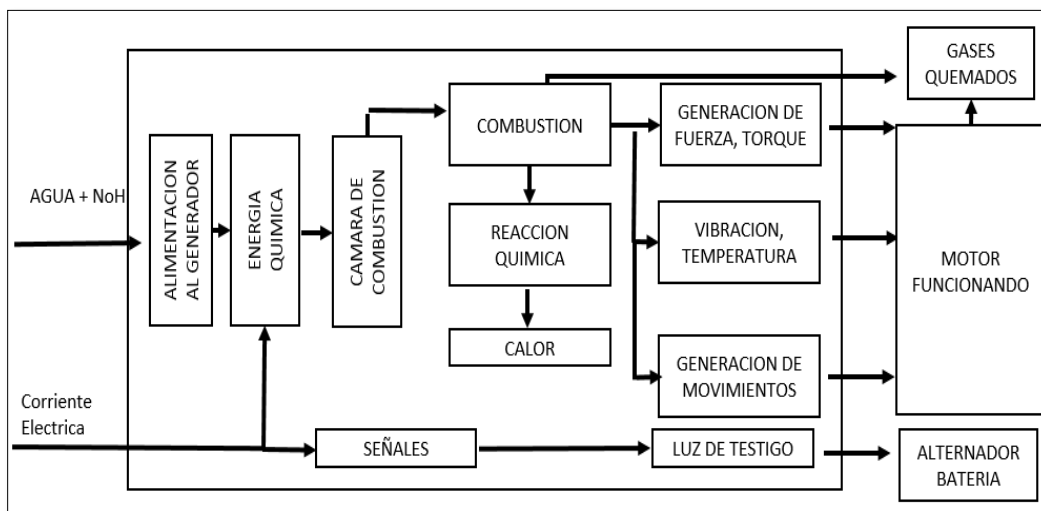






















Figura 30. Estructura de funciones

## 4.2. Análisis de la solución

### 4.2.1. Matriz morfológica

Tabla 20. Matriz morfológica

Funciones parciales	Alternativas de solución		
	1	2	3
Batería 12 V	9 placas 	13 placas	11 placas 
Forma del generador	Redondo 	Cuadrado 	Hexagonal 
Conductos de entradas y salidas	3 conductos	2 conductos	1 conducto
Tipo de electrodos	Acero inox.	Grafito	Cobre
Tanque líquido	Metal 	Plástico 	Vidrio 
Recipiente contenedor de vapores de H	Vidrio	Plástico	Metal
Tipo de ductos	Manguera de alta presión	Manguera de baja presión	Manguera de media presión de agua
Relay	Mecánicos 	Electromecánicos 	Relé de estado sólido 
Chapa de contacto	Contacto	Accionado por llave	Golpe
Conductores eléctricos	Cables sólidos 	Cables de hilos 	Cables reforzados 
Junta	Caucho	Aluminio	Acero estructural
Soporte del cuerpo	Empernados	Por soldadura	Precintos
Pernos y tuercas	Acero 	Fierro negro 	Cromados 
Válvula antirretorno	Con filtros 	Sin filtros 	Válvula check 
<b>Concepto</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>

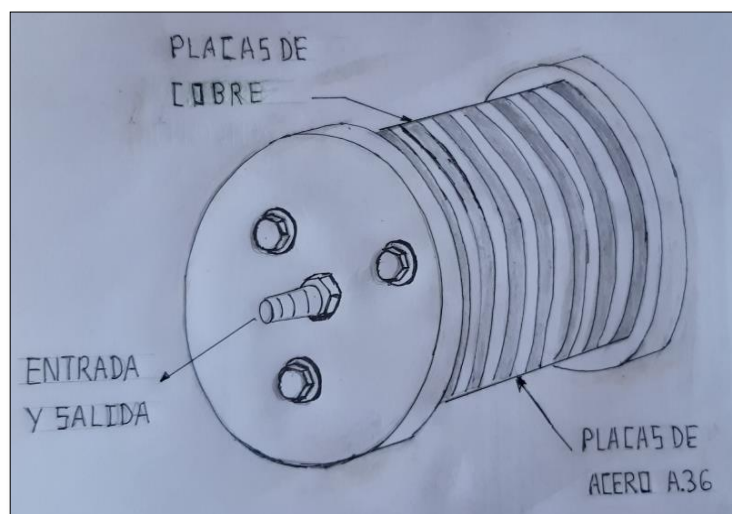


#### 4.2.2. Determinación del proyecto preliminar

Mediante la matriz morfológica se llegó a 3 posibles soluciones de diseño del generador de hidrógeno, que se llega a representar en bosquejos para tener una idea preliminar de un posible diseño final que cumpla con las exigencias.

- Solución 1

En este posible diseño se consideraron los siguientes elementos que harían que el proyecto sea viable, será alimentado con una batería de 12 V de 9 placas, este generador tendrá una forma redonda con juntas de acero estructural A36, con un solo ducto de ingreso y salida, con electrodos de cobre para transmitir la corriente eléctrica, el depósito del líquido será de metal conectados al generador con mangueras de media presión para agua que tendrá un filtro, el sistema empezará a funcionar con la chapa de contacto tipo golpe, para la protección del sistema eléctrico funcionará con un relé tipo sólido, todo este diseño estará ensamblado con pernos de fierro negro, con cables reforzados que salen de la batería y sujetado al chasis con precintos.



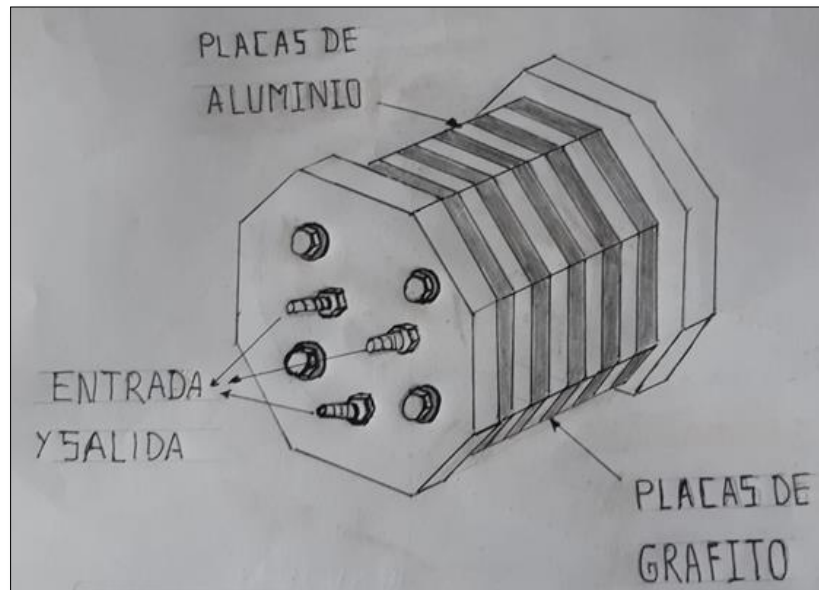
**Figura 31. Solución 1**

- Solución 2

En esta segunda alternativa de solución se consideraron las siguientes funciones principales de diseño, el generador será alimentado con una batería de 12 V y 13 placas, tendrá forma hexagonal, con 3 ductos para las salidas e ingreso, los electrodos serán de grafito, este generador estará alimentado con un tanque de vidrio con mangueras de alta presión.

El recipiente o reservorio de hidrógeno será de vidrio, todo el sistema eléctrico estará protegido con un relé electromecánico con una chapa de contacto de golpe, este generador de hidrógeno tendrá unas juntas de aluminio y unas salidas de alimentación eléctrica de cables sólidos.

Todo el diseño del generador estará ensamblado con pernos cromados, y este estará soldado al chasis del carro.



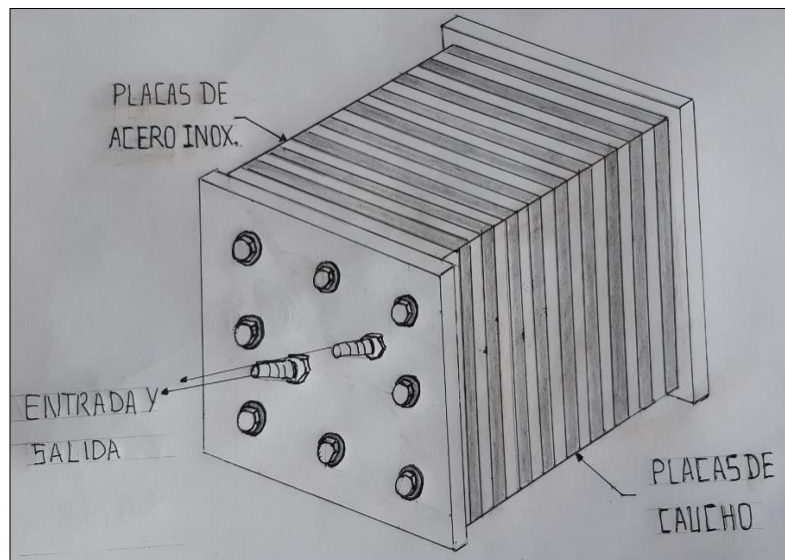
**Figura 32. Solución 2**

- Solución 3

Como tercera solución el generador de hidrógeno será de forma cuadrada, con juntas de caucho alimentado con una batería de 12 V de 11 placas, tendrá dos ductos que serán mangueras de baja presión, el recipiente del líquido será de plástico así como el recipiente de hidrógeno, funcionará con unos electrodos de acero inoxidable, ensamblados con pernos de acero.

El sistema eléctrico estará protegido con un relé mecánico, la alimentación de corriente hacia el generador será de cables de hilo, el funcionamiento del generador será accionado solo con la llave y un interruptor o *switch*, el cual estará limitado con un válvula *check* para que pueda permitir la entrada de hidrógeno al carburador.

Finalmente el generador estará sujeto al chasis con un soporte de fierro empernado.



**Figura 33. Solución 3**

#### **4.2.3. Evaluación técnico-económica**

Se presentarán las evaluaciones de los tres proyectos preliminares analizando la parte técnica y económica en tablas, del cual se mencionará el método de calificación.

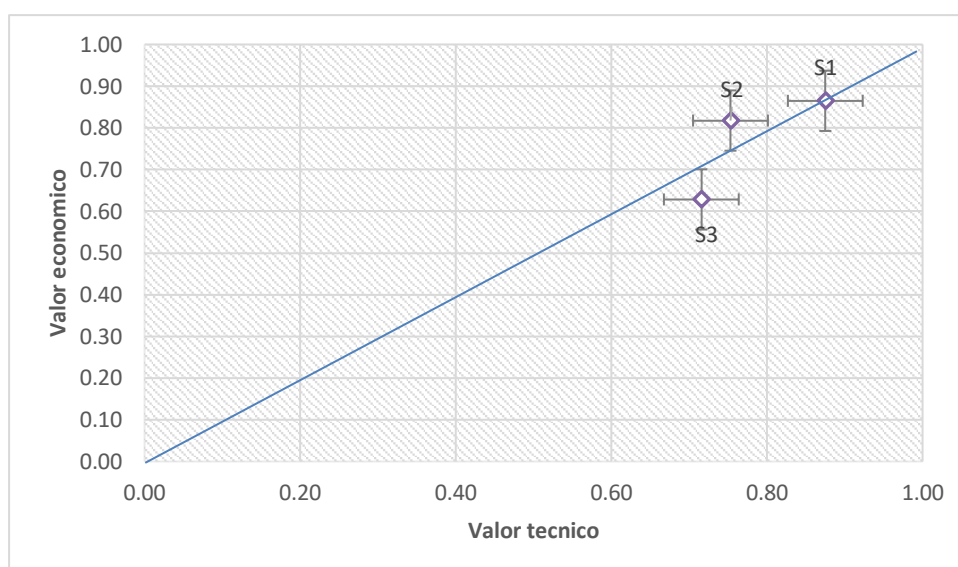
- P: el puntaje se considera de 0-4 (VDI2225)
- 0 = No satisface, 1 = Casi Satisfactorio, 2= Suficiente, 3= Bien, 4= Muy bien
- G: el peso ponderado se toma de acuerdo con sus criterios de evaluación.

Tabla 21. Evaluación técnica de los proyectos preliminares

DISEÑO MECANICO-EVALUACION VALOR TECNICO (xi)										Area de Diseño		
Proyecto: Generador de Hidrogeno												
Criterios de evaluacion para diseños en fase de Proyectos												
Variantes de Proyecto			Solucion 1			Solucion 2			Solucion 3		Solucion Ideal	
N°	Criterios de Evaluacion	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp		
1	Funcion	9	4	36	4	36	4	36	4	36		
2	Forma	6	2	12	3	18	3	18	4	24		
3	Diseño	8	3	24	3	24	4	32	4	32		
4	Fabricacion	7	2	14	3	21	3	21	4	28		
5	Montaje	7	2	14	3	21	3	21	4	28		
6	Eficiencia	8	3	24	3	24	3	24	4	32		
7	Mantenimiento	8	3	24	3	24	3	24	4	32		
8	Transporte	4	3	12	3	12	3	12	4	16		
9	Ruido	7	3	21	3	21	4	28	4	28		
10	Uso	8	3	24	4	32	4	32	4	32		
11	Seguridad	8	3	24	3	24	4	32	4	32		
Puntaje Max. $\sum p$ , $\sum gp$				31	229	35	257	38	280		320	
Valor Tecnico xi					0.72		0.80		0.88		1.00	
Orden					<b>3</b>		<b>2</b>		<b>1</b>			

**Tabla 22. Evaluación económica de los proyectos preliminares**

DISEÑO MECANICO-EVALUACION VALOR ECONOMICO (xi)										Area de Diseño	
Proyecto: Generador de Hidrogeno											
Criterios de evaluacion para diseños en fase de Proyectos											
Variantes de Proyecto			Solucion			Solucion			Solucion		
N°	Criterios de Evaluacion	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	
1	Costo mano de obra	9	4	36	4	36	4	36	4	36	
2	Costo de materiales	6	1	6	2	12	3	18	4	24	
3	Costo de ensamblado	8	2	16	3	24	4	32	4	32	
4	Costo de fabricacion	7	2	14	3	21	3	21	4	28	
5	Costo de montaje	7	3	21	4	28	3	21	4	28	
Puntaje Max. $\sum p, \sum gp$			12	93	16	121	17	128		148	
Valor Tecnico xi				0.63		0.82		0.86		1.00	
Orden				<b>3</b>		<b>2</b>		<b>1</b>			



**Figura 34. Diagrama técnico-económico**

Finalmente, del diagrama técnico-económico, Figura 34, se puede determinar que la solución factible y viable para el diseño y construcción del generador de hidrógeno es la Solución 3, por lo que se empezará a desarrollar el trabajo con esta solución óptima.

### 4.3. Diseño

En esta etapa se hallaron los valores, dimensiones, cálculos y parámetros de los materiales que conforman el diseño final del generador de hidrógeno.

#### 4.3.1 Cálculos del ciclo de trabajo del motor Volkswagen 1.5 L

En base a las dimensiones geométricas del motor a estudiar, se determinan los parámetros principales de funcionamiento, potencia, diseño por ciclo, en función a los componentes del motor, cigüeñal, pistón, etc.

Para este capítulo se aplican métodos de simulación matemática, que fueron realizados con anterioridad por expertos profesionales en base a muchas pruebas y experiencia y que están citados en este trabajo, de tal manera que el cálculo sea lo suficientemente preciso.

- Parámetros geométricos

- $A_p = 54.1 \text{ cm}^2$
- $V_h = 373.3 \text{ cm}^3$
- $tV_h = 1493.3 \text{ cm}^3$
- $S = 6.9 \text{ cm}$
- $D = 8.3 \text{ cm}$

- Masa del aire para 1 kg de combustible

- Masa teórica del aire, reemplazando en la fórmula (2.17)

$$\frac{1}{0.23} * \left( \frac{8}{3} * 0.855 + 8 * 0.145 \right)$$

**14.96kg**

- Masa teórica del aire en kmol, reemplazando en la fórmula (2.18)

$$L_0 = \frac{1}{0.21} * \left( \frac{0.885}{21} + \frac{0.145}{4} \right)$$

**$L_0 = 0.516 \text{ kmol}$**

- Masa real de aire, reemplazando en la fórmula (2.19)

$$l = \alpha * l_0 \dots (\alpha = 0.9)$$

$$l = 0.9 * 14.96$$

$$13.46\text{kg}$$

$$L = 0.9 * 0.516$$

$$L = 0.464\text{kmol}$$

- Cantidad de mezcla carburante, reemplazando en la fórmula (2.20)

$$M_1 = \frac{1}{144} + 0.464$$

$$M_1 = 0.4732$$

- Cantidad de mezcla carburante, reemplazando en la fórmula (2.22)

$$M_{CO} = 0.42 * \left( \frac{1 - 0.9}{1 + 0.5} \right)$$

$$M_{CO} = 0.0129\text{kmol}$$

$$M_{CO_2} = \frac{0.885}{12} - M_{CO}$$

$$M_{CO_2} = 0.0608\text{kmol}$$

$$M_{H_2} = kM_{CO}$$

$$M_{H_2} = 0.0065\text{kmol}$$

$$M_{H_2O} = \frac{0.145}{2} - M_{H_2}$$

$$M_{H_2O} = 0.066 \text{ kmol}$$

$$M_{N_2} = 0.79 * 0.9 * 0.464$$

$$M_{N_2} = 0.329 \text{ kmol}$$

$$M_2 = 0.0129 + 0.0608 + 0.0065 + 0.066 + 0.329$$

$$M_2 = 0.4752$$

➤ Incremento de volumen, reemplazando en la fórmula (2.23)

$$\Delta M = 0.4752 - 0.464$$

$$\Delta M = 0.002 \text{ kmol}$$

➤ Coeficiente teórico, reemplazando en la fórmula (2.24)

$$\mu_0 = \frac{0.4752}{0.4732}$$

$$\mu_0 = 1.01$$

- Parámetros del proceso de admisión

Tomando como referencia los valores estimados para la  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ , velocidad de carga en la admisión ( $w_{ad} = 90 \text{ m/s}$ ), la constante de amortiguación ( $\beta^2 + \xi = 3$ ), puesto que es un motor por alimentación natural y la succión del aire lo realiza desde la atmósfera, donde la  $P_0 = 0.1013 \text{ Mpa}$ ,  $T_0 = 288^\circ\text{K}$ , la temperatura de los gases es  $T_r = 1050^\circ\text{K}$ , y la presión de los gases es  $P_r = 0.12 \text{ MPa}$ . En base a estos datos se hallan los parámetros. (22)



- Densidad de carga en la admisión, reemplazando en la fórmula (2.25.1)

$$\rho_0 = \frac{0.1013MPa}{286 \frac{J}{KgK} 288.15K}$$

$$\rho_0 = 1.23 \frac{kg}{m^3}$$

- Presión al final de la admisión, reemplazando en la fórmula (2.25)

$$P_a = 0.1013 - 3 * \frac{90}{2} 1.23 * 10^{-6}$$

$$P_a = 0.086MPa$$

- Coeficiente de los gases residuales, reemplazando en la fórmula (2.26)

$$\gamma_r = \frac{0.12}{0.086 * 8.3 - 0.12} * \frac{288 + 15}{1050}$$

$$\gamma_r = 0.058$$

- Temperatura al final de la admisión, reemplazando en la fórmula (2.27)

$$T_a = \frac{288 + 15 + 0.058 * 1050}{1 + 0.058}$$

$$T_a = 343.95K$$

- Rendimiento volumétrico, reemplazando en la fórmula (2.28)

$$n_v = \frac{8.3}{8.3 - 1} * \frac{0.086}{0.1013} * \frac{288}{343.95(1 - 0.058)}$$

$$n_v = 0.858$$

- Parámetros del proceso de compresión
- Presión al final de la compresión, reemplazando en la fórmula (2.29)

$$P_c = 0.086 * 8.3^{1.34}$$

$$P_c = 1.47MPa$$

- Temperatura al final de la compresión, reemplazando en la fórmula (2.30)

$$T_c = 343.95 * 8.3^{1.34-1}$$

$$T_c = 706.29K$$

- Parámetro al final del proceso de combustión
- Coeficiente real de variación molecular, reemplazando en la fórmula (2.31)

$$\mu_t = \frac{1.01 + 0.058}{1 + 0.058}$$

$$\mu_t = 1.009$$

- Calor no desprendido por efecto de la combustión, reemplazando en la fórmula (2.32)

$$\Delta H_u = 114 * 10^6(1 - 0.9)0.516$$

$$\Delta H_u = 7.430MJ/kmol$$

- Ecuación de la energía de la combustión, reemplazando en la fórmula

$$\mu_t U''_z = \frac{0.85[44000 - 7430]}{0.4732(1 + 0.058)} + \frac{8591 + [0.058 * 9910]}{(1 + 0.058)}$$

$$\mu_t U''_z = 70752.1$$

$$U''_z = \frac{70752.1}{1.009}$$

$$U''_z = 70121$$

Ahora, se utiliza el Anexo 8, para calcular la  $T_z$ , interpolando valores en esa tabla.

$$y = y_1 + \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1}\right)(y_2 - y_1)$$

$$70121 = 67212 + \left(\frac{x - 2400}{2400 - 2300}\right)(70543 - 67212)$$

$$x = 2487^\circ\text{C} = 2760.8^\circ\text{K}$$

➤ Presión al final de la combustión, reemplazando en la fórmula (2.34)

$$P_z = 1.009 * 1.29 * \frac{2760.8}{706.29}$$

$$P_z = 5.09\text{MPa}$$

➤ Multiplicando por su factor de corrección, de acuerdo con la fórmula (2.34.1)

$$P_z = 0.85 * 5.09$$

$$P_z = 4.33\text{MPa}$$

➤ Grado de elevación de la presión, reemplazando en la fórmula (2.37.1)

$$\lambda = \frac{5.16}{1.29}$$

$$\lambda = 4$$

- Parámetros del proceso de la expansión
- Presión al final de la expansión, reemplazando en la fórmula (2.35)

$$P_b = \frac{4.33}{8.3^{1.24}}$$

$$P_b = 0.31MPa$$

- Temperatura al final de la expansión, reemplazando en la fórmula (2.36)

$$T_b = \frac{2760.8}{8.3^{0.24}}$$

$$T_b = 1661.63K$$

- Presión media indicada, reemplazando en la fórmula (2.37)

$$p_{mi} = 0.086 * \frac{8.3^{1.34}}{8.3 - 1} \left[ \frac{4}{1.24 - 1} \left( 1 - \frac{1}{8.3^{0.24}} \right) - \frac{1}{1.34 - 1} \left( 1 - \frac{1}{8.3^{0.34}} \right) \right]$$

$$p_{mi} = 1.03MPa$$

- Presión media por pérdidas mecánicas, reemplazando en la fórmula (2.38)

$$p_{mpm} = 0.04 + 0.0135 * 9.2$$

$$p_{mpm} = 0.1642Mpa$$

- Presión media por pérdidas mecánicas, reemplazando en la fórmula (2.39)

$$p_{me} = 1.03 - 0.1642$$

$$p_{me} = 0.865MPa$$

- Consumo específico indicado, reemplazando en la fórmula (2.41)

$$g_i = 3600 \frac{0.745 * 1.23}{1.03 * 0.9 * 14.96}$$

$$g_i = 237.88 \frac{g}{Kwh}$$

- Consumo específico, reemplazando en la fórmula (2.42)

$$g_e = \frac{237.88}{0.83}$$

$$g_e = 286.6 \frac{g}{kWh}$$

- Consumo horario del combustible

$$G_e = 286.6 * 38.04 * 10^{-3}$$

$$G_e = 10.9 kg/h$$

- Rendimientos

- Rendimiento indicado, reemplazando en la fórmula (2.43)

$$n_i = \frac{3600}{237.88 * 44}$$

$$n_i = 0.344$$

- Rendimiento mecánico, reemplazando en la fórmula (2.40)

$$n_m = \frac{0.865}{1.03}$$

$$n_m = 0.84$$

- Rendimiento efectivo, reemplazando en la fórmula (2.44)

$$n_e = 0.344 * 0.84$$

$$n_e = 0.289$$

- Potencias

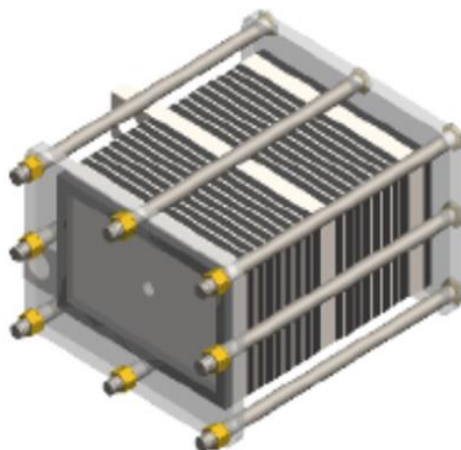
- Potencia efectiva, reemplazando en la fórmula (2.46)

$$N_e = \frac{1.5 * 0.865 * 4000}{0.507 * 4}$$

$$N_e = 42.6kW$$

#### 4.3.2. Cuerpo del generador

A pesar de que las presiones sean despreciables o muy bajas se hallan algunos esfuerzos internos que estarán sometidos el generador, ya que es muy importante determinar estos valores para tener como referencia y presente la idea del sistema, a pesar de que las presiones sean despreciables o muy bajas.



*Figura 35. Generador de hidrógeno*

- Cálculos del cuerpo del generador

Como datos, se tiene, del Anexo 13:

1. Espesor de la placa o electrodo del acero inoxidable 0.15 mm

2. Capacidad del cuerpo 140 mL (0.00014 m<sup>3</sup>)
3. Solución de agua (1-0.2%)
4. Presión de trabajo 63 psi
5. Densidad de la solución 2100  $\frac{kg}{m^3}$

➤ Hallando el empuje o fuerza de empuje (principio de Arquímedes)

$$E = \rho_f * g * V$$

**Donde:**

$\rho$  : densidad de la solución (kg/m<sup>3</sup>)

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

g: gravedad (m/s<sup>2</sup>)

Reemplazando valores:

$$E = 2100 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2} * 0.00014 m^3$$

$$F = E = 2.8N$$

➤ Hallando la presión interna

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{2.8N}{0.476m^2}$$

$$P = 5.9 Pa$$

$$P = 0.000855 psi$$

Por lo que se determinó la presión que existe en el interior del generador.

➤ Cálculo de los pernos

El diseño del generador estará sometido a fuerzas externas, es decir por el ajuste o precarga de los 8 pernos, sin embargo estos pernos deben soportar la presión que exista en el interior del generador.

Para este diseño se utilizan pernos SAE de grado 1 según la Tabla 27 ya que la presión interna en el generador es muy baja, como datos se tiene:

1. Se utilizan 8 pernos (D 1/4 in x L 3 5/8 - Grado 1)

2. 8 arandelas planas

- Hallando el área del diámetro mayor del perno (5/16 in)

$$A_d = \pi * r^2$$

$$A_d = 0.049 \text{ in}^2$$

- Rigidez efectiva del perno, reemplazando en la fórmula (2.58)

$$K_b = \frac{0.049 \text{ in}^2 * 30 \text{ Mpsi}}{3.625 \text{ in}}$$

$$K_b = 0.41 \frac{\text{Mlb}}{\text{in}} \text{ (Por cada perno)}$$

- Área de esfuerzo de tensión, de la Tabla 23 con diámetro 3.625 in

$$A_t = 0.0318 \text{ in}^2$$

- Área del caucho

De la Figura 38 y del Anexo 13, se toman las medidas y se halla el área.

**Datos:**

La junta por presionar que es de material de caucho tiene forma de rectángulo cuya área que está sometida a presión es:

$$\text{Área de caucho } (A_m) = 7.32 \text{ in}^2$$



**Tabla 23. Áreas de esfuerzo de tensión de pernos**

Designación de tamaño	Diámetro mayor nominal pulg	Serie gruesa-UNC			Serie fina-UNF		
		Roscas por pulgada, N	Área de esfuerzo de tensión $A_t$ , pulg <sup>2</sup>	Área del diámetro menor $A_s$ , pulg <sup>2</sup>	Roscas por pulgada, N	Área de esfuerzo de tensión $A_t$ , pulg <sup>2</sup>	Área del diámetro menor $A_s$ , pulg <sup>2</sup>
0	0.0600				80	0.001 80	0.001 51
1	0.0730	64	0.002 63	0.002 18	72	0.002 78	0.002 37
2	0.0860	56	0.003 70	0.003 10	64	0.003 94	0.003 39
3	0.0990	48	0.004 87	0.004 06	56	0.005 23	0.004 51
4	0.1120	40	0.006 04	0.004 96	48	0.006 61	0.005 66
5	0.1250	40	0.007 96	0.006 72	44	0.008 80	0.007 16
6	0.1380	32	0.009 09	0.007 45	40	0.010 15	0.008 74
8	0.1640	32	0.014 0	0.011 96	36	0.014 74	0.012 85
10	0.1900	24	0.017 5	0.014 50	32	0.020 0	0.017 5
12	0.2160	24	0.024 2	0.020 6	28	0.025 8	0.022 6
$\frac{1}{4}$	0.2500	20	0.031 8	0.026 9	28	0.036 4	0.032 6
$\frac{5}{16}$	0.3125	18	0.052 4	0.045 4	24	0.058 0	0.052 4

*Tomada de Diámetros y área de roscas unificadas. (24) (p. 399)*

- Cálculo del espesor de la arandela para el perno de diámetro  $\frac{1}{4}$  in, según la Tabla 23, N angosto, W ancho.

$$t = 0.065 \text{ in (N)}$$

Tabla 24. *Espesor de arandela según diámetro de perno*

Tamaño del sujetador	Tamaño de la arandela	Diámetro		Espesor
		DI	DE	
#6	0.138	0.156	0.375	0.049
#8	0.164	0.188	0.438	0.049
#10	0.190	0.219	0.500	0.049
#12	0.216	0.250	0.562	0.065
$\frac{1}{4}$ N	0.250	0.281	0.625	0.065
$\frac{1}{4}$ W	0.250	0.312	0.734	0.065
$\frac{5}{16}$ N	0.312	0.344	0.688	0.065
$\frac{5}{16}$ W	0.312	0.375	0.875	0.083
$\frac{3}{8}$ N	0.375	0.406	0.812	0.065
$\frac{3}{8}$ W	0.375	0.438	1.000	0.083
$\frac{7}{16}$ N	0.438	0.469	0.922	0.065
$\frac{7}{16}$ W	0.438	0.500	1.250	0.083
$\frac{1}{2}$ N	0.500	0.531	1.062	0.095
$\frac{1}{2}$ W	0.500	0.562	1.375	0.109
$\frac{9}{16}$ N	0.562	0.594	1.156	0.095
$\frac{9}{16}$ W	0.562	0.625	1.469	0.109
$\frac{5}{8}$ N	0.625	0.656	1.312	0.095
$\frac{5}{8}$ W	0.625	0.688	1.750	0.134
$\frac{3}{4}$ N	0.750	0.812	1.469	0.134
$\frac{3}{4}$ W	0.750	0.812	2.000	0.148
$\frac{7}{8}$ N	0.875	0.938	1.750	0.134
$\frac{7}{8}$ W	0.875	0.938	2.250	0.165

*Tomada de Dimensiones básicas de arandelas (24) (p. 1036)*

- Cálculo de la altura de la tuerca según la Tabla 25

$$H = \frac{7}{32} \text{ in}$$

Tabla 25. Dimensiones de tuercas

Tamaño nominal, pulg	Altura H			
	Ancho W	Hexagonal regular	Gruesa o ranurada	Contra-tuerca
$\frac{1}{4}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{7}{32}$	$\frac{9}{32}$	$\frac{5}{32}$
$\frac{5}{16}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{17}{64}$	$\frac{21}{64}$	$\frac{3}{16}$
$\frac{3}{8}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{21}{64}$	$\frac{13}{32}$	$\frac{7}{32}$
$\frac{7}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{29}{64}$	$\frac{1}{4}$
$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{5}{16}$
$\frac{9}{16}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{31}{64}$	$\frac{39}{64}$	$\frac{5}{16}$
$\frac{5}{8}$	$\frac{15}{16}$	$\frac{35}{64}$	$\frac{23}{32}$	$\frac{3}{8}$
$\frac{3}{4}$	$1\frac{1}{8}$	$\frac{41}{64}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{27}{64}$
$\frac{7}{8}$	$1\frac{5}{16}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{29}{32}$	$\frac{31}{64}$
1	$1\frac{1}{2}$	$\frac{55}{64}$	1	$\frac{35}{64}$
$1\frac{1}{8}$	$1\frac{11}{16}$	$\frac{31}{32}$	$1\frac{5}{32}$	$\frac{39}{64}$

Tomada de Dimensión de tuercas (24) (p. 1035)

- Cálculo de la longitud total, considerando la arandela, y las dos tapas de baquelita.

$$L = l + t$$

$$L = 3.187 + 0.065$$

$$L = 3.252 \text{ pulg}$$

**Tabla 26. Módulo de elasticidad E**

Material usado	Relación de Poisson	Módulo de elasticidad,		A	B
		GPa	Mpsi		
Acero	0.291	207	30.0	0.787 15	0.628 73
Aluminio	0.334	71	10.3	0.796 70	0.638 16
Cobre	0.326	119	17.3	0.795 68	0.635 53
Hierro fundido gris	0.211	100	14.5	0.778 71	0.616 16
Expresión general				0.789 52	0.629 14

**Tomada de Parámetros de rigidez de varios materiales (24) (p. 146)**

- Cálculo de la rigidez de los elementos comprimidos  $k_m$  reemplazando en la fórmula (2.60)

Datos de los materiales que constituyen el generador.

- Acero inoxidable (no se va a considerar, ya que el apriete del generador está en base al caucho y baquelita).
- Baquelita (no se va a considerar ya que es la superficie rígida que soporta el apriete de los pernos para comprimir las juntas de caucho).
- Caucho

Módulo de elasticidad  $E$

- ✓ Acero inoxidable 27195 ksi
- ✓ Baquelita 1015 ksi
- ✓ Caucho 0.29 ksi

- Rigidez del caucho  $k_{m1}$

$$k_{m1} = \frac{5.51 \text{ pul}^2 * 0.29 * 1000 \text{ psi}}{3.187 \text{ in}}$$

$$k_{m1} = 501 \text{ psi}$$

- Hallando la precarga de la fórmula 2.59, de la Tabla 27.

Según Russel, Burdsall recomienda que las precargas que llegan hasta 85 kpsi y un diámetro de 1", trabajar con 75% de su carga de prueba en el caso de que el perno trabaje temporalmente, pero si el perno sujetador trabaja permanentemente, se debe trabajar con el 90% de su carga de prueba. (24) (p. 426)

$$F_i = 0.75 * 0.0318 \text{ in}^2 * 33 \text{ kpsi}$$

$$F_i = 0.787 \text{ Kip}$$

- Esfuerzo de la precarga, de la fórmula (2.59.1)

$$\sigma_i = \frac{0.787 \text{ kip}}{0.0318 \text{ in}^2}$$

$$\sigma_i = 24 \text{ kpsi}$$

- Hallando la presión por cada perno, siendo la presión de trabajo 45 psi

$$P = 7.32 \text{ pul}^2 * \frac{63 \text{ psi}}{8 \text{ pernos}}$$

$$P = \frac{57.6 \text{ lib}}{\text{por perno}}$$

- Cálculo de la constante de rigidez C, de la fórmula (2.62)

$$C = \frac{0.41 \frac{\text{Mlb}}{\text{pulg}}}{0.41 \frac{\text{Mlb}}{\text{in}} + 0.000501 \frac{\text{Mlb}}{\text{in}}}$$

$$C = 0.998$$

- Esfuerzo del perno, de la fórmula (2.62)

$$\sigma_a = \frac{0.998 * \frac{43.4 \text{ libra}}{\text{por perno}}}{2 * 0.0318 \text{ in}^2}$$

$$\sigma_a = 681.03$$





- Ecuación de Goodman, de la fórmula (2.63)

De la Tabla 27 se obtienen los valores de los esfuerzos para el diámetro del perno 1/4, resistencia de fatiga para el perno de grado 1<sup>30</sup>.

$$S_a = \frac{14 \text{ kpsi} (60 \text{ kpsi} - 681.03 \text{ psi})}{60 \text{ kpsi} + 14 \text{ kpsi}}$$

$$S_a = 11.22 \text{ Kpsi}$$

Tabla 27. Resistencia de prueba mínima para pernos SAE

Grado SAE núm.	Intervalo de tamaños, de inclusive, pulg	Resistencia de prueba mínima,* kpsi	Resistencia mínima a la tensión,* kpsi	Resistencia mínima a la fluencia,* kpsi	Material	Marca en la cabeza
1	1/4 - 1 1/2	33	60	36	Acero de bajo o medio carbono	
2	1/4 - 3/4	55	74	57	Acero de bajo o medio carbono	
	7/8 - 1 1/2	33	60	36		
4	1/4 - 1 1/2	65	115	100	Acero de medio carbono, estirado en frío	
5	1/4 - 1	85	120	92	Acero de medio carbono, T y R	
	1 1/8 - 1 1/2	74	105	81		

Tomada de Especificaciones pernos SAE (24) (p. 418)

<sup>30</sup> Resistencia a la fatiga, "Ingmecánica". Disponible en: [https://ingmecanica.com/tutoriales/materiales.html]

- Factor de seguridad que protege contra la fatiga, según la fórmula (2.64.1)

$$n_f = \frac{11.22\text{ksi}}{681.03\text{psi}}$$

$$n_f = 16$$

- Ecuación de Gerber, de la fórmula (2.64)

$$S_a = \frac{1}{2 * 14} [60\sqrt{60^2 + 4 * 14(14 + 24)} - 60^2 - 2 * 14 * 24]$$

$$S_a = 9.61\text{ksi}$$

- Factor de seguridad que protege contra la fatiga, según la fórmula (2.64.1)

$$n_f = \frac{9.61\text{ksi}}{681.03\text{psi}}$$

$$n_f = 14$$

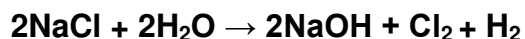
- Producción de hidrógeno

Para hallar la cantidad de hidrógeno que produce el generador, se usan dos tipos de electrolitos, NaOH y NaCl, que se combinan con agua destilada, a 12 V, a condiciones normales de temperatura y presión, con una relación de mezcla de 20% de la cantidad de agua.

Para poder determinar con qué tipo de electrolito se trabajará, se realizan reacciones químicas, entendiéndose por qué no se trabaja con cierto compuesto químico.

Lo que se quiere es no obtener otras sustancias en la mezcla, ya que el principal estudio es la obtención de hidrógeno.

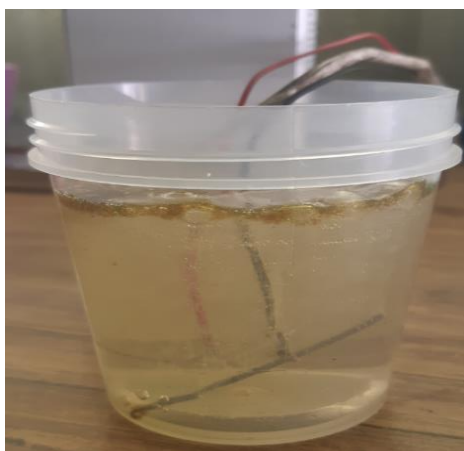
- Reacción del agua y la sal (**NaCl + H<sub>2</sub>O**)



En esta solución acuosa se obtienen dos elementos químicos el cloro y el hidrógeno, a esta solución se le introducen dos electrodos de acero inoxidable, más una corriente continua de 5 V, como prueba.

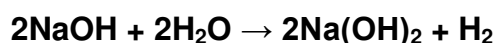


El hidrógeno salió en forma de gas por el cátodo, por el ánodo salió el cloro, el sodio no reacciona y se adhiere al electrodo negativo (cátodo) formando una capa alrededor del electrodo inoxidable, es natural que en esta reacción se produzcan iones de hidróxido que hace un medio básico o alcalino, además produce un color de tipo verde por la misma razón del cloro que se desprende el cual es tóxico.



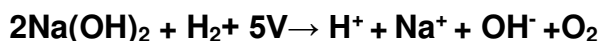
*Figura 36. Reacción de la sal con agua*

- Reacción del agua y la sosa caustica (**NaOH + H<sub>2</sub>O**)

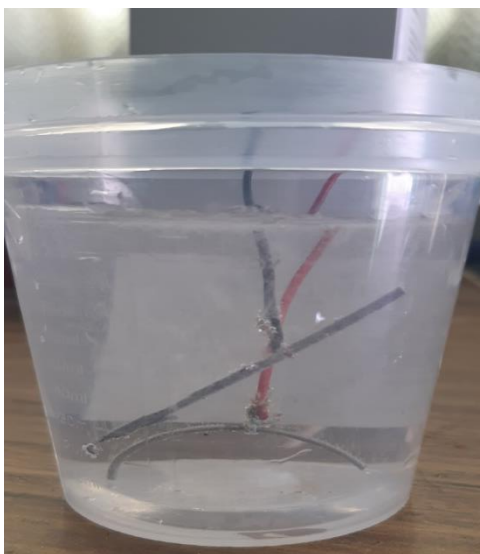


En esta solución acuosa se obtienen dos elementos químicos, el hidróxido de sodio y el hidrógeno, a esta solución se le introducen dos electrodos de acero inoxidable, más una corriente continua de 5V, como prueba.





El hidrógeno salió en forma de gas por el cátodo, por el ánodo sale el oxígeno, el sodio no reacciona y se adhiere al electrodo negativo (cátodo) formando una capa alrededor del electrodo inoxidable, es natural que en esta reacción se produzcan iones de hidróxido como un medio básico o alcalino, produce un color tipo celeste.



*Figura 37. Reacción del hidróxido de sodio más agua*

- Cantidad de moléculas de agua

Se halla la cantidad de moléculas que están en 140 mL (140 g) de solución, cabe resaltar que en la solución existe 20% de NaOH, así que la cantidad pura de agua es 112 mL (112 g), PM del agua (18 g/mol), de acuerdo con la siguiente fórmula. (16) (p. 322)

$$n_{\text{moles}} = \frac{M(\text{g})}{PM(\frac{\text{g}}{\text{mol}})}$$

**Datos:**

- PM: peso molecular
- M: masa en gramos

$$n_{\text{moles}} = \frac{112\text{g}}{18\frac{\text{g}}{\text{mol}}}$$

$$n_{moles} = 6.2 \text{ mol}$$

Esta es la cantidad de moles que se tiene en el reactor.

- Hallando el número de moléculas de agua

Para este cálculo se debe conocer el NA  $6.023 * 10^{23}$ , que en 1 mol de agua equivale a 1 NA. (16) (p. 325)

$$n_{moleculas} = \frac{6.2 \text{ mol} * 6.023 * 10^{23}}{1 \text{ mol}}$$

$$n_{moleculas} = 3.734 * 10^{24}$$

Está es la cantidad de moléculas de agua, con la que se va a trabajar en el reactor.

- Hallando los gramos de hidrógeno que hay en 112 g de agua.

$$g_{hidrogeno} = 6.2 \text{ mol} * 2 \left( \frac{g}{mol} \right) \text{ hidrógeno}$$

$$g_{hidrogeno} = 12.4 \text{ g de hidrógeno}$$

- Cálculo de la composición centesimal (%) de hidrógeno que hay en 112 de agua. (16) (p. 327)

$$\% \text{ hidrógeno} = \frac{12.4 \text{ g} * 100\%}{112 \text{ g}}$$

$$\% \text{ hidrógeno} = 11.07\%$$

- Hallando los gramos de oxígeno que hay en 112 g de agua.

$$g_{oxigeno} = 6.2 \text{ mol} * 16 \left( \frac{g}{mol} \right) \text{ oxígeno}$$

$$g_{hidrogeno} = 99.2 \text{ g de oxígeno}$$

- Cálculo de la composición centesimal (%) de oxígeno que hay en 112 g de agua. (16) (p. 327)

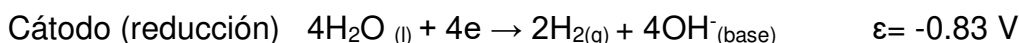
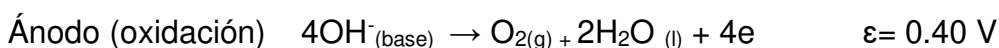
$$\% \text{ hidrógeno} = \frac{99.2g * 100\%}{112g}$$

$$\% \text{ hidrógeno} = 88.57\%$$

- Aplicando corriente al generador

En el Capítulo II se halló el potencial mínimo que se requiere para descomponer a la molécula del agua, asumiendo que no existe pérdidas de ninguna forma, el cual permitió poder calcular la reacción química.

$$E^{\circ} = E_{\text{cátodo}} - E_{\text{ánodo}} = -1.23 \text{ V}$$



- Masa de hidrógeno por cada Ah

En la reacción anterior se puede ver que tanto en el cátodo y en el ánodo existe un intercambio de 4e, que hacen que se produzcan 2 moles de H<sub>2</sub> y 1 mol de O<sub>2</sub>, se toma como base un consumo de 1 Ah, de la ecuación (2.1).

**Datos:**

1Ah: 3600 Coulomb → n moles e

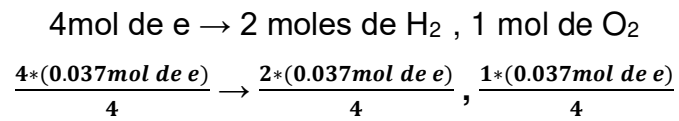
1mol e = 96500C

Calculando la cantidad de moles que existe en 1Ah, se divide.

$$n \text{ moles e} = \frac{3600C}{96500 \frac{C}{\text{mol}}}$$

$$n \text{ moles e} = 0.037 \text{ moles}$$

- Cálculo de moles de hidrógeno



0.037 mol de e  $\rightarrow$  0.0185 moles de H<sub>2</sub>, 0.0093mol de O<sub>2</sub>

Convirtiendo las moles de hidrógeno (H<sub>2</sub>) a kilogramos, PA=1

$$0.0185 \text{ moles de H}_2 * \frac{2\text{g}}{\text{mol}} = \mathbf{0.037\text{g de hidrógeno}}$$

Convirtiendo las moles de oxígeno (O<sub>2</sub>) a kilogramos, PA=16

$$0.00937 \text{ moles de O}_2 * \frac{32\text{g}}{\text{mol}} = \mathbf{0.296 \text{ g de oxígeno}}$$

- Cálculo de la carga eléctrica para producir 12 g de hidrógeno

**Datos:**

1kg: 1000g=0.012Kg

Hidrógeno: Pa 1 uma

$$12\text{g de hidrógeno} * \frac{1\text{mol}}{1\text{g de hidrógeno}} = \mathbf{12 \text{ mol e.}}$$

- Aplicando la fórmula de la carga eléctrica Q

$$Q = F * (n \text{ de moles de e})$$

$$Q = 96500 \left( \frac{\text{C}}{\text{mol}} \right) * 12 \text{ mol}$$

$$Q = \mathbf{1\ 158\ 000 \text{ C}}$$

- Convirtiendo a kW

$$Q = 1\,158\,000C * \left(\frac{1Ah}{3600C}\right)$$

$$Q = 321.6 Ah$$

$$Q = 0.3216 KAh$$

- Potencia requerida que se produce por cada 12 g de hidrógeno, trabajando con el voltaje mínimo.

$$P_{requerida} = Q * E^\circ$$

$$P_{requerida} = 0.3216 KAh * 1.23V$$

$$P_{requerida} = 0.394 KWh$$

- Cálculo de la carga eléctrica para producir 1 kg de hidrógeno.

Antes de hallar la potencia, se tiene que calcular cuántos moles hay en 1 kg de hidrógeno.

$$1000g \text{ de hidrógeno} * \frac{1mol}{1g \text{ de hidrogeno}} = 1000 \text{ mol e.}$$

- Aplicando la fórmula de la carga eléctrica Q

$$Q = 96500 \left(\frac{C}{mol}\right) * 1000 mol$$

$$Q = 96\,500\,000 C$$

- Convirtiendo a kW

$$Q = 96\,500\,000C * \left(\frac{1Ah}{3600C}\right)$$

$$Q = 26\,805 Ah$$

$$Q = 26.805 KAh$$

➤ Potencia requerida

Determinando el potencial requerido que se produce por cada kg de hidrógeno que se produce, con el voltaje mínimo.

$$P_{requerida} = 26.805 \text{ kAh} * 1.23 \text{ V}$$

$$P_{requerida} = 32.97 \text{ (kWh)}$$

➤ Cálculo del volumen de hidrógeno

**Datos:**

Presión: 1 atm

Temperatura 25 °C (289.15 °K)

$$R: 0.082 \frac{\text{L*atm}}{\text{K*mol}}$$

n: 0.0185 moles de H<sub>2</sub>

$$V = \frac{nRT}{P}$$

$$V = \frac{0.0185 \text{ mol de H}_2 * 0.082 \frac{\text{L*atm}}{\text{K*mol}} * 289.15^\circ\text{K}}{1 \text{ atm}}$$

$$V = 0.438 \text{ L}$$

$$V = 0.000438 \text{ m}^3$$

➤ Cálculo del volumen del oxígeno

**Datos:**

Presión: 1 atm

Temperatura 25 °C (289.15°K)

$$R: 0.082 \frac{\text{L*atm}}{\text{K*mol}}$$

n: 0.0093 moles de O<sub>2</sub>

$$V = \frac{0.0093 \text{ mol de O}_2 * 0.082 \frac{\text{L*atm}}{\text{K*mol}} * 289.15^\circ\text{K}}{1 \text{ atm}}$$

$$V = 0.227 \text{ L}$$

$$V = 2.27 * 10^{-7} \text{ m}^3$$

➤ Calor de la disolución del agua más NaOH, en el generador.

**Datos:**

- ✓ Agua: 112 g
- ✓ NaOH: 18 g
- ✓  $T_0=19\text{ }^\circ\text{C}$
- ✓  $T_f= 28\text{ }^\circ\text{C}$
- ✓  $\Delta T= 9\text{ }^\circ\text{C}$
- ✓  $C_e$  agua: 4.18 J/g  $^\circ\text{C}$
- ✓ PA: NaOH 40 uma
- ✓ Cantidad de disolución: 1200 g

$$Q=m \cdot C_e \cdot \Delta T$$

$$Q=1200\text{g} \cdot 4.18 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} \cdot 9^\circ\text{C}$$

$$Q= 5\,266.8\text{J}$$

➤ Cálculo de la variación de entalpía  $\Delta H$

$$\Delta H=1\text{mol de NaOH} \cdot \frac{40\text{g}}{1\text{mol de NaOH}} \cdot \frac{5266.8\text{J}}{28\text{gNaOH}}$$

$$\Delta H= - 7524\text{ J}$$

En la disolución se produce una reacción exotérmica con desprendimiento de calor de 9028.8 J

#### 4.3.3. Implementación del generador al motor Volkswagen

- Combustión ideal

Esta reacción ya se resolvió en el Cap. II.



Reacción balanceada.



En la reacción de combustión con la gasolina ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ), se produce:

- ✓ 4 mol de  $\text{CO}_2$
- ✓ 4 mol de  $\text{CO}$
- ✓ 1 mol de  $\text{O}_2$
- ✓ 43.24 mol de  $\text{N}_2$
- ✓ 9 mol de  $\text{H}_2\text{O}$

- Cálculo de la entalpía de la combustión normal, de la fórmula (2.7)

$$h_c = (4 \times -393520 \text{ kJ/kmol}) + (4 \times -110530 \text{ kJ/kmol}) + (9 \times -241820 \text{ kJ/kmol}) - (1 \times -249950 \text{ kJ/kmol})$$

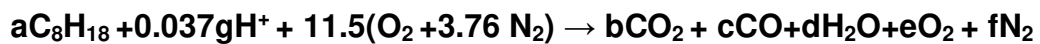
$$h_c = -3\,943\,730 \text{ kJ/kmol (proceso exotérmico)}$$

Este resultado se divide entre la masa molar de la gasolina (114.321 kg/kmol)

$$h_c = \frac{3\,943\,730 \frac{\text{Kj}}{\text{kmol}}}{114.321 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$h_c = 34\,496.9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ gasolina}$$

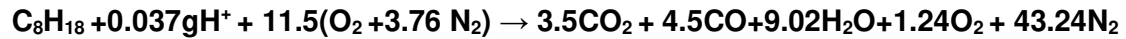
- Combustión con el generador de hidrógeno



- ✓  $8a = b + c$
- ✓  $18a + 0.037 = 2d$
- ✓  $23 = 2b + c + d + 2e$
- ✓  $43.24 = e$
- ✓  $a = 1, b = 8$



- ✓ **d=9.02**
- ✓ **f=1.24**
- ✓ **b=3.5,c=4.5**



- ✓ 3.5 mol de CO<sub>2</sub>
- ✓ 4.5 mol de CO
- ✓ 9.02 mol de H<sub>2</sub>O
- ✓ 43.24 mol de N<sub>2</sub>

Estos resultados obtenidos se verificarán con el analizador de gases, en funcionamiento con gasolina y con el generador para ver los efectos que produjo el hidrógeno.

Cálculo de la entalpía de la combustión con hidrógeno, de la fórmula (2.7)

$$h_c = (3.5 \times -393520 \text{ kJ/kmol}) + (4.5 \times -110530 \text{ kJ/kmol}) + (9.02 \times -241820 \text{ kJ/kmol}) - (1 \times -249950 \text{ kJ/kmol})$$

$$h_c = -3\,807\,071.4 \text{ kJ/kmol (proceso exotérmico)}$$

Este resultado se divide entre la masa molar de la gasolina (114.321 kg/kmol).

$$h_c = \frac{3\,807\,071.4 \frac{\text{Kj}}{\text{kmol}}}{114.321 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$h_c = 33\,301 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{gasolina} + H$$

- **Impacto ambiental del generador de hidrógeno.**

En esta parte se menciona el impacto ambiental del diseño del generador de hidrógeno, ya sea desde la perspectiva social, económica, política y sobre todo

ambiental, con la finalidad de disminuir o evitar los efectos que este diseño podría causar al final de su ciclo de vida.

En el Perú la evaluación del impacto ambiental se realiza de manera integral (Ley 27446)<sup>31</sup> , que reúne una serie de criterios y normas para la protección ambiental.

Como primera etapa, el diseño del generador de hidrógeno empieza desde la toma de materiales ya procesados como el acero, pernos, caucho, y polímeros, estos fueron manufacturados para luego ser utilizados y ensamblados en dicho diseño.

Como segunda etapa, viene la utilización, disponibilidad y confiabilidad del generador en el vehículo a ser utilizado, este comprende su ciclo de vida y su vida útil, con la finalidad de justificar la inversión en el proyecto realizado, cabe mencionar que su fin de su ciclo de vida será la reutilización del propio diseño o al reciclaje, conforme a la ley ya mencionada.

Si bien no se está aplicando la gestión de activos para poder calcular el ciclo de vida y el costo del ciclo, se tiene en cuenta acerca de la disposición final del generador de hidrógeno, que será previa evaluación física de sus componentes y tomar la decisión final.

---

<sup>31</sup>Ley Sneia 27446. “Minam” disponible en [<http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/10/Ley-y-reglamento-del-SEIA1.pdf>]

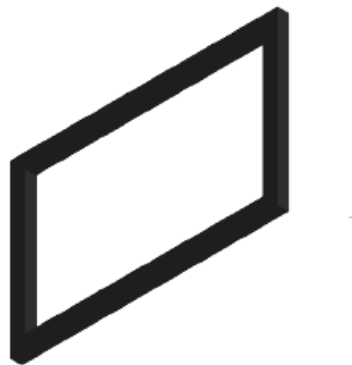
## CAPÍTULO V

### 5.1. Construcción

Para empezar con la construcción del generador de hidrógeno, se diseñó con el programa AutoCAD, para definir las dimensiones finales: dimensión de la junta, dimensión de los electrodos, placas, pernos.

#### ➤ Juntas con empaquetadura

La junta que se utiliza es del material de caucho, no tiene presencia en la reacción química, este tipo de materia se adhiere bien a las uniones de pernos cumpliendo la función de un sello retén, esta junta va a garantizar una total hermeticidad del líquido para evitar su fuga.



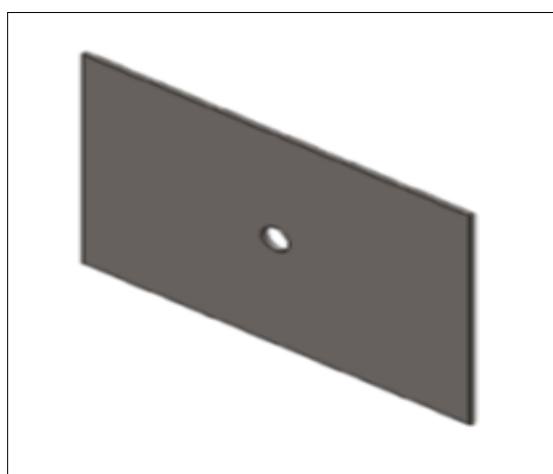
*Figura 38. Junta de caucho*

➤ Electrodo de acero inoxidable AISI 316

Se trabaja con este tipo de material acero inoxidable AISI 316, que es el más común y comercial, y como se habló en el Cap. II, este tipo de material no participa en la reacción química de la electrolisis por lo que se comporta de forma neutral, el acero inoxidable AISI 316 según la EN 10088-2 está con grado 1.4301, como se observa en la Tabla 28 y Figura 39.

**Tabla 28. Propiedades mecánicas del acero inoxidable**

	Grado	Producto <sup>1)</sup>	Espesor máximo (mm)	Mínima resistencia <sup>2)</sup> correspondiente al 0.2% (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia última a tracción (N/mm <sup>2</sup> )	Alargamiento de rotura (%)
Aceros inoxidables austeníticos básicos de cromo níquel y	1.4301	C	8	230	540 – 750	45 <sup>(3)</sup>
		H	13,5	210	520 – 720	45 <sup>(3)</sup>
		P	75	210	520 – 720	45
	1.4307	C	8	220	520 – 700	45
		H	13,5	200	520 – 700	45
		P	75	200	500 – 700	45
Aceros inoxidables austeníticos de molibdeno, cromo níquel y	1.4401	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45
	1.4404	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45
Aceros inoxidables austeníticos estabilizados	1.4541	C	8	220	520 – 720	40
		H	13,5	200	520 – 720	40
		P	75	200	500 – 700	40
	1.4571	C	8	240	540 – 690	40
		H	13,5	220	540 – 690	40
		P	75	220	520 – 670	40
Aceros inoxidables austeníticos bajos en carbono, altos en nitrógeno	1.4318	C	8	350	650 – 850	35
		H	13,5	330	650 – 850	35
		P	75	330	630 – 830	45
		C	8	450	650 – 850	20



**Figura 39. Electrodo de acero inoxidable**

- Diseño del generador de hidrógeno
  - Se diseña un generador de hidrógeno por electrolisis de tipo celda seca o *dry cell*.
  - Este generador será de forma cuadrada. Hay dos tapas en los dos extremos y entre las dos tapas se encuentran las chapas que hacen de electrodos, separadas entre ellas por unas juntas.
  - Las tapas son de algún material no metálico de baquelita que sea aislante y no pase la corriente.
  - Los electrodos, son chapas de material de acero inoxidable.
  - Las juntas están elaboradas con algún material de caucho, ya que se encuentran entre los electrodos, y tienen que evitar que los electrodos entren en contacto. El espesor de las juntas dependerá de la distancia que se necesite entre electrodos. Normalmente esta distancia varía entre 3 y 2.5 mm.
  
- Dimensión de las piezas del generador
  - Placa o electrodo  
Medida de 10 cm x 8 cm, y un espesor de 0.15 cm
  - Junta de caucho  
Medida de 10 cm x 8.15 cm, y un espesor de 3 mm
  - Tapas extremas del generador  
Medida de 13 cm x 10.8 cm y un espesor de 1.25 cm
  - Pernos  
Pernos SAE grado 1, diámetro ¼ in x largo 3 5/8 in.

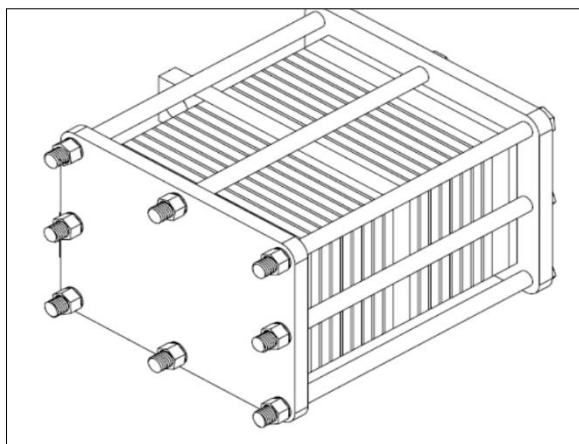
De esta manera, el generador quedará de la siguiente forma, ya tomando los aspectos finales de diseño para su funcionamiento, Figura 38.

### **5.1.1. Conformación del generador de hidrógeno**

El diseño del electrolizador está conformado por 13 celdas metálicas de forma rectangular separadas por un intermedio de material de 14 láminas de caucho

como aislante que soporte la temperatura y que sea hermético para la conexión de tubos de entrada y salida del electrolito conectados al centro del recipiente.

Los ductos de salida están conectados el reverso del ducto de la entrada, la distancia de los electrodos es fija ya que están ordenados a distancias iguales debido a que el separador de caucho tiene un espesor ya definido que actúa como separador de las placas de acero inoxidable.



**Figura 40. Diseño final del generador de hidrógeno**

- El generador consta de los siguientes elementos:
  - Celdas de acero inoxidable 316 L
  - Forma de electrodos rectangulares
  - Cauchos separadores de celda
  - Pernos pasantes con sus respectivas tuercas
  - Dos placas de baquelita blanca

### **5.1.2. Consideraciones generales del cuerpo del generador**

- Geometría de las celdas
- Longitud de los electrodos, ánodo y cátodo
- Forma de los electrodos
- Áreas pequeñas de conducción de los electrodos (área transversal)
- Bajo sobrepotencial de los elementos que componen el circuito eléctrico
- Volumen para que se realice la reacción química

➤ Diseño adecuado de ductos de salida de los gases (para evitar la aglomeración de moléculas de vapor dentro de la celda.

- Sistema de alimentación de electrolito

Sistema encargado de la distribución del electrolito (solución al 20% de hidróxido de sodio), desde el tanque principal de almacenamiento hasta el electrolizador por gravedad ya que el depósito del electrolito se encuentra por encima del electrolizador y tiene la forma redonda con dos salidas y un ingreso para la distribución del líquido y del gas.

En la Figura 41 se muestra el depósito o tanque de electrolito, está constituido por un cuerpo redondo de polietileno u otro material que no reaccione con el electrolito, con tapa de polietileno a presión y además con un terminal ubicado en la parte inferior del cuerpo del tanque.



**Figura 41. Recipiente o tanque del electrolito**

- Esquema del sistema eléctrico del reactor de hidrógeno

El sistema eléctrico del carro Volkswagen es un sistema eléctrico muy básico, que consta de una chapa de contacto, con fusibles, una batería de 12 V, Figura 41, y el sistema de luces.

El generador eléctrico estará en función de un interruptor eléctrico, este sirve para que el generador funcione después de 3 min de calentamiento del motor,

después de este tiempo se activará el interruptor y el generador realizará su trabajo electroquímico.



**Figura 42. Interruptor eléctrico  
Tomada de Automotriz<sup>32</sup>**

Otro de los dispositivos eléctricos utilizados será el *relay* de 12 V, cuya función principal será abrir o cerrar el circuito eléctrico u otros circuitos eléctricos.



**Figura 43. Batería 12 V  
Tomada de Automotriz.<sup>33</sup>**

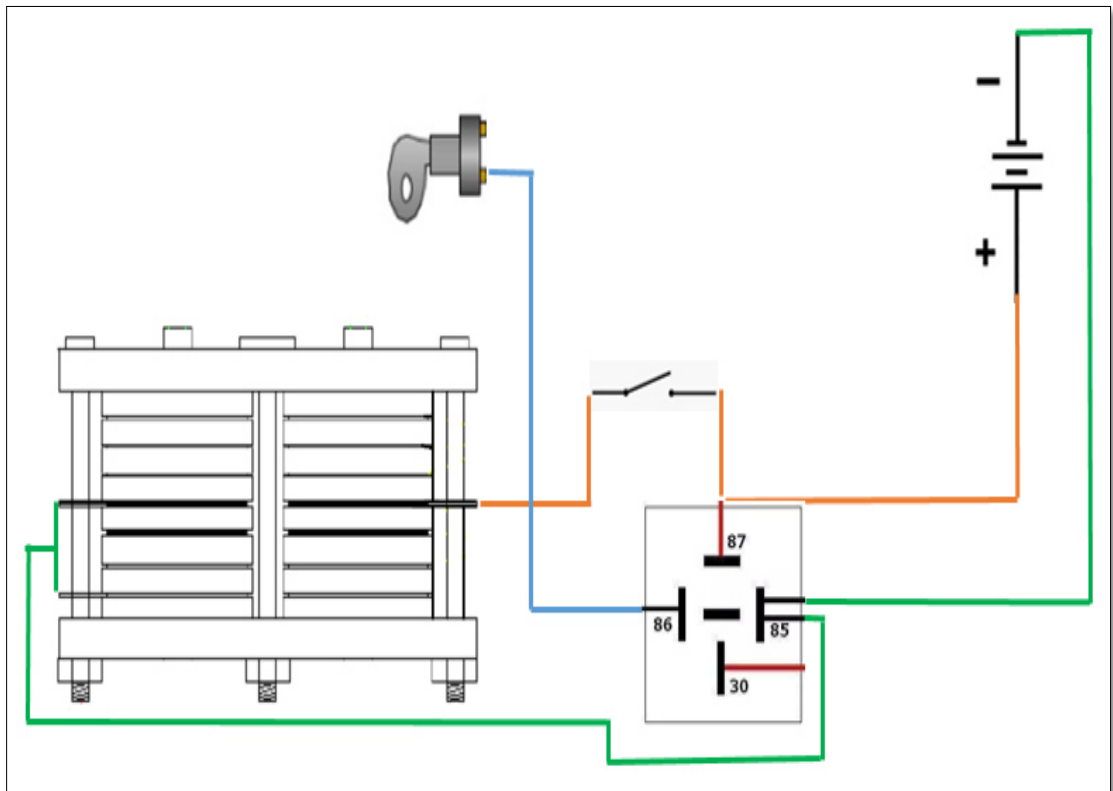
---

<sup>32</sup>Interruptor eléctrico. "Automotive". Disponible en:  
[<https://daierlee.manufacturer.spanish.globalsources.com/si/6008827050959/pdtl/Automotive-switch/1168799256/Automotive-Rocker-Car-Switch.htm>]

<sup>33</sup> Batería 12 V. "Lubricantes". Disponible en:[<https://www.lubricantes-online.com/bateria-fqs-12v-62ah-480a-i-especial-japonesa>]



- Diagrama eléctrico del generador de hidrógeno



**Figura 44. Sistema eléctrico del generador de hidrógeno**

El diseño del generador cumple con las listas de exigencias y cumple lo propuesto en la matriz morfológica, haciendo de este diseño muy fácil de instalar con pocos recursos eléctricos, ya que el mismo carro tiene un sistema muy básico de electricidad.

## **5.2. Pruebas y resultados**

### **5.2.1. Pruebas**

Se calculó todos los parámetros de funcionamiento del motor Volkswagen con gasolina.

Tabla 29. *Parámetros característicos del motor Volkswagen*

### **PARAMETROS DEL MOTOR VOLKSWAGEN DE 1.5L**

<b>Parámetros</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<i>Masa teórica de aire</i>	$l_0$	14.96	kg
<i>Masa real de aire</i>	$l$	13.46	kg
<i>Rendimiento volumétrico</i>	$n_v$	0.745	
<i>Presión media indicada</i>	$p_{mi}$	0.94	MPa
<i>Presión media mecánicas</i>	$p_{mpm}$	0.1642	MPa
<i>Presión media efectiva</i>	$p_{me}$	0.776	MPa
GASOLINA			
<i>Consumo específico</i>	$g_i$	260	g/kWh
<i>Consumo por hora</i>	$G_e$	12	kg/h
RENDIMIENTOS			
<i>Rendimiento indicado</i>	$n_i$	0.315	
<i>Rendimiento mecánico</i>	$n_m$	0.83	
<i>Rendimiento efectivo</i>	$n_e$	0.261	
POTENCIA			
<i>Potencia efectiva</i>	$N_e$	38.4	kW

#### **5.2.2. Resultados**

Se calcularon los parámetros de funcionamiento y producción de hidrógeno y oxígeno, desde 1 Ah hasta 10 Ah, así como 1.23 V hasta 12.5 V

**Tabla 30. Producción de hidrógeno**

<b>PRODUCCION DE HIDROGENO</b>			
<b>Amperios hora</b>	<b>Coulomb</b>	<b>Moles</b>	<b>Masa (g)</b>
1 AH	3600	0.018653	0.037306
2 AH	7200	0.037306	0.074611
3 AH	10800	0.055959	0.111917
4 AH	14400	0.074611	0.149223
5 AH	18000	0.093264	0.186528
6 AH	21600	0.111917	0.223834
7 AH	25200	0.130570	0.261140
8 AH	28800	0.149223	0.298446
9 AH	32400	0.167876	0.335751
10 AH	36000	0.186528	0.373057
11 AH	39600	0.205181	0.410363
12 AH	43200	0.223834	0.447668
13 AH	46800	0.242487	0.484974

**Tabla 31. Producción de oxígeno**

<b>PRODUCCION DE OXIGENO</b>			
<b>Amperios hora</b>	<b>Coulomb</b>	<b>Moles</b>	<b>Masa (g)</b>
1 AH	3600	0.009326	0.298446
2 AH	7200	0.018653	0.596891
3 AH	10800	0.027979	0.895337
4 AH	14400	0.037306	1.193782
5 AH	18000	0.046632	1.492228
6 AH	21600	0.055959	1.790674
7 AH	25200	0.065285	2.089119
8 AH	28800	0.074611	2.387565
9 AH	32400	0.083938	2.686010
10 AH	36000	0.093264	2.984456
11 AH	39600	0.102591	3.282902
12 AH	43200	0.111917	3.581347
13 AH	46800	0.121244	3.879793

**Tabla 32. Potencia requerida para 1 kg de hidrógeno**

<b>POTENCIA REQUERIDA PARA 1Kg DE HIDROGENO</b>	
<b>Voltaje V</b>	<b>Carga eléctrica kAh/kg H</b>
1.23	32.97
2	53.61
2.4	64.33
3	80.42
3.5	93.82
4	107.22
4.5	120.62
5	134.03
5.5	147.43
6	160.83
6.5	174.23
7	187.64
7.5	201.04
8.5	227.84
9.5	254.65
10.5	281.45
11.5	308.26
12.5	335.06
13.5	361.87

**Tabla 33. Volumen del hidrógeno a partir de 1 kg**

<b>VOLUMEN DEL HIDROGENO</b>	
<b>Moles</b>	<b>Volumen m3</b>
0.018653	0.000442
0.037306	0.000885
0.055959	0.001327
0.074611	0.001769
0.093264	0.002211
0.111917	0.002654
0.130570	0.003096
0.149223	0.003538
0.167876	0.003980
0.186528	0.004423
0.205181	0.004865
0.223834	0.005307
0.242487	0.005749

**Tabla 34. Volumen de oxígeno a partir de 1 kg**

<b>VOLUMEN DEL OXIGENO</b>	
<b>Moles</b>	<b>Volumen m3</b>
0.009326	0.000221
0.018653	0.000442
0.027979	0.000663
0.037306	0.000885
0.046632	0.001106
0.055959	0.001327
0.065285	0.001548
0.074611	0.001769
0.083938	0.001990
0.093264	0.002211
0.102591	0.002432
0.111917	0.002654
0.121244	0.002875

**Tabla 35. Resultados del analizador de gases JEVOL, con gasolina y con hidrógeno**

VEHICULO			
VOLKSWAGEN 1.5L			
GASOLINA		GASOLINA + HIDROGENO	
CO Ralenti(%)	0.1	CO Acelerado(%)	0.1
CO+CO2 Ralenti(%)	0.1	CO+CO2 Acelerado(%)	0.1
HC Ralenti(PPM)	17	HC Acelerado(PPM)	16
O2 (%)	20.79	O2 (%)	20.82

Tiempo de prueba: 10min



## CAPÍTULO VI

### 6.1. Estimación de costos

En esta fase final se estiman de costos que se involucraron en la construcción del diseño mecánico del generador de hidrógeno, donde se describen las piezas y sus costos.

**Tabla 36. Lista de requerimientos y sus costos**

<b>Ítem</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Material</b>	<b>Precio</b>
1	2	Placas de 25 x 30cm	Baquelita	S/ 86.00
2	13	Láminas de acero de inoxidable	306	S/ 180.00
3	14	Laminas de caucho	Caucho	S/ 45.00
4	8	Pernos de 1/4 x 3 5/8	SAE GRADO 1	S/ 24.00
5	1	Batería		S/ 125.00
6	1	Reservorio de electrolito	Polímero	S/ 185.00
7	1	Cable rojo de cobre de 2m	AWG 16	S/ 12.00
8	1	Cable negro de cobre de 2m	AWG 17	S/ 12.00
9	1	Vaso con tapa	Polímero	S/ 22.00
10	1	Ducto de agua de 1/2x3m		S/ 22.00
11	1	Angulo de 15x15mm x 1.2m	Acero	S/ 11.00
12	1	Ducto de agua de 3/8 x1.5m		S/ 18.00
<b>PRECIO TOTAL DE MATERIALES NO INCLUYE IGV</b>				<b>S/ 742.00</b>

- Otros costos

En esta otra parte se consideran otros costos que involucran el costo del diseño del generador de hidrógeno, planos de ensamble y detalles. También se están considerando los costos de montaje y ensamblado.

**Tabla 37. Costos adicionales**

<b>Ítem</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Material</b>	<b>Precio</b>
1	4	Litros de agua destilada	Agua	S/ 11.00
2	800	Gramos de NaOH	Sosa caustica	S/ 48.00
3	200	Gramos de NaCl	Sal	S/ 4.00
4	4	Galones de gasolina	Combustible	S/ 43.00
5	1	Llave Mixta de 11mm		S/ 8.00
6	6	Abrazaderas de 3/4 pulg	Acero	S/ 13.50
7	4	Pernos 3/8x2 pulg para el soporte de generador	Acero	S/ 8.00
<b>PRECIO TOTAL</b>				<b>S/ 135.50</b>

**Tabla 38. Costo total de fabricación**

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio</b>
1	Costo de materiales de adquisición	S/ 742.00
2	Otros costos de adquisición	S/ 127.50
3	Fabricación de soporte de generador	S/ 85.00
4	Costos de montaje y ensamblado	S/ 250.00
<b>PRECIO TOTAL DE FABRICACION DEL GENERADOR</b>		<b>S/ 1,204.50</b>

## CONCLUSIONES

1. Se logró diseñar y construir un generador de hidrógeno, como mecanismo electroquímico para la producción de hidrógeno.
2. Se determinaron y calcularon los componentes básicos de ensamble del generador de hidrógeno.
3. Se realizaron satisfactoriamente las pruebas de funcionamiento con y sin el generador de hidrógeno en el motor Volkswagen con la finalidad de comparar sus resultados.
4. Mediante el analizador de gases JEVOL se pudo comprobar el efecto que causó el hidrógeno en la combustión del motor Volkswagen en ralentí y acelerado, el cual arrojó un 11% menos de ppm comparado con el uso de la gasolina, ver Tabla 35.
5. Se determina que el hidrógeno tiene un efecto positivo con los gases quemados, haciendo este una reducción de los gases contaminantes.
6. Se produjo hidrógeno en cantidades considerables para las pruebas en el motor del Volkswagen.
7. Gracias a la previa investigación se analizó y determinó que el proyecto motor generador de hidrógeno tiene como resultado mejorar el estado del medio ambiente ya que se logrará reducir gran parte de la emisión de HC el cual ayudará a combatir y prevenir algunas enfermedades que se van procreando a base de la contaminación y a la vez elaborar un producto económico.
8. Con simulación matemática se determinaron los parámetros y cantidades que relacionan al motor con el generador de hidrógeno.
9. Se concluye que el hidrógeno no causa efectos en el rendimiento ni potencia



del motor, ya que se utiliza el aire del medio ambiente.

10. Se determinó que para producir hidrógeno se necesita mucha energía para su almacenamiento ya que este ocupa más volumen que el oxígeno, pero con poca masa molecular.

## RECOMENDACIONES

1. El presente trabajo de investigación busca optimizar los resultados y compararlos con datos reales, coherentes y confiables a través de sus cálculos y simulaciones matemáticas.
2. Se recomienda que, para un futuro estudio, se utilice solo hidrógeno y oxígeno regulados con un caudalímetro electrónico, y simular condiciones para el funcionamiento del motor, con la finalidad de obtener los efectos del uso del hidrógeno en la combustión.
3. Se recomienda implementar un laboratorio de instrumentación en la universidad para el análisis de gases, lubricantes, y otros, con el fin de poder hacer investigación más científica, ya que la ciudad de Huancayo tiene un gran potencial para hacer estudios relacionados con el medio ambiente.
4. Con los datos obtenidos se recomienda aplicar este modelo de investigación, para comparar teorías, cálculos y tomar como referencia las bibliografías citadas.

## **TRABAJOS FUTUROS**

- 1.** Se diseñará un prototipo de generador versátil para vehículos menores.
- 2.** Se evaluará el estado físico de las piezas mecánicas del motor después que funcione más de 2000 h.
- 3.** Se mejorará la eficiencia del generador utilizando otros tipos de electrolitos.
- 4.** Se evaluará la capacidad de producción de un generador de hidrógeno de mayor capacidad, como energía renovable.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **CANDO PIARPUEAN, Hugo Fernando y QUELAL MANOSALVAS, Henry Ruperto.** *Construcción y adaptación de un sistema generador de gas de hidrógeno para suministrarlo a un motor de combustión interna.* Universidad Técnica del Norte. Ibarra : s.n., 2012. pág. 175, Tesis. 9780495411307.
2. **SUÁREZ BENAVIDES, William Omar.** *Generador de hidrógeno como reductor de gases contaminantes para los motores KIA, en el 3ero de bachillerato del instituto educativo particular “Latinoamericano” en el sector de Lumbisi, año lectivo 2017-2018.* Universidad Central del Ecuador. Quito : s.n., 2018. pág. 126.
3. **DIAS REY, Ángel, GONZÁLES GIL, Eduardo y GONZÁLES ESTRADA, Andrés.** *Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna.* Bucaramanga : s.n., 2018, Revista UIS Ingenierías, Vol. 17, pág. 12. 16574583.
4. **TAMAYO, Edwin, y otros.** *Efecto del uso de hidrógeno en la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna.* Quito : s.n., 2016, Enfoque UT, Vol. 7, págs. 43-54. 1390-6542.
5. **SAINZ CASAS, David.** *Adaptación de un motor de combustión interna alternativo de gasolina para su funcionamiento con hidrógeno como combustible. Aplicaciones energéticas y de automoción.* Universidad Privada de Navarra. 2014. pág. 75, Tesis doctoral.
6. **VELÁSQUEZ PIEDRAHÍTA, Juan David y QUICENO CASTAÑEDA, John Fredy.** *Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrolisis.* Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira : s.n., 2013. pág. 63, Tesis.

7. **BETANCUR BUENO, Jhon Alexander.** *Estudio del desempeño de un motor a gasolina operando con el combustible premezclado gasolina - hidrógeno.* Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira : s.n., 2014. pág. 135, Tesis.
8. **MONTAGNE VELASQUEZ, Richard Adán.** *Diseño de un generador de hidrógeno como combustible para los motores de combustión de ciclo Otto en la region Puno 2015.* Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistema, Universidad Nacional del Altiplano. Puno : s.n., 2016. pág. 125, Tesis.
9. **BELTRÁN BELTRÁN, Nick Romel y CARMEN ROMERO, Lisseth Lidia.** *Determinacion de la densidad de corriente y distancia entre electrodos óptimos para la producción de hidrógeno en un reactor tubular.* Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Centro. Huancayo : s.n., 2013. pág. 107, Tesis. 9788578110796.
10. **VÁSQUEZ, Rodrigo y SALINAS, Felipe.** *Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile.* Santiago de Chile : s.n., marzo de 2018, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, Vol. 6, págs. 1-134.
11. **SANCHEZ MIÑO, Santiago J.** *Energías renovables: conceptos y aplicaciones.* [ed.] Irma Larrea Oña. 196, Quito : s.n., 2004, Energías renovables. 9978581286.
12. **ARZAC DI TOMASO, Gisela.** *Estudio de la reacción de hidrólisis del borohidruro sódico como medio de producción de hidrógeno para aplicaciones portátiles.* Química orgánica, Universidad de Sevilla. Sevilla : s.n., 2013. pág. 81, Tesis doctoral.
13. **GELFAND, Boris, y otros.** *Dinámica de gases térmicos de combustión y explosión de hidrógeno.* s.l. : Editorial Springer, 2008. págs. 5-339. 9783540745686.

14. **LINARES HURTADO, José Ignacio y MORATILLA SORIA, Beatriz Yolanda.** *El hidrógeno y la energía.* 2006, Avances de Ingeniería, Vol. 13, págs. 1-184. 9788493277291.
15. **JARA BENITES, Carlos y CUEVA GARCÍA, Rubén.** Reacciones químicas I. [aut. libro] Carlos Jara Benites y Rubén Cueva García. *Problemas de Química y cómo resolverlos.* Lima : Racso editores, 2001, págs. 249-267.
16. —. Reacciones Químicas II. [aut. libro] Carlos JARA BENITES y Rubén Cueva García. *Problemas de Química y cómo resolverlos.* Lima : Racso editores, 2001, págs. 281-290.
17. **CERVANTES HERNÁNDEZ, Karol, y otros.** *Motor generador de hidrógeno.* Ciencias Fisicomatemáticas y de las Ingenierías, Universidad del Valle de México, campus Hispano. Mexico : s.n., 2017. págs. 1-14, experimental.
18. **ROMERO POLANCO, Polanco.** *Producción de hidrógeno vía electrolítica para su uso en automoción.* Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid. Valladolid : s.n., 2018. pág. 134, Tesis.
19. **PAYRI GONZÁLEZ, Francisco y DESANTES FERNÁNDEZ, José María.** *Motores de combustión interna alternativos.* Valencia : Editorial Reverte S. A., 2011. págs. 1-110. 9788483637050.
20. **CENGEL, Yunes y BOLES, Michael.** *Termodinámica. 7.<sup>a</sup> ed.* Mexico : Mc Graw Hill, 2019. págs. 1-1009. 978-607-15-0743-3.
21. **MORAN, Michael y SHAPIRO, Howard.** *Fundamentos de termodinámica técnica.* Español. Barcelona : Editorial Reverte S. A., 2004. págs. 1-867. Vol. 2.<sup>a</sup> ed. 8429143130.
22. **JOVAJ, M.** *Motores de automóvil.* [trad.] Abelardo Ludeña Luque. Moscú : Editorial MIR, 1982. págs. 1-655.

23. **ERAZO LÓPEZ, Jorge Esteban.** *Análisis del comportamiento de un motor de combustión interna a gasolina de 4 cilindros 1800 cc del vehículo Chevrolet Optra Limited.* facultad de Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK. Santiago Celi : s.n., 2013. pág. 113, Tesis.
24. **BUDYNAS, Richard y KEITH, Nisbett.** *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.* [trad.] Jesús Elme Murrieta Murrieta y Efrén Alatorre Miguel. 8.ª ed. Mexico : Mc Graw Hill, 2008. págs. 1-1058. 978-0-07-312193-2.
25. **BARRIGA GAMARRA, Benjamín.** *Métodos de diseño en ingeniería mecánica.* Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima : s.n., 2016. pág. 19.
26. **INSTITUTE, Euro Inox y el STEEL CONSTRUCTION.** *Manual de diseño para acero inoxidable estructural.* 3.ª ed. 2006. págs. 1-134. 2879972078.
27. **ACOSTA QUISPE, Germán Elías y SALGADO ROJAS, Christian Ricardo.** *Diseño y construcción de un electrolizador de corriente continua de 200 watios con energía solar e instrumentación necesaria para medir la producción de hidrógeno.* Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional. Quito : s.n., 2010. pág. 243, Tesis.
28. **QUEZADA ROMERO, Edison Miguel y TORRES GUALAN, Diego Fernando.** *Implementación de un generador de celda seca hidrógeno en un vehículo Chevrolet Steem 1.6L.* Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca : s.n., 2014. pág. 166, Tesis.
29. **MORAN, Michael y SHAPIRO, Howard.** Mezclas reactivas y combustión. [aut. libro] Michael Moran y Howard Shapiro. *Fundamentos de termodinámica técnica.* 2.ª ed. Barcelona : Editorial Reverte S. A., 2004, 14, págs. 701-730.

## **ANEXOS**



## Anexo 1

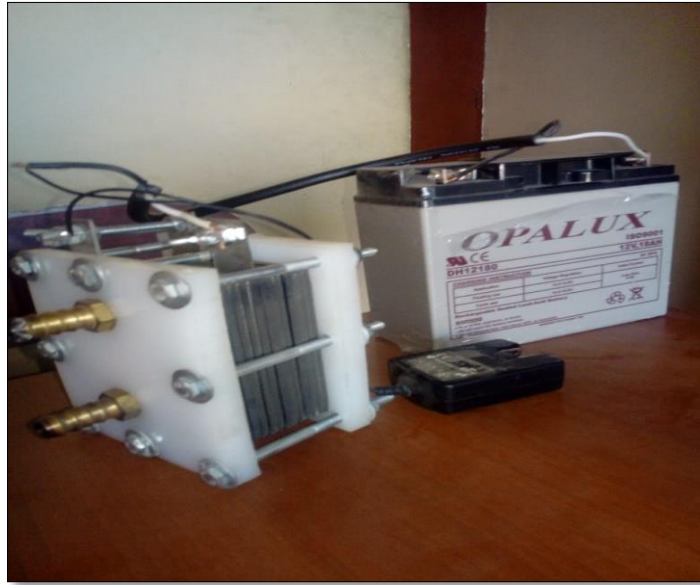
### Matriz de consistencia y su operacionalización de variables

Problema principal	Objetivo principal	Hipótesis principal	Operacionalización de variables
<p>¿Cómo diseñar un generador de hidrógeno para optimizar la combustión de un motor Volkswagen de 1.5 L en la ciudad de Huancayo?</p>	<p>Diseñar un generador de hidrógeno para optimizar el proceso de la combustión y control ambiental en vehículos gasolineros</p>	<p>El diseño del generador de hidrógeno logrará producir algún efecto en el proceso de la combustión</p>	<p><b>X: Diseño de un generador de hidrógeno</b>            X1: Diseñar un generador de hidrógeno para optimizar el proceso de la combustión siguiendo la metodología de la norma alemana VDI.            X2: Calcular y dimensionar los elementos mecánicos del generador de hidrógeno.            X3: Determinar y utilizar el electrolito más viable posible.            X4: Analizar el comportamiento del proceso químico de la reacción electrolítica.            Y: Optimizar el proceso de combustión con beneficios ambientales.</p>

### **Operacionalización de Variables**

<b>Variable independiente</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Subdimensión</b>	<b>Indicador</b>
Diseño de un generador de hidrógeno.	Concepto ideal de un diseño mecánico que permita cumplir las exigencias claras y ordenadas, determinando las funciones para llegar al concepto de solución.	Concepto ideal de un generador de hidrógeno.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exigencias claras y ordenadas.</li> <li>- Determinando las funciones.</li> <li>- Llegar al concepto de solución.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lista de deseos y exigencias.</li> <li>- Matriz morfológica</li> <li>- Evaluación técnico-económica</li> </ul>
<b>Variable dependiente</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Subdimensión</b>	<b>Indicador</b>
Optimizar la combustión en un motor de 1.5 L.	Proceso innovador con características innovadoras que permitan su funcionamiento de forma confiable en la optimización del proceso de combustión.	Proceso innovador con características innovadoras.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Funcionamiento de forma confiable.</li> <li>- Proceso de combustión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensionamiento y cálculo de los materiales.</li> <li>- Análisis de los parámetros termoquímicos de la combustión.</li> </ul>

**Anexo 2**  
**Generador y batería**



**Burbujeador, tanque redondo y el generador**



## Prueba de gases utilizando solo gasolina



## Instalación del generador de hidrógeno





### Prueba con el analizador de gases



### Monitoreo del equipo analizador de gases JEVOL



### Anexo 3

#### Potencial estándar de reducción y oxidación $\epsilon^\circ$

Electrodo	Semirreacción de reducción	$E^\circ / V$	Poder
Li <sup>+</sup> / Li	Li <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> → Li (s)	-3,05	R E D U C T O R
K <sup>+</sup> / K	K <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> → K (s)	-2,92	
Ca <sup>2+</sup> / Ca	Ca <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> → Ca (s)	-2,76	
Na <sup>+</sup> /Na	Na <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> → Na (s)	-2,71	
Mg <sup>2+</sup> / Mg	Mg <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> → Mg (s)	-2,36	
Al <sup>3+</sup> / Al	Al <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup> → Al (s)	-1,68	
H <sub>2</sub> O/ H <sub>2</sub> ,OH <sup>-</sup> , Pt	2 H <sub>2</sub> O + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> (g) + 2 OH <sup>-</sup> (aq)	-0,83	
Zn <sup>2+</sup> / Zn	Zn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> → Zn (s)	-0,73	
Cr <sup>3+</sup> / Cr	Cr <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup> → Cr (s)	-0,74	
Fe <sup>2+</sup> / Fe	Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> → Fe (s)	-0,44	
Co <sup>2+</sup> / Co	Co <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> → Co (s)	-0,28	
Ni <sup>2+</sup> / Ni	Ni <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> → Ni (s)	-0,25	
Sn <sup>2+</sup> / Sn	Sn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> → Sn (s)	-0,14	
Pb <sup>2+</sup> / Pb	Pb <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> → Pb (s)	-0,13	
H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub> , Pt	2 H <sup>+</sup> + 2 e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> (g)	0,00	
S, H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub> S, Pt	S (s) + 2H <sup>+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> S (s)	+0,14	O X I D A N T E
Cu <sup>2+</sup> /Cu <sup>+</sup> , Pt	Cu <sup>2+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Cu <sup>+</sup> (aq)	+0,15	
Sn <sup>4+</sup> /Sn <sup>2+</sup> , Pt	Sn <sup>4+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Sn <sup>2+</sup> (aq)	+0,15	
AgCl/Ag, Cl <sup>-</sup> , Pt	AgCl (s) + e <sup>-</sup> → Ag (s) + Cl <sup>-</sup> (aq)	+0,22	
Cu <sup>2+</sup> / Cu	Cu <sup>2+</sup> (aq) + 2e <sup>-</sup> → Cu (s)	+0,34	
O <sub>2</sub> ,H <sub>2</sub> O/OH <sup>-</sup> ,Pt	O <sub>2</sub> (g) + 2 H <sub>2</sub> O + 4 e <sup>-</sup> → 4 OH <sup>-</sup> (aq)	+0,40	
Cu <sup>+</sup> / Cu	Cu <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Cu (s)	+0,52	
I <sub>2</sub> /I <sup>-</sup> , Pt	I <sub>2</sub> (s) + 2e <sup>-</sup> → 2 I <sup>-</sup> (aq)	+0,54	
Pt, Fe <sup>3+</sup> / Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup> + e <sup>-</sup> → Fe <sup>2+</sup>	+0,77	
Ag <sup>+</sup> /Ag	Ag <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> → Ag	+0,80	
Br <sub>2</sub> /Br <sup>-</sup> , Pt	Br <sub>2</sub> (l) + 2e <sup>-</sup> → 2 Br <sup>-</sup> (aq)	+1,08	
O <sub>2</sub> ,H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub> O ,Pt	O <sub>2</sub> (g) + 4 H <sup>+</sup> (aq) + 4 e <sup>-</sup> → 2 H <sub>2</sub> O	+1,23	
Cl <sub>2</sub> /Cl <sup>-</sup> , Pt	Cl <sub>2</sub> (g) + 2e <sup>-</sup> → 2 Cl <sup>-</sup> (aq)	+1,36	

**Tomada de Potencial estándar.<sup>34</sup>**

<sup>34</sup>Potencial de estándar, "Educativa". Disponible en: [[http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4861/html/3\\_escaladepotenciales\\_estndar\\_de\\_reduccion.html](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4861/html/3_escaladepotenciales_estndar_de_reduccion.html)]

**Anexo 4**  
**Características de acero inoxidable 316**  
**Composición química**

<b>Acero inoxidable 316 LVM</b>		
<b>Carbono</b>	<b>(C)</b>	<b>0,02</b>
<b>Cromo</b>	<b>(Cr)</b>	<b>18,044</b>
<b>Níquel</b>	<b>(Ni)</b>	<b>14,012</b>
<b>Manganeso</b>	<b>(Mn)</b>	<b>1,849</b>
<b>Molibdeno</b>	<b>(Mo)</b>	<b>2,859</b>
<b>Vanadio</b>	<b>(V)</b>	<b>0,01</b>
<b>Azufre</b>	<b>(S)</b>	<b>0,963</b>
<b>Silicio</b>	<b>(Si)</b>	<b>0,518</b>
<b>Fósforo</b>	<b>(P)</b>	<b>0,078</b>

*Tomada de Acero.<sup>35</sup>*

**Anexo 5**  
**Composición química del acero inoxidable según la norma EN 10088-2**

	Grado	Contenido de los elementos de la aleación (valor máximo o rango permitidos) peso %				
		C	Cr	Ni	Mo	Otros
Aceros inoxidables Austeníticos	1.4301	0,07	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4307	0,03	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4401	0,07	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4404	0,03	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4541	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0		Ti: 5xC – 0,7 <sup>(1)</sup>
	1.4571	0,08	16,5 – 18,5	10,5 – 13,5	2,0 – 2,5	Ti: 5xC – 0,7 <sup>(1)</sup>
	1.4318	0,03	16,5 – 18,5	6,0 - 8,0		N: 0,1 – 0,2
Aceros dúplex	1.4362	0,03	22,0 – 24,0	3,5 – 5,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2
	1.4462	0,03	21,0 – 23,0	4,5 – 6,5	2,5 – 3,5	N: 0,1 – 0,22

*Tomada de Manual de diseño para acero inoxidable (26)*

<sup>35</sup> Composición del acero 316. "Seielo". Disponible en:  
[\[https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052017000100095\]](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052017000100095)



## Anexo 6

### Energía interna de los gases $U$ (en MJ/kmol)

Temperatura, °C	Aire	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (atmosférico)	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	H <sub>2</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0
100	2,015	2,123	2,072	2,081	2,541	2,085	2,064
200	4,195	4,325	4,163	4,147	5,162	4,199	4,153
300	6,364	6,628	6,293	6,293	7,879	6,360	6,242
400	8,591	9,027	8,474	8,474	10,710	8,591	8,348
500	10,890	11,509	10,726	10,726	13,657	10,790	10,467
600	13,255	14,068	13,038	13,038	16,726	13,268	12,802
700	15,684	16,684	15,420	15,420	19,933	15,705	14,767
800	18,171	19,347	17,857	17,857	23,262	18,204	16,965
900	20,708	22,060	20,348	20,348	26,724	20,754	19,201
1000	23,283	24,803	22,881	22,881	30,304	23,350	21,474
1100	25,899	27,578	25,456	25,456	34,001	25,983	23,793
1200	28,554	30,379	28,068	28,068	37,811	28,654	26,152
1300	31,238	33,211	30,714	30,714	41,724	31,366	28,562
1400	33,951	36,085	33,385	33,385	45,720	34,072	31,011
1500	36,689	38,950	36,086	36,086	49,823	36,814	33,498
1600	39,444	41,855	38,799	38,799	53,958	39,578	36,023
1700	42,203	44,799	41,537	41,537	58,238	42,370	38,585
1800	45,008	47,729	44,296	44,296	62,551	45,175	41,177
1900	47,813	50,702	47,059	47,059	66,947	47,981	43,794
2000	50,660	53,716	49,823	49,823	71,343	50,786	46,473
2100	53,507	56,731	52,628	52,628	75,775	53,633	49,153
2200	56,354	59,787	55,433	55,433	80,238	56,480	51,879
2300	59,201	62,844	58,200	58,200	84,726	59,327	54,596
2400	62,090	65,942	61,085	61,085	89,245	62,174	57,359
2500	64,979	69,040	63,890	63,890	93,797	65,063	60,164

Tomada de Energía interna del aire y de los gases al quemar combustible (22) (p. 66)

## Anexo 7

### Calor específico molar medio de los gases $\mu c_v$ a $V = \text{const.}$ (en kJ/kmol °C)

Temperatura, °C	Aire	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (atmosférico)	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	H <sub>2</sub>
0 1)	20,758	20,950	20,704	27,545	25,184	20,808	20,302
100	20,838	21,223	20,733	29,797	25,426	20,803	20,620
200	20,984	21,616	20,800	31,744	25,803	20,888	20,758
300	21,206	22,085	20,972	33,440	26,260	21,202	20,868
400	21,474	22,503	21,185	34,935	26,775	21,474	20,871
500	21,780	23,019	21,449	36,258	27,315	21,784	20,934
600	22,090	23,446	21,729	37,438	27,880	22,110	21,001
700	22,408	23,834	22,027	38,498	28,474	22,437	21,093
800	22,713	24,187	22,320	39,448	29,077	22,755	21,202
900	23,006	24,510	22,609	40,302	29,693	23,061	21,332
1000	23,283	24,803	22,881	41,077	30,304	23,350	21,474
1100	23,547	25,071	23,140	41,784	30,901	23,622	21,629
1200	23,794	25,318	23,392	42,425	31,510	23,877	21,792
1300	24,018	25,548	23,620	43,007	32,092	24,112	21,972
1400	24,250	25,761	23,848	43,543	32,661	24,338	22,152
1500	24,459	25,967	24,057	44,033	33,210	24,543	22,332
1600	24,652	26,159	24,250	44,485	33,741	24,736	22,517
1700	24,863	26,343	24,434	44,903	34,261	24,916	22,697
1800	25,063	26,519	24,602	45,299	34,755	25,087	22,877
1900	25,167	26,691	24,765	45,644	35,224	25,246	23,057
2000	25,326	26,854	24,916	45,975	35,680	25,393	23,233
2100	25,474	27,013	25,062	46,281	36,120	25,535	23,408
2200	25,611	27,168	25,200	46,566	36,538	25,665	23,576
2300	25,745	27,319	25,326	46,829	36,940	25,791	23,743
2400	25,870	27,470	25,447	47,076	37,330	25,908	23,907
2500	25,992	27,612	25,560	47,302	37,702	26,021	24,070

Tomada de Calor específico del aire, de sus mezclas con gases residuales (22) (p. 65)



## Anexo 8

### Energía interna de los productos de combustión $U$ (en MJ/kmol)

Temperatura, °C	Gasolina, siendo $\alpha$ igual a			
	1,0	0,9	0,8	0,7
0	0	0	0	0
100	2,2530	2,2045	2,1881	2,1685
200	4,5766	4,5352	4,4867	4,4285
300	6,3969	6,3165	6,2337	6,1344
400	9,4881	9,3842	9,2584	9,1123
500	12,0740	11,9386	11,7688	11,5713
600	14,7500	14,5759	14,3590	14,1057
700	17,5130	17,2989	17,0422	16,7202
800	20,3090	20,0938	18,7753	19,4024
900	23,2600	22,9688	22,5870	22,1510
1000	26,2262	25,8806	25,4548	24,9534
1100	29,2490	28,8560	28,3743	27,7968
1200	32,3250	31,8871	31,3476	30,7140
1300	35,4430	34,9565	34,3598	33,6586
1400	38,6010	38,0531	37,4129	36,6433
1500	41,8760	41,1969	40,4990	39,6603
1600	45,0140	44,3680	43,6125	42,7048
1700	48,2080	47,5716	46,7580	45,7802
1800	51,5370	50,7924	49,9207	48,8732
1900	54,8350	55,0398	53,1101	51,9929
2000	58,1500	57,3052	56,3174	55,1298
2100	61,4910	60,5947	59,5484	58,2851
2200	64,8460	63,9001	62,7955	61,4671
2300	68,2080	67,2127	66,0498	64,6528
2400	71,5880	70,5432	69,3228	67,8557
2500	74,9760	73,8820	72,6038	71,0678

Tomada de Energía interna del aire y de los gases (22) (p. 67)

## Anexo 9

### Coefficientes A y B

VALORES DE LOS COEFICIENTES A y B  
PARA DIFERENTES TIPOS DE MOTORES

Tipo de motor	A	B	Tipo de motor	A	B
De encendido por chispa:			Diésel: Con cabeza de combustión separada	0.105	0.0138
$S/D > 1$	0.05	0.0155	Con camada de combustión separadas y no separadas	0.105	0.012
$S/D < 1$	0.04	0.0135			

Tomada de Coeficientes A y B para determinar las pérdidas mecánica (22) (p. 212)

## Anexo 10

### Rendimientos y gastos

#### RENDIMIENTO MECANICO Y LA PRESION MEDIA EFICAZ

Motores	$\eta_m$	$P_{me}$
De cuatro tiempos de carburador	0.7-0.85	0.6-0.95
De cuatro tiempos Diesel	0.7-0.82	0.55-0.85
A gas	0.75-0.85	0.5-0.75
De cuatro tiempos Diesel sobrealimentado:	0.8-0.9	0.7-2-0
De dos tiempos Diesel rapidos	0.7-0.85	0.4-0.75

#### GASTOS ESPECIFICOS DE COMBUSTIBLES Y RENDIMIENTOS

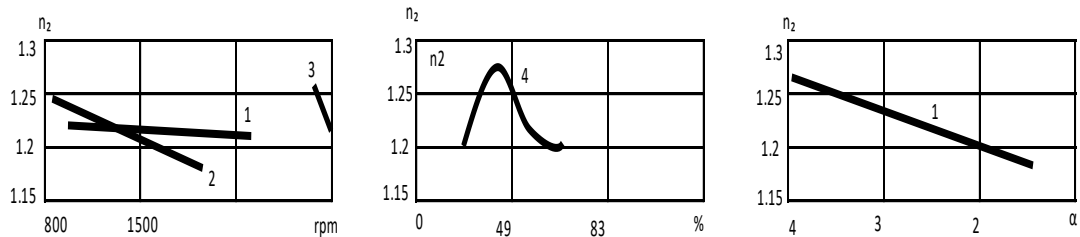
Motores	$\eta_i$	$\eta_e$	$g_i$ (g/kW.h)	$g_e$ (g/kW.h)
Carburador, automovil	0.28-0.39	0.25-0.33	245-300	300-325
Diesel rapidos	0.42-0.48	0.35-0.40	175-205	217-238
A gas	0.28-0.33	0.23-0.28	--	--

*Tomada de Índices de ciclo de trabajo (22) (p. 179)*

## Anexo 11

### Rendimientos y gastos

#### VARIACION DE EXPONENTE POLITROPICO DE EXPACION $n_2$ EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DE ROTACION Y DE LA CARGA



- |                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| 1. Motor diésel rápido  | 2. Motor Diésel YaMz |
| 3. Motor carburador zIL | 4. Motor carburador  |

#### PRAMETROS DEL PROCESO DE EXPANSION PARA MOTORES DE CUATRO Y DOS TIEMPOS PARA LA CARGA NOMINAL

	$n_2$	$P_b$	$T_b$ K
Motor de carburador	1.23-1.30	0.35-0.50	1200-1500
Motor diésel	1.18-1.28	0.20-0.40	1000-1200

*Tomada de Exponente politrópico de expansión (22) (pp. 160, 161)*

## Anexo 12

### Parámetros del proceso de compresión

*PRAMETROS DEL PROCESO DE COMPRESION EN LOS MOTORES DE AUTOMOVILES Y TRACTORES*

Parámetros	Motor a gasolina y gas	Motores Diésel rápidos sin sobrealimentación
<i>Relación de compresión <math>r</math></i>	6-9 (hasta 11)	<b>15-22</b>
<i>Exponente poli trópico media de compresión <math>n_1</math></i>	1.30-1.37	1.32-1.40
<i>Presión al final de la compresión <math>P_c</math></i>	0.90-1.50	3.50-5.50
<i>Temperatura al final de la compresión <math>T_b, K</math></i>	55-750	700-900

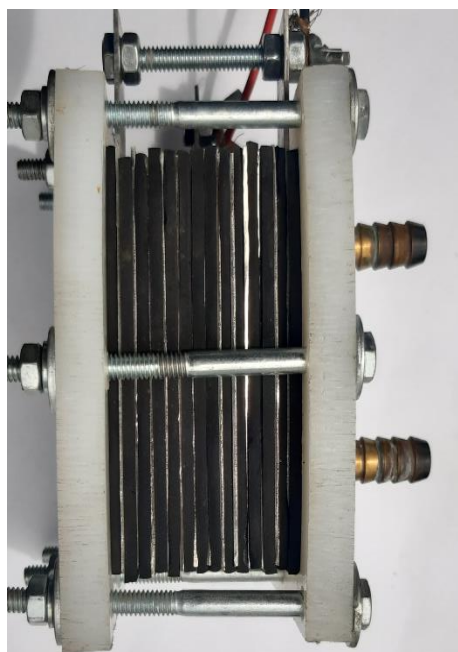
**Tomada de Movimiento de la mezcla en el proceso de compresión (22) (p. 118)**

## Anexo 13

### Ficha técnica del generador

# ESPECIFICACIONES TECNICAS

## IMAGEN



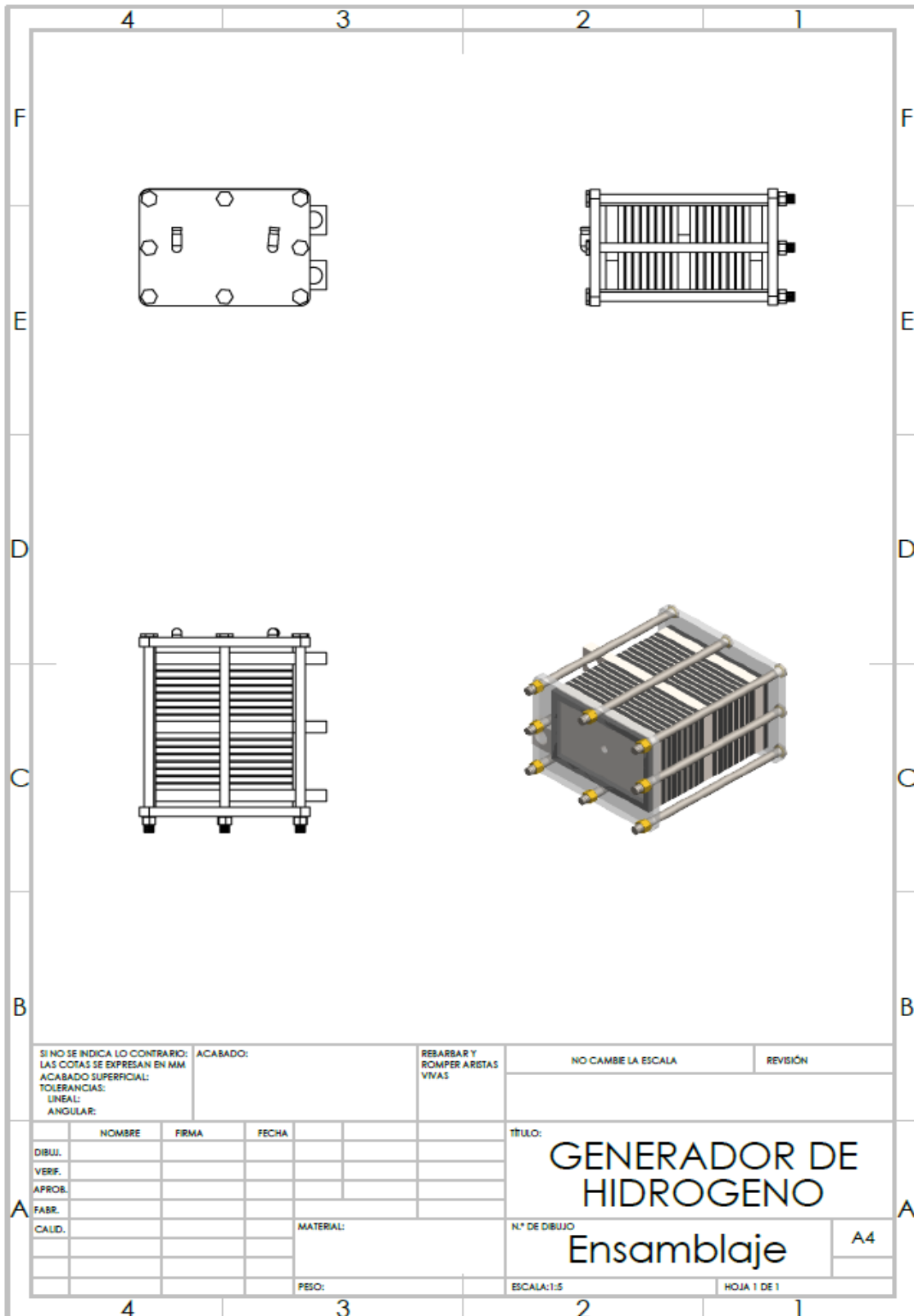
## DATOS TECNICOS

<i>Peso vacío</i>	<b>2068g</b>
<i>Peso lleno</i>	<b>2208g</b>
<i>Ancho total</i>	<b>11.5cm</b>
<i>Largo total</i>	<b>13cm</b>
<i>Altura total</i>	<b>14cm</b>

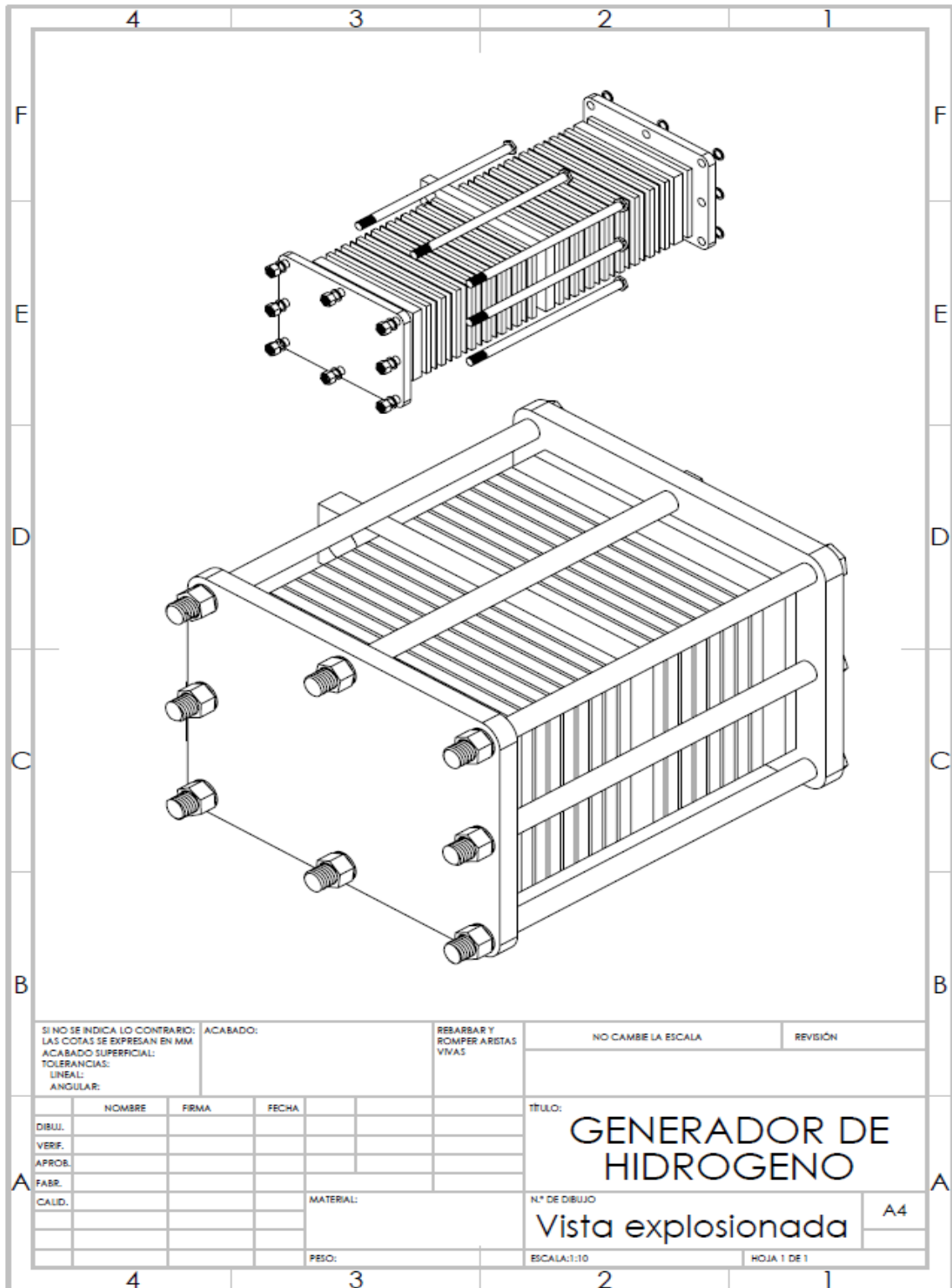
<i>Largo de tapas</i>	<b>13cm</b>
<i>Ancho de tapas</i>	<b>10.8cm</b>
<i>Altura de tapas</i>	<b>1.25cm</b>
<i>Largo de electrodo</i>	<b>10cm</b>
<i>Ancho de electrodo</i>	<b>8cm</b>
<i>Altura del electrodo</i>	<b>0.15cm</b>
<i>Largo de la junta</i>	<b>10cm</b>
<i>Ancho de la junta</i>	<b>8.15cm</b>
<i>Altura de la junta</i>	<b>0.3cm</b>
<i>Distancia entre electrodos</i>	<b>2.5cm</b>
<i>Distancia entre tapas</i>	<b>5.5cm</b>
<i>Altura de los racores</i>	<b>3.7cm</b>
<i>Diámetro de pernos</i>	<b>1/4pulg</b>
<i>Largo de pernos</i>	<b>3 5/8 pulg.</b>
<i>Capacidad electrolito</i>	<b>140mL</b>
<i>Diámetro de tubos de salida</i>	<b>13mm</b>
<i>Tensión de funcionamiento</i>	<b>12.5V</b>
<i>Corriente de funcionamiento</i>	<b>10A</b>
<i>Electrolito recomendado</i>	<b>NaOH</b>
<i>Cantidad de electrolito</i>	<b>20%</b>
<i>Temperatura de trabajo</i>	<b>15-35°C</b>

**Anexo 14**  
**PLANOS**

## Ensamblaje completo del generador de hidrógeno



## Vista explosionada del generador de hidrógeno



## Electrodo o chapa del generador de hidrógeno

4	3	2	1															
F	E	D	C															
B			A															
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS															
		NO CAMBE LA ESCALA	REVISIÓN															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 15%;">NOMBRE</th> <th style="width: 15%;">FIRMA</th> <th style="width: 15%;">FECHA</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		NOMBRE	FIRMA	FECHA													TÍTULO: <h1 style="text-align: center; margin: 0;">GENERADOR DE HIDROGENO</h1>	
NOMBRE	FIRMA	FECHA																
CALID.		MATERIAL:	Nº DE DIBUJO															
			Electrodo															
		PESO:	ESCALA: 1:2															
			HOJA 1 DE 1															
4	3	2	1															



## Junta del generador de hidrógeno

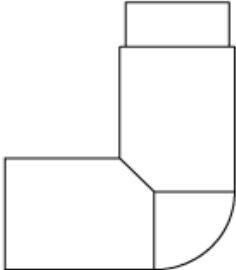
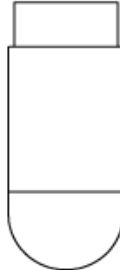
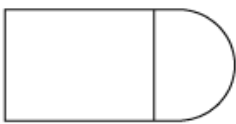

4	3	2	1
F			F
E			E
D			D
C			C
B			B
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
		NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			
		MATERIAL:	PESO:
		ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
4	3	2	1

GENERADOR DE  
 HIDROGENO

Junta

A4

## Codos del generador de hidrógeno

4	3	2	1		
F			F		
E			E		
D			D		
C			C		
B			B		
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO: <h1 style="margin: 0;">GENERADOR DE HIDROGENO</h1>	
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4
			PESO:	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1
4	3	2	1	A	A

## Pernos del generador de hidrógeno

4	3	2	1
F			F
E			E
D			D
C			C
B			B
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:  REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBE LA ESCALA  REVISIÓN
DIBUJ. VERIF. APROB. FABR. CALID.	NOMBRE FIRMA FECHA	MATERIAL:  PESO:	TÍTULO: <h1 style="text-align: center; margin: 0;">GENERADOR DE HIDROGENO</h1> N.º DE DIBUJO <h2 style="text-align: center; margin: 0;">Perno</h2> A4
ESCALA: 1:5 HOJA 1 DE 1			
4	3	2	1

## Tapa trasera del generador de hidrógeno

4	3	2	1
F			F
E			E
D			D
C			C
B			B
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
		NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			
		MATERIAL:	
		PESO:	
<b>GENERADOR DE HIDROGENO</b>		TÍTULO:	
<b>Tapa trasera</b>		N.º DE DIBUJO	A4
		ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
4	3	2	1
A			A

## Tapa delantera del generador de hidrógeno

4	3	2	1
F			F
E			E
D			D
C			C
B			B
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO: RESARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			MATERIAL:
			PESO:
<b>GENERADOR DE HIDROGENO</b>		TÍTULO:	
		<b>Tapa delantera</b>	
		N.º DE DIBUJO	A4
		ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1
4	3	2	1