

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**Propuesta de un sistema dual de alimentación con oxihidrogeno  
y gasolina en un motor de combustión interna**

**PRESENTAN POR:**

**ELIAS MARTINEZ MARTINEZ**

**JEFFREY RAFAEL CASTELLANO RIVAS**

**PARA OPTAR AL TITULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2010**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR:**

**MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

**SECRETARIO GENERAL:**

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO:**

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**SECRETARIO:**

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DIRECTOR:**

**ING. JUAN ANTONIO FLORES DÍAZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título:

**Propuesta de un sistema dual de alimentación con oxihidrogeno  
y gasolina en un motor de combustión interna**

Presentado por:

ELIAS MARTINEZ MARTINEZ

JEFFREY RAFAEL CASTELLANO RIVAS

Docentes Directores:

**ING. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES**

**ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ**

San Salvador, Septiembre de 2010

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**ING. FRANCISCO ALFREDO DELEÓN TORRES**

**ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ**

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, mi refugio y fortaleza. Mi madre el hombro más fuerte en el que me he apoyado, mi orgullo más grande y ejemplo de lucha.

Mis amigos, mis compañeros, a quienes en su momento me apoyaron y me impulsaron a no retroceder.

Al personal docente de la Escuela de Ingeniería mecánica por mi formación en la carrera y su amistad.

Y a todos mis compañeros y amigos de la ASEIM por haberme permitido sentirme como en una familia.

Elías Martínez Martínez

A dios, q ha sido mi refugio, en los momentos de duda y de debilidad, el cual no me ha dejado caer, y en cuyas manos puse mi carrera.

A mi madre, a quien le debo toda mi carrera, la autora de todos mis triunfos y mi vida entera, a la cual le debo todos mis éxitos.

Jeffrey Rafael Castellano Rivas

## INDICE

INTRODUCCION .....	1
OBJETIVO GENERAL .....	4
OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	4
ALCANCES.....	5
1. ANTECEDENTES.....	6
1.1  DESCUBRIMIENTO DEL ATOMO DE HIDROGENO .....	6
1.1.1  NOMENCLATURA .....	7
1.2  UTILIZACION DEL HIDROGENO COMO VECTOR ENERGETICO .....	7
2. MARCO TEORICO.....	9
2.1  CONCEPTOS DE QUIMICAS .....	9
2.1.1  MATERIA.....	9
2.1.2  ÁTOMOS.....	10
2.1.3  MOLÉCULAS .....	11
2.1.4  SUSTANCIAS SIMPLES Y COMPUESTAS.....	11
2.1.5  PROPIEDADES EXTENSIVAS E INTESIVAS .....	12
2.1.6  ESTADOS DE LA MATERIA .....	13
2.1.7  ELEMENTOS QUÍMICOS. TABLA PERIÓDICA.....	14
2.1.8  ESTRUCTURA ATÓMICA Y MOLECULAR, CONFIGURACIÓN ELECTRÓNICA .....	15
2.1.9  REACCIONES QUÍMICAS .....	17
2.1.10  CLASIFICACIÓN DE LAS REACCIONES.....	18
2.1.11  BALANCE DE MASA Y CARGA .....	18
2.1.12  UNIONES QUÍMICAS: IÓNICA, COVALENTE, METÁLICA. PUENTE HIDRÓGENO .....	19
2.1.13  PESO ATÓMICO Y MOLECULAR.....	24
2.1.14  NÚMERO DE AVOGADRO .....	25
2.2  LA CORRIENTE ELECTRICA .....	26
2.2.1  ¿QUÉ ES LA ELECTRICIDAD?.....	26
2.2.2  ¿CÓMO SE PRODUCE LA ELECTRICIDAD?.....	28

2.2.3	MAGNITUDES ELÉCTRICAS .....	30
2.2.4	LEY DE OHM .....	33
2.2.5	POTENCIA Y ENERGÍA ELÉCTRICA .....	33
2.2.6	CONCEPTO DE ONDA. ....	34
2.2.6.1	MOVIMIENTO ONDULATORIO .....	34
2.2.7	ESPECTRO RADIO - ELÉCTRICO O ELECTROMAGNÉTICO. ....	36
2.3	CONCEPTOS DE TERMODINAMICA .....	39
2.3.1	CONCEPTOS BÁSICOS.....	40
2.3.2	TRABAJO MECÁNICO HECHO POR O SOBRE EL SISTEMA. ....	41
2.3.3	EL CALOR .....	42
2.3.4	PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA .....	43
2.3.5	TRANSFORMACIONES .....	44
2.4	EL HIDROGENO .....	48
2.4.1	EL HIDRÓGENO EN LA NATURALEZA.....	48
2.4.2	NIVELES ENERGÉTICOS ELECTRÓNICOS .....	48
2.4.3	ISÓTOPOS DEL HIDRÓGENO. ....	49
2.4.4	FORMAS ELEMENTALES MOLECULARES .....	51
2.4.5	PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO. ....	52
2.4.6	MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE HIDRÓGENO.....	54
2.4.7	SÍNTESIS INDUSTRIAL DEL HIDRÓGENO. ....	55
2.5	ELECTROLISIS .....	56
2.5.1	ELECTRÓLISIS DEL AGUA. ....	57
2.5.2	TIPOS DE ELECTROLIZADORES .....	59
2.6	ANÁLISIS ENERGÉTICO EN LA ELECTROLISIS .....	60
2.6.1	LAS LEYES DE FARADAY DE LA ELECTRÓLISIS .....	60
2.6.2	ENFOQUE TERMODINAMICO.....	64
2.6.2.1	PROCESOS IRREVERSIBLES .....	66
2.6.2.2	CRITERIO DE GIBBS .....	67
2.6.3	EXERGÍA .....	68
2.6.3.1	BALANCE DE EXERGÍA EN SISTEMAS ABIERTOS .....	70
2.6.3.2	CRITERIOS DE EFICIENCIA UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS DE EXERGÍA 74	
3.	BANCO DE ELECTROLIZADORES .....	77

3.1	PRIMER PROTOTIPO.....	80
3.1.1	EL ELECTROLITO.....	85
3.1.2	CONDICIONES DE LAS PLATINAS.....	87
3.1.3	LIMITES DE OPERACIÓN.....	89
3.2	SEGUNDO PROTOTIPO.....	90
3.2.1	DETALLES DEL CUERPO DEL ELECTROLIZADOR.....	91
3.2.2	CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	95
3.3	TERCER PROTOTIPO.....	96
3.3.1	DIFERENTES ARREGLOS DE LOS ELECTRODOS.....	100
3.3.2	SOLUCIONES AL PROBLEMA DEL CALENTAMIENTO.....	103
3.3.3	FACTORES QUE AUMENTAN LAS PERDIDAS.....	105
3.4	CUARTO PROTOTIPO.....	107
3.4.1	CONSTRUCCIÓN.....	108
3.4.2	EL ARREGLO ELÉCTRICO.....	110
3.5	QUINTO PROTOTIPO.....	115
3.5.1	CONDICIONES DE PREPARACIÓN DE LAS PLATINAS.....	123
3.6	SEXTO PROTOTIPO.....	126
3.6.1	LA CONSTRUCCIÓN DE LA CAJA.....	132
3.6.2	OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS PLACAS.....	135
3.6.3	LA OPERACIÓN DE LA CÉLULA.....	137
3.6.4	LÍMITES DE POTENCIA.....	142
4.	ELECCIÓN DEL ELECTROLIZADOR.....	144
4.1	ANÁLISIS DE PARAMETROS.....	145
4.2	PARAMETROS A CONSIDERAR EN UNA CELDA ELECTROLITICA.....	150
4.2.1	VOLTAJE.....	150
4.2.2	EFICIENCIA DE POTENCIAL.....	152
4.2.3	INTENSIDAD.....	152
4.2.4	EFICIENCIA DE CORRIENTE.....	153
4.2.5	CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	154
4.2.6	CONSUMO ESPECIFICO DE ENERGIA.....	155
4.3	FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR.....	155
4.3.1	CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO.....	156



4.3.2	METALOGRAFÍA Y OXIDACIÓN .....	158
4.3.3	CHISPA DE RESIDUOS .....	159
4.4	CONSIDERACIONES CON EL SENSOR DE OXIGENO .....	162
4.4.1	CONEXIÓN FÍSICA DEL SENSOR .....	165
4.4.2	DETALLE MÁS ESPECÍFICO .....	168
4.4.3	ENSAYO EN EL MOTOR .....	169
4.4.4	INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR .....	170
4.4.5	CONEXIÓN FÍSICA .....	171
4.5	CUESTIONES PRÁCTICAS EN LAS TRAMPAS DE CONDENSADO .....	173
4.6	LÍMITES DE TAMAÑO DE MOTOR .....	175
4.7	TASA DE MEDICIÓN DE GAS DE SALIDA .....	175
4.8	APLICACIONES FIJAS .....	176
4.9	MANEJOS SEGURO DEL OXIHIDROGENO .....	177
4.9.1	NORMALIZACION ISO TC 197 .....	178
4.9.2	GENERALIDADES DE LA NORMATIVA ISO/ TC 197 .....	179
4.9.3	CARACTERÍSTICAS A TOMAR EN CUENTA PARA EL MANEJO DE HIDROGENO .....	183
5.	CONCLUSIONES GENERALES .....	186
6.	PROPUESTAS DE INVESTIGACION .....	187
6.1	OTRAS PROPUESTAS .....	187
	BIBLIOGRAFIA .....	188
	REFERENCIAS .....	189
	CONSULTAS WEB .....	190

## INTRODUCCION

Una de las primeras experiencias de generación de Hidrógeno data del siglo XIX y corresponde a uno de los padres de la química actual, Antoine Laurent de Lavoiser, que fue capaz de su producción a partir de la disociación de la molécula del agua.

Los primeros acercamientos en el desarrollo de los motores funcionando con hidrogeno datan de 1820 con las investigaciones del Reverendo W. Cecil quien desarrollo un motor que trabajaba con el principio de vacio utilizando hidrogeno como combustible. Años más tarde en el periodo de desarrollo del motor de combustión interna (1860-1870), N. A. Otto reporta haber utilizado un gas sintético como combustible el cual probablemente era una mezcla de hidrogeno con proporciones arriba del 50%.

Así llegamos hasta antecedentes más cercanos con la utilización del hidrogeno como combustible en el programa espacial en donde, por sus grandes bondades, no ha encontrado rival.

Con el objetivo de aliviar la contaminación ambiental producida por la combustión de hidrocarburos, al comienzo de la década de 1970 se empezaron a desarrollar tecnologías de fabricación de hidrógeno en Estados Unidos, Alemania, Japón y Suecia.

El hidrógeno es considerado como la opción de futuro para sustituir al petróleo como fuente principal de energía, tanto en el campo de la automoción como en cualquier otro. Es un hecho que la mayor parte del combustible de origen fósil se emplea en el campo de la automoción y transporte, con lo que una gran parte de la contaminación es generada por vehículos.

Por lo tanto en el presente trabajo presentamos como base teórica aspectos relacionados a la electricidad, química, termodinámica y características propias del hidrogeno como elemento; como combustible y como el producto de un proceso de transformación, siendo el de nuestro interés 'la electrolisis'.

Continuamos con unas propuestas de electrolizadores, poniendo sus características constructivas y posibilidades de funcionamiento para producir el gas de nuestro interés 'oxihidrogeno'.

Todo lo anterior nos permite abordar como seria la dinámica de funcionamiento del electrolizador aportando oxihidrogeno a un motor de combustión interna y como reaccionaria dicho motor con una mezcla de gasolina y oxihidrogeno es decir un sistema dual de alimentación de combustible.

¿Qué es lo que van a quemar en lugar de carbón?  
Agua, respondió Pencroft. El agua, descompuesta  
en sus elementos por la electricidad. Sí, amigos  
míos, creo que algún día se empleará el agua como  
combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los  
que está formada, usados por separado o de forma  
conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de  
luz y calor.

El agua será el carbón del futuro.

Julio Verne

“La isla misteriosa” (1874)

## **OBJETIVO GENERAL**

PROPUESTA Y EVALUACIÓN DE MECANISMOS PARA LA PRODUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DE OXIHIDRÓGENO PARA USO EXPERIMENTAL.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- PROPONER DIFERENTES PROTOTIPOS DE OBTENCIÓN DE OXIHIDRÓGENO.
  
- COMPARAR EFICIENCIAS ENTRE LOS DIFERENTES EQUIPOS PROPUESTOS PARA PRODUCIR OXIHIDRÓGENO
  
- COMPARAR VERSATILIDAD DE LOS HIDROLIZADORES PARA RECOMENDAR UN PROTOTIPO.
  
- PROPONER UNA FORMA MEDIANTE LA CUAL PODRÍA SER SUMINISTRADO EL OXIHIDROGENO A LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

## ALCANCES

- CARACTERIZAR TÉCNICAMENTE EL ELECTROLIZADOR ÓPTIMO DE UNA SERIE DE ELLOS PARA UNA APLICACIÓN EN ESPECÍFICA
- RECOMENDAR ACERCA DEL MANEJO, ALMACENAMIENTO Y SEGURIDAD DEL OXIHIDRÓGENO
- DAR PROPUESTAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES EN EL CAMPO DE LA UTILIZACIÓN DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE ALTERNA DE ENERGÍA

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1 DESCUBRIMIENTO DEL ATOMO DE HIDROGENO

Uno de los principales motores del desarrollo de la Química en el siglo XVIII fue el interés por el aire en particular y por los gases en general. Surge así lo que se denomina Química Neumática que permitió desvelar el misterio de la composición del aire, así como el descubrimiento de sustancias gaseosas sumamente importantes.

El aire había sido considerado como un elemento químico hasta la época moderna. Se le consideraba homogéneo e inerte, o sea, que no participaba en las reacciones químicas, premisa en la que se fundamenta la teoría del flogisto.

Todos los gases conocidos hasta entonces eran "aires" ya que se suponía que el aire podía estar contaminado por vapores y olores que lo impurificaban temporalmente.

En el siglo XVIII los gases pasan a tener una entidad propia y diferenciada, como los sólidos y los líquidos, y planteaban su desafío a los químicos. Muchos de ellos dedicaron sus esfuerzos a dilucidarlos.

En la Antigüedad fueron conocidos siete elementos metálicos (oro, plata, hierro, cobre, estaño, plomo y mercurio) y dos no metales (carbono y azufre); el esfuerzo de la alquimia medieval sumó el conocimiento de otros cinco (arsénico, antimonio, bismuto, zinc y fósforo).

Ya en el siglo XVI se había observado por parte de los alquimistas que cuando el aceite de vitriolo (nombre que éstos daban al ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ ) actuaba sobre las limaduras de hierro se desprendía un gas combustible de naturaleza desconocida.

El hidrógeno diatómico gaseoso,  $H_2$ , fue formalmente descrito por primera vez por T. Von Hohenheim (más conocido como Paracelso, 1493 - 1541) que lo obtuvo artificialmente mezclando metales con ácidos fuertes. Paracelso no era consciente de que el gas inflamable

generado en estas reacciones químicas estaba compuesto por un nuevo elemento químico. En 1671, Robert Boyle redescubrió y describió la reacción que se producía entre limaduras de hierro y ácidos diluidos, y que generaba hidrógeno gaseoso.

En 1766, Henry Cavendish fue el primero en reconocer el hidrógeno gaseoso como una sustancia discreta, identificando el gas producido en la reacción metal - ácido como "aire inflamable" y descubriendo que la combustión del gas generaba agua. Cavendish tropezó con el hidrógeno cuando experimentaba con ácidos y mercurio. Aunque asumió erróneamente que el hidrógeno era un componente liberado por el mercurio y no por el ácido, fue capaz de describir con precisión varias propiedades fundamentales del hidrógeno. Tradicionalmente, se considera a Cavendish el descubridor de este elemento.

En 1783, Antoine Lavoisier dio al elemento el nombre de hidrógeno, cuando comprobó (junto a Laplace) el descubrimiento de Cavendish de que la combustión del gas generaba agua.

### 1.1.1 NOMENCLATURA

Hidrógeno, del latín "*hydrogenium*", y éste del griego antiguo *ὑδωρ* (*hydōr*): "agua" y *γενος-ου* (*genos*): "generador". "generador de agua"

La palabra hidrógeno puede referirse tanto al elemento atómico, como a la molécula diatómica ( $H_2$ ) que se encuentra en trazas en la atmósfera terrestre. Los químicos tienden a referirse a esta molécula como dihidrógeno, molécula de hidrógeno, o hidrógeno diatómico, para distinguirla del elemento.

## 1.2 UTILIZACION DEL HIDROGENO COMO VECTOR ENERGETICO

El consumo de energía ha estado asociado desde siempre con el hombre. Al igual que los animales, ha dependido de su propia energía para su subsistencia. Con el uso artificial del fuego empezó a diferenciarse de los animales.



Es tan importante el uso de la energía para la humanidad, que se mide el nivel de desarrollo de una nación por su consumo por habitante.

El mantenimiento de los estándares de vida en las sociedades modernas está ligado a los altos consumos de energía obtenida principalmente de fuentes agotables como son el petróleo, el carbón y el gas natural. Su uso no es sostenible en el tiempo por lo que se debe desacelerar su consumo y hallar nuevas fuentes. Desacelerar su consumo implica usarla eficientemente y hallar tecnologías que la demanden menos.

Por ejemplo en Estados Unidos con su altísimo nivel tecnológico el consumo de energía es asombroso ha reconocido el agotamiento de sus fuentes de energía tradicionales y despertado el interés político por economizar el recurso obligando a procesos más eficientes y buscar fuentes novedosas de suministro.

El hombre moderno asocia sus estándares de calidad de vida a los consumos de energía, mas consumo per cápita le significa un mayor escalón en el desarrollo y mejor calidad de vida. EE.UU. consume alrededor de un 25% de la energía mundial aunque solo tengan un 5% de la población mundial del planeta. Esto lo situaría en el primer lugar en desarrollo y calidad de vida.

La ciencia y la técnica harán que una fuente disponible sea aprovechable. El mundo no puede sostener los actuales niveles de consumo energético. La tecnología actual así es insostenible y se deben encontrar nuevas fuentes aprovechables y las tecnologías apropiadas para su aprovechamiento.

Los problemas de generación de energía se ven intrínsecamente ligados a la escasez de recursos naturales y los problemas ecológicos de contaminación que ocasionan los combustibles de origen fósil, por lo tanto se deben buscar nuevas fuentes de energía alternativa como es la utilización del hidrógeno como combustible ya que es inagotable y no contamina. Pero primero hay que sintetizarlo a partir del agua lo que significa un gran reto para la tecnología actual debido a que deben descubrirse formas eficientes para obtenerlo y su posterior utilización, es así como se debe pensar en que si bien su utilización no contamina no es así con su obtención, necesitando desarrollar paralelamente técnicas

de sintetización de hidrogeno con fuentes renovables como eólica, solar, geotérmica, hidráulica, etc.

El hidrógeno promete ser el "transporte de energía" perfecto: puede ser producido usando sólo electricidad y agua. Al ser utilizado como combustible de motores, ocupando el hidrogeno e inyectándolo en forma semejante a la gasolina, da como resultado de su combustión, agua y pequeñas cantidades de gases como ozono y nitrógeno. No se produce CO<sub>2</sub>, ni otro gas de invernadero. Se ha pensado en el hidrógeno como el combustible de los vehículos del futuro así como de equipos estacionarios, para evitar el aumento de la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1 CONCEPTOS DE QUIMICAS**

La Química es la ciencia que estudia la materia y sus transformaciones. La Física se ocupa de la energía y sus transformaciones. La Fisicoquímica abarca el estudio de las interacciones entre la materia y la energía, y explica los principios que rigen las transformaciones de la materia conocidas como reacciones químicas, mediante el estudio de las propiedades físicas de las sustancias y del efecto de los cambios físicos sobre las reacciones.

#### **2.1.1 MATERIA**

Materia es todo aquello que ocupa un lugar en el espacio y posee masa. Todos los sistemas materiales están formados por átomos y moléculas. Las moléculas son átomos unidos entre sí mediante enlaces químicos. A su vez, los átomos están constituidos por partículas consideradas indivisibles: protones, neutrones y electrones.

En los compuestos químicos se unen átomos de más de un elemento, para formar moléculas o bien para formar estructuras infinitas, como es el caso de los polímeros.

### 2.1.2 ÁTOMOS

Los átomos están constituidos por un núcleo central y electrones, de carga negativa, que giran alrededor de él. A su vez el núcleo está formado por protones, de carga positiva, y neutrones, que no poseen carga. El átomo es neutro, por lo tanto el número de protones es igual al número de electrones. En general la masa de un átomo es aproximadamente la masa del núcleo, pues la masa del electrón es 1840 veces menor que la masa del protón. La masa del neutrón es aproximadamente igual a la masa del protón.

En cuanto al tamaño del átomo, éste es más o menos 10,000 veces mayor que el tamaño del núcleo, por lo tanto casi todo es vacío. Cada elemento químico está caracterizado por el número de protones que tienen sus átomos. Este número se denomina número atómico Z.

Se denomina número másico a la suma de protones más neutrones, y se representa con la letra A.

Cuando un átomo pierde o gana electrones se convierte en un ión. Los iones positivos, denominados cationes, tienen defecto de electrones y los iones negativos, denominados aniones, tienen exceso de electrones.

**Tabla 2.1 Algunos elementos con su número atómico**

ELEMENTO	NUMERO ATOMICO
Hidrogeno	1
Oxigeno	8
Uranio	92
Helio	2

### 2.1.3 MOLÉCULAS

Cuando 2 o más átomos, de un mismo elemento o de elementos diferentes, se unen mediante uniones químicas se origina una molécula de un compuesto químico.

Ejemplos de moléculas son:

1. Ozono: formada por 3 átomos de oxígeno  $O_3$ .
2. Cloruro de sodio (sal de mesa): formada por un átomo de cloro y uno de sodio  $NaCl$ .
3. Amoníaco: formada por 3 átomos de hidrogeno y 1 de nitrógeno.

### 2.1.4 SUSTANCIAS SIMPLES Y COMPUESTAS

Se llama sistema material a todo cuerpo o conjunto de cuerpos seleccionado para la observación de acuerdo con ciertas finalidades. La química estudia estos sistemas materiales.

Los mismos se clasifican en:

1. Sistema homogéneo: aquel que tiene iguales valores para todas sus propiedades intensivas en las distintas partes del sistema. Ejemplos: azúcar disuelta en agua, alcohol y agua, acero.
2. Sistema heterogéneo: aquel que tiene distintos valores para alguna de las propiedades intensivas en distintas partes del sistema, y estas partes se encuentran separadas, unas de otras, por superficies de discontinuidad bien definidas. Ejemplos: agua y aceite, las nubes, espuma de jabón.
3. Sistema inhomogéneo: aquel en el cual los valores de las propiedades intensivas son distintos en distintas partes del sistema, pero estas partes no se encuentran separadas, unas de otras, por superficies de discontinuidad bien definidas. Ejemplos: aire, agua con agregado de una solución coloreada y sin agitar.

Los sistemas homogéneos pueden ser:

- a. Sustancias puras: aquellas que no pueden fraccionarse, sin perder sus propiedades intensivas. Ejemplos: agua, azúcar.
- b. Soluciones: aquellas que están formadas por más de una sustancia pura. Ejemplo: acero inoxidable.

A su vez las sustancias puras se clasifican en:

- I. Sustancias simples: que son los denominados elementos químicos. Ejemplos: hierro, carbono, que forman parte del acero.
- II. Sustancias compuestas: que son los compuestos químicos. Ejemplo: agua, cloruro de sodio.

Cuando una solución está constituida solo por 2 sustancias, aquella que está en menor cantidad se denomina soluto y la otra solvente.

En un sistema, se llama fase al conjunto de las partes del mismo que tiene iguales valores para sus propiedades intensivas y que se encuentran separadas, unas de otras, por superficies de discontinuidad bien definidas. Por lo tanto los sistemas homogéneos están siempre constituidos por una sola fase, y los sistemas heterogéneos por más de una fase.

### **2.1.5 PROPIEDADES EXTENSIVAS E INTENSIVAS**

Las propiedades de la materia pueden clasificarse en:

1. Extensivas: aquellas que dependen de la cantidad de materia considerada. El peso y el volumen son ejemplos de propiedades extensivas.

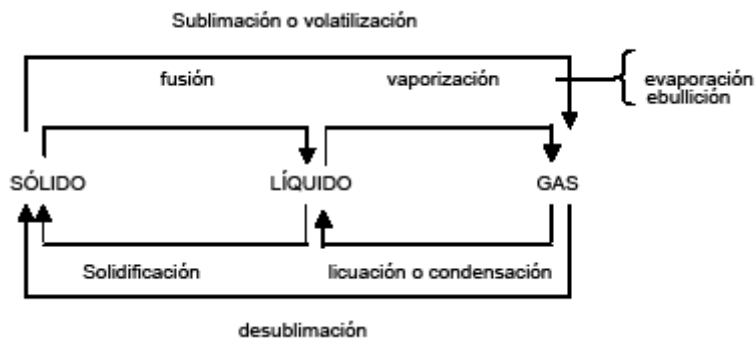
2. Intensivas: aquellas que no dependen de la cantidad de materia considerada.  
Ejemplos: la densidad, el punto de fusión, el punto de ebullición, el peso específico.

### 2.1.6 ESTADOS DE LA MATERIA

Existen 3 estados físicos de la materia, llamados también estados de agregación. Ellos son: sólido, líquido y gaseoso.

Por ejemplo la sustancia pura agua existe en los 3 estados: sólido (hielo), líquido y gaseoso (vapor de agua). El cambio de un estado a otro se denomina cambio de fase. Estos cambios de estado se ilustran en la figura 2.1

**Figura 2. 1 Cambios de fase del agua**



El fenómeno de vaporización puede producirse en dos formas:

1. Evaporación: solo desde la superficie libre del líquido y a cualquier temperatura,
2. Ebullición: desde todo el interior del líquido y a una temperatura dada, que depende del líquido y de la presión externa.

Las moléculas en estado sólido se mantienen juntas por medio de fuerzas eléctricas y no son libres. El volumen es fijo y la forma es rígida (cristales). Las moléculas en estado líquido se deslizan pero no son libres. El volumen es fijo pero la forma no es fija.

En estado gaseoso las moléculas se mueven libremente a enormes velocidades, hay caos. El volumen no es fijo y tampoco la forma.

### 2.1.7 ELEMENTOS QUÍMICOS. TABLA PERIÓDICA

Todos los elementos químicos están ordenados por orden creciente de número atómico  $Z$ , y en forma tal que refleja la estructura atómica, en una tabla denominada tabla periódica.

Los elementos están distribuidos en siete hileras horizontales, llamadas períodos, y en 18 columnas verticales, llamadas grupos. El primer período, que contiene dos elementos, el hidrógeno y el helio, y los dos períodos siguientes, cada uno con ocho elementos, se llaman períodos cortos.

Los períodos restantes, llamados períodos largos, contienen 18 elementos en el caso de los períodos 4 y 5, ó 32 elementos en el del período 6. El período largo 7 incluye el grupo de los actínidos, que ha sido completado sintetizando núcleos radiactivos más allá del elemento 92, el uranio.

El número del período indica la cantidad de capas que posee el átomo del elemento considerado.

Así, por ejemplo, el átomo de hidrógeno H que pertenece al período 1, tiene una única capa, el átomo de carbono C tiene 2 capas y el de cromo Cr tiene 4.

Las propiedades físicas y químicas de los elementos tienden a repetirse de forma sistemática conforme aumenta el número atómico  $Z$ . Todos los elementos de un grupo presentan una gran semejanza y, por lo general, difieren de los elementos de los demás

grupos. El radio atómico aumenta de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, en la tabla periódica, conforme aumenta el número atómico.

La electronegatividad de un elemento es una propiedad que resulta de la estructura de sus átomos. Permite explicar la naturaleza de las uniones químicas y se define como la capacidad del átomo para atraer electrones. En general, la electronegatividad aumenta de izquierda a derecha y disminuye de arriba hacia abajo. Por lo tanto los elementos situados a la derecha de la tabla, a excepción de los gases nobles (grupo 18), son electronegativos y los situados a la izquierda son electropositivos, pues tienden a ceder electrones. A la izquierda se encuentran los metales y a la derecha los no metales.

## 2.1.8 ESTRUCTURA ATÓMICA Y MOLECULAR, CONFIGURACIÓN ELECTRÓNICA

De acuerdo con la Mecánica Cuántica no es posible establecer, en un instante dado, la velocidad y la posición de un electrón en un átomo. Se habla de probabilidad de hallar a un electrón en un determinado lugar alrededor del núcleo.

Los electrones están dispuestos en capas o niveles que corresponden a zonas con mayor probabilidad de hallar al electrón. Al aumentar el número de electrones, conforme aumenta el  $Z$ , aumenta el número de niveles. Estas capas se denotan con las letras K, L, M, N, O, P, Q, y admiten un número máximo de electrones, dado por la expresión  $2n^2$ , siendo  $n$  el número de capa.

Así la K admite 2 electrones, la L 8, la M 18, la N 32.

Se llama orbital atómico a la función matemática  $\psi$  que es solución de la Ecuación de Schrödinger, tal que  $\psi^2$  da la probabilidad de encontrar un electrón en una zona del espacio alrededor del núcleo. Cada electrón está caracterizado por sus 4 números cuánticos:

$n = n^\circ$  cuántico principal

$m = n^\circ$  cuántico magnético



$l = n^\circ$  cuántico angular o azimutal                       $s = n^\circ$  cuántico de spin

Según el principio de exclusión de Pauli, 2 electrones no pueden tener los 4 números cuánticos iguales. Esto equivale a decir que un orbital atómico no admite más de 2 electrones.

La  $n$  indica el nivel o capa. Como cada capa admite un máximo de electrones, y no puede haber más de 2 electrones en un orbital, se deduce que al aumentar  $Z$  aumenta el número de orbitales por cada capa. Los valores que puede tomar  $n$  son números enteros: 1, 2, 3, 4, 5, etc.

El  $l$  está relacionado con el momento angular del electrón en su movimiento orbital alrededor del núcleo. Puede tomar valores desde 0 hasta  $(n - 1)$ . Por ejemplo si  $n = 2$ ,  $l$  puede valer 0 ó 1.

Cuando  $l$  vale 0 el orbital recibe el nombre “s”, cuando vale 1 se llama orbital “p”, cuando vale 2 se llama “d”, cuando vale 3 se llama “f” y así sucesivamente.

Cada uno de éstos orbitales está asociado con una representación de la densidad electrónica en el espacio alrededor del núcleo, relacionada con la probabilidad de encontrar al electrón.

El  $m$  está relacionado con las posibles orientaciones del vector momento angular en un campo magnético. Puede adoptar valores desde  $-l$  hasta  $+l$  pasando por el 0. Por ejemplo:  $-l, 0, +l$ .

El  $s$  (relacionado con el movimiento de rotación del electrón sobre su eje) puede valer  $+1/2$  o  $-1/2$  según el momento angular de spin que tenga un sentido u otro.

## 2.1.9 REACCIONES QUÍMICAS

Las reacciones químicas son fenómenos de transformación química de las sustancias en otras diferentes. En ellas intervienen los reactivos, que son las sustancias que reaccionan, y los productos de reacción, que son las sustancias que se obtienen.

Las reacciones se representan simbólicamente mediante ecuaciones químicas. Las sustancias se representan por medio de fórmulas químicas.

El agua está formada por 2 átomos de hidrógeno (H) y 1 de oxígeno (O), y su fórmula química es: H<sub>2</sub>O donde el subíndice 2 indica la cantidad de átomos de H.

La molécula de oxígeno se representa O<sub>2</sub>, y la de hidrógeno H<sub>2</sub>.

### REACCIONES

1. METAL + O<sub>2</sub> → ÓXIDO BÁSICO
2. NO METAL + O<sub>2</sub> → ÓXIDO ÁCIDO (ANHÍDRIDO)
3. ÓXIDO BÁSICO + H<sub>2</sub> O → HIDRÓXIDO (BASE)
4. ÓXIDO ÁCIDO + H<sub>2</sub> O → ÁCIDO (OXÁCIDO)
5. HALÓGENO + H<sub>2</sub> → ÁCIDO (HIDRÁCIDO)
6. METAL + H<sub>2</sub> → HIDRURO
7. ÁCIDO + HIDRÓXIDO → SAL + H<sub>2</sub> O

Ejemplos:

1. 2 Mg + O<sub>2</sub> → 2 MgO óxido de magnesio
2. C + O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> anhídrido carbónico
3. MgO + H<sub>2</sub> O → Mg (OH)<sub>2</sub> hidróxido de magnesio
4. CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> O → H<sub>2</sub> CO<sub>3</sub> ácido carbónico
5. Cl<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> → 2 HCl ácido clorhídrico
6. 2 Na + H<sub>2</sub> → 2 NaH hidruro de sodio
7. 2 HCl + Mg (OH)<sub>2</sub> → MgCl<sub>2</sub> + 2 H<sub>2</sub> O cloruro de magnesio

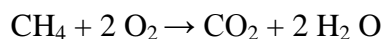
### 2.1.10 CLASIFICACIÓN DE LAS REACCIONES

1. Ácido-base: La última reacción (7) es un ejemplo de reacción ácido-base. Se llaman así porque existe un intercambio de protones  $H^+$  y oxhidrilos  $HO^-$ .
2. Óxido-reducción: son reacciones de transferencia de electrones. La reacción (1) es un ejemplo, donde el Mg pierde 2 electrones, se oxida, y el oxígeno gana 2 electrones, se reduce.
3. De precipitación: donde el producto de reacción es un sólido que precipita (tiende a decantar en el fondo del recipiente). Por ejemplo:  $NaCl + AgNO_3 \rightarrow AgCl \downarrow + NaNO_3$ .
4. De complejamiento: generalmente se obtiene con cationes de elementos situados en el centro de la tabla periódica, y aniones capaces de capturar el catión, formando una molécula o anión complejo muy estable. Ejemplos:  $Cu^{2+} + 4 Cl^- \rightarrow [CuCl_4]^{2-}$

### 2.1.11 BALANCE DE MASA Y CARGA

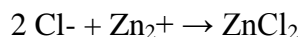
Durante las transformaciones químicas la cantidad de átomos de los elementos que intervienen no cambia. En otros términos, los átomos se reordenan para dar distintas sustancias, pero su cantidad no varía. Por lo tanto toda ecuación química debe estar equilibrada en masa, de manera que el número de átomos de cada elemento sea igual en ambos miembros de la ecuación.

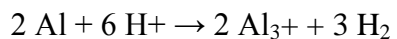
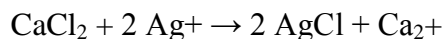
Por ejemplo, para la oxidación completa de 1 molécula de metano  $CH_4$ , se necesitan 2 moléculas de  $O_2$ :



Así, hay 1 C, 4 H y 4 O en ambos lados de la ecuación.

De forma similar, el resultado de la suma de las cargas (+ y -) debe ser el mismo en ambos lados, tal como se ilustra en los ejemplos siguientes:





En ésta última ecuación, el término de la izquierda tiene:

2 átomos de aluminio, 6 átomos de H y 6 cargas +, porque cada H está como protón (+), el término de la derecha tiene:

2 átomos de Al, 3 moléculas de H<sub>2</sub> (es decir 3 x 2 = 6 átomos de H), y 2 x 3 = 6 cargas positivas aportadas por el Al<sub>3</sub><sup>+</sup>.

Todas las ecuaciones están equilibradas en masa y carga.

## 2.1.12 UNIONES QUÍMICAS: IÓNICA, COVALENTE, METÁLICA. PUENTE HIDRÓGENO

### ➤ ESTADO DE OXIDACIÓN

El número de oxidación o estado de oxidación de un elemento en una especie química, es el número de electrones que un átomo de dicho elemento, pierde o gana (de acuerdo a su electronegatividad) en la unión química para formar la especie o sustancia.

El grupo de la tabla periódica al que pertenece un elemento indica el número de oxidación o valencia (como se lo conocía anteriormente) que generalmente tiene ese elemento, pero puede tener más de 1 estado de oxidación.

Por ejemplo, los elementos del grupo 1 (metales alcalinos) poseen 1 electrón en su última capa, por lo tanto es más fácil perder ese electrón en una unión química, que ganar 7 electrones para completar los 8 electrones (Regla del octete). En consecuencia, el estado de oxidación de los metales del grupo 1 es + 1, pues el átomo queda con un electrón menos.

Para los elementos del grupo 2 (metales alcalino-térreos), sucede lo mismo: pierden 2 electrones, y el estado de oxidación es + 2.

Los elementos del grupo 13 tienden a formar uniones con estado de oxidación +3.

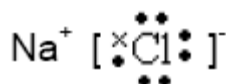
Para los elementos del grupo 14 es prácticamente similar ganar 4 electrones que perder 4, para completar el octete, por lo tanto el estado de oxidación puede ser +4 o -4, dependiendo de la electronegatividad del otro elemento que forma la unión. Así el C puede tener nº de oxidación +4 en la molécula de CO<sub>2</sub>, o -4 en el CH<sub>4</sub>.

Pero también debe tenerse presente que al aumentar el Z disminuye la electronegatividad por lo tanto los elementos más pesados del grupo 14 tienden a tener estado de oxidación +4, como es el caso del Sn.

### ➤ FÓRMULA DE LEWIS

Las sustancias pueden representarse por su fórmula electrónica conocida como Fórmula de Lewis. Por ejemplo, en el caso del cloruro de sodio es:

**Figura 2. 2 Formula de Lewis del cloruro de sodio**

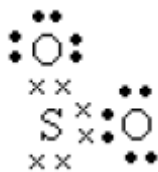


Donde el símbolo Na<sup>+</sup> representa al átomo de sodio con las capas de electrones completas pero que ha perdido 1 electrón. Del mismo modo, el símbolo Cl<sup>-</sup> representa el anión cloruro, que ha ganado un electrón.

Para este último se dibujan los 7 electrones de su última capa, con un punto, y el electrón capturado del sodio, con una x. De esta manera ambos iones tienen completo su octete, lo que implica estabilidad.

Otro ejemplo es la molécula de dióxido de azufre que se representa así:

**Figura 2. 3 Formula de Lewis de la molécula de dióxido de azufre**



Donde los puntos representan los electrones de la última capa del O, y las x representan los correspondientes al S. De esta manera ambos átomos tienen completo su octeto.

Los electrones se dibujan en pares para indicar que están “apareados, lo cual implica mayor “estabilidad”.

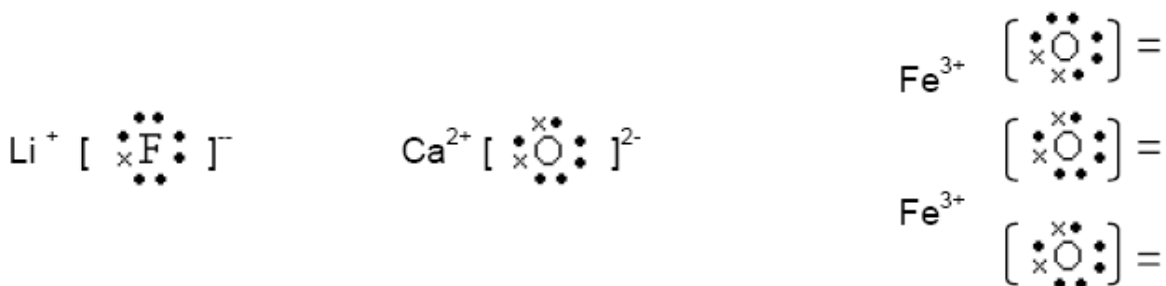
### ➤ UNIÓN IÓNICA

Es la unión característica entre metales y no metales. Los átomos se transforman en iones, tal como sucede con el NaCl, LiF (fluoruro de litio) y KI (yoduro de potasio). Por lo tanto la unión se produce por atracción electrostática entre aniones y cationes. Uno gana y el otro pierde electrones al formarse la unión.

Ejemplos:

Si cada par de electrones compartidos se representa por un guión, la fórmula puede escribirse así: Li--F, Ca = O y O = Fe—O--Fe = O.

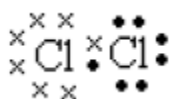
**Figura 2. 4 Formulas de Lewis para algunas uniones iónicas**



## ➤ UNIÓN COVALENTE

La unión covalente se produce habitualmente entre átomos de elementos no metales. Se produce cuando dos átomos comparten uno o varios pares de electrones. Por ejemplo, la molécula de cloro: Cl<sub>2</sub>.

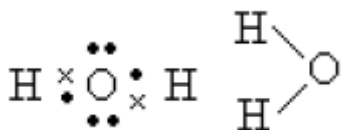
**Figura 2. 5 Formulas de Lewis para la molécula de cloro**



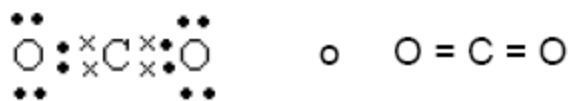
En este caso comparten un solo par de electrones. Las uniones covalentes, constituidas por pares de electrones, implican una cierta penetración o solapamiento de las nubes electrónicas de los átomos involucrados.

**Figura 2. 6 Formulas de Lewis para otras moléculas**

Agua H<sub>2</sub>O



Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>



## ➤ UNIÓN METÁLICA

Es la unión característica de los metales. Es la que explica cómo están unidos entre sí los átomos que constituyen un cuerpo metálico. Los átomos pueden ser de un mismo elemento, como el caso de un hilo de cobre, o de elementos diferentes, como ocurre en las aleaciones, por ejemplo el bronce.

Como los átomos metálicos pierden fácilmente electrones, quedan los correspondientes cationes unidos por un cierto número de electrones móviles que van ocupando, en constante movimiento, los orbitales libres de los iones positivos. Por lo tanto puede decirse que un trozo de metal es “un conjunto de cationes sumergidos en un mar de electrones móviles”. Estos electrones son los que conducen la corriente eléctrica.

### ➤ UNIÓN PUENTE HIDRÓGENO

Es característica de algunas sustancias, y ocurre debido a la presencia de átomos de hidrógeno H y de átomos fuertemente electronegativos pequeños como O, N, ó F. Es una unión poco común, de naturaleza principalmente electrostática. Al ser éstos átomos tan electronegativos, atraen electrones y por lo tanto se produce una densidad de carga negativa sobre los mismos.

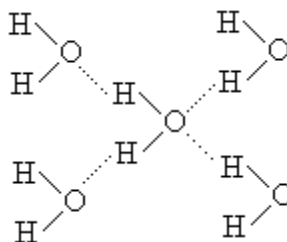
En consecuencia existe una densidad de carga positiva sobre los átomos de H, que se atrae con la densidad de carga negativa de la molécula vecina. Y así sucesivamente.

Son uniones débiles, pero capaces de otorgar propiedades características a los compuestos que las forman.

Los ejemplos más conocidos son los representados a continuación, donde la línea punteada es la unión puente hidrógeno:

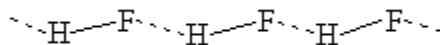
**Tabla 2. 2 Unión puente de hidrogeno más comunes**

1. Agua:

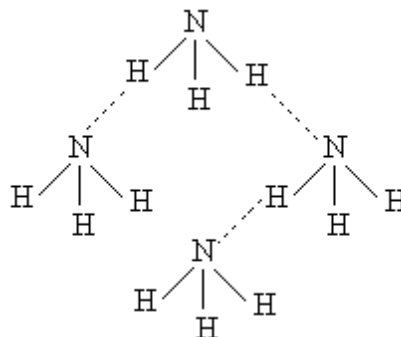




## 2. Ácido fluorhídrico



## 3. Amoníaco



Las propiedades físicas de estos compuestos difieren notablemente de sus homólogos en la tabla periódica. Por ejemplo, el agua es un líquido en condiciones normales de temperatura y presión, mientras que los compuestos análogos  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{Se}$  y  $\text{H}_2\text{Te}$  son gases.

### 2.1.13 PESO ATÓMICO Y MOLECULAR

El peso atómico o masa atómica relativa de un elemento, se define como el cociente entre la masa promedio de un átomo de dicho elemento y una u.m.a.

Una u.m.a. es la doceava parte de la masa de un átomo de  $\text{C}_{12}$ . Si  $m_x$  es la masa promedio (considerando la abundancia relativa de los isótopos) de 1 átomo del elemento x, y  $m_{12c}$  es la masa de un átomo de  $\text{C}_{12}$ , entonces:

$$PA_x = \frac{m_x}{\frac{m_{12c}}{12}}$$

**Ecuación 2.1**

Donde  $PA_x$  es el peso atómico de x.

Este valor es un número sin unidades, que figura en la tabla periódica para cada elemento.

El peso molecular o masa molecular relativa de un compuesto M, se define como el cociente entre la masa promedio de una molécula de dicho compuesto y una u.m.a.

Se obtiene sumando los pesos atómicos de cada uno de los elementos que conforman el compuesto químico. Por ejemplo, el peso molecular del ácido fosfórico  $H_3PO_4$  se calcula de la siguiente manera:

1. 3 átomos de H  $\Rightarrow$  3. PAH =  $3 \times 1.00797 = 3.02391$
2. 1 átomo de P  $\Rightarrow$  1. PAP = 30.9738
3. 4 átomos de O  $\Rightarrow$  4. PAO =  $4 \times 15.9994 = 63.9976$
4.  $3.02391 + 30.9738 + 63.9976 = 97.99531$

### 2.1.14 NÚMERO DE AVOGADRO

El número de átomos, moléculas o iones que intervienen en una reacción química producida en la naturaleza, en la industria o en el laboratorio, es corrientemente muy elevado. Por lo tanto es necesario definir una unidad conveniente de cantidad de materia. Esta unidad se denomina mol, y es la unidad de cantidad de materia en el Sistema Internacional de Unidades (SI).

El número de átomos presentes en 12 g de  $C_{12}$  es  $6.022 \times 10^{23}$  y este valor se denomina Número o constante de Avogadro (NA). Por definición, 1 mol o “átomo gramo” es la cantidad de materia de cualquier elemento, que contiene  $6.022 \times 10^{23}$  “átomos”.

Vale decir que un mol de  $C_{12}$  contiene  $6.022 \times 10^{23}$  átomos. Y 1 mol de  $14N$ , por ejemplo, también contiene  $6.022 \times 10^{23}$  átomos y equivale a 14.0067 g.

Un mol de cualquier elemento equivale a su peso atómico.

Cuando se trata de moléculas, también se habla de mol o “molécula gramo” y se define como la cantidad de materia de cualquier compuesto, que contiene  $6.022 \times 10^{23}$  “moléculas”.

Un mol de cualquier compuesto químico equivale a su peso molecular.

Así 1 mol de agua  $\text{H}_2\text{O}$  equivale a 18 g y contiene  $6.022 \times 10^{23}$  moléculas de agua. En el ejemplo anterior, 1 mol de ácido fosfórico equivale a 97.99531g.

Para ejemplificar éstos conceptos, se considera la siguiente reacción química:



Aquí reaccionan 2 moles de Mg con 1 mol de  $\text{O}_2$  para producir 2 moles de MgO. Que es lo mismo que decir: reaccionan  $2 \times 24.305 = 48.61$  g de Mg con 32 g de  $\text{O}_2$  para producir  $2 \times (24.305 + 16) = 80.61$ g de MgO.

## 2.2 LA CORRIENTE ELECTRICA

### 2.2.1 ¿QUÉ ES LA ELECTRICIDAD?

Las primeras observaciones sobre fenómenos eléctricos se realizaron en la antigua Grecia, cuando el filósofo Tales de Mileto (640-546 a.C.) comprobó que, al frotar barras de ámbar contra pieles curtidas, se producía en ellas características de atracción que antes no poseían. Es el mismo experimento que ahora se puede hacer frotando una barra de plástico con un paño; acercándola luego a pequeños pedazos de papel, los atrae hacia sí, como es característico en los cuerpos electrizados.

Sin embargo, fue el filósofo griego Theophrastus (374-287 a.C.) el primero, que en un tratado escrito tres siglos después, estableció que otras sustancias tienen este mismo poder, dejando así constancia del primer estudio científico sobre la electricidad. Comprobando que no todos los materiales pueden adquirir tal propiedad o adquirirla en igual medida. Se atraen, por ejemplo, una barra de vidrio y otra de ebonita. Se repelen, sin embargo, dos barras de vidrio o dos de ebonita.

La experiencia ha demostrado la existencia de dos clases distintas de electricidad: a una se le llama positiva (+) y a la otra negativa (-). En 1733, el francés Francois de Cisternay Du Fay fue el primero en identificar la existencia de dos cargas eléctricas: Positiva y Negativa.



De igual manera, podemos afirmar que en cualquier clase de material, se dan efectos eléctricos. Ahora bien, la materia es eléctricamente neutra y, en consecuencia, es necesario aplicar una energía externa que origine el desplazamiento de algunos electrones, dando lugar a fenómenos eléctricos.

Por lo tanto, la electricidad se puede definir como una forma de energía originada por el movimiento ordenado de electrones. Otros tipos de energía son la mecánica, calorífica, solar, etc.

### 2.2.2 ¿CÓMO SE PRODUCE LA ELECTRICIDAD?

Dependiendo de la energía que se quiera transformar en electricidad, será necesario aplicar una determinada acción. Se podrá disponer de electricidad por los siguientes procedimientos:

**Tabla 2.3 Procedimientos para obtener electricidad**

ENERGIA	ACCION
Mecánica	Frotamiento
Mecánica	Presión
Química	Química
Magnética	Magnetismo
Luminosa	Luz
Calorífica	Calor

De todas las energías enunciadas anteriormente, la empleada para producir electricidad en grandes cantidades es la magnética.

Su producción se basa en el hecho de que, al mover un conductor (material con gran movilidad de electrones) en presencia de un imán (campo magnético), en el conductor se

produce un movimiento ordenado de electrones, como consecuencia de las fuerzas de atracción y repulsión originadas por el campo magnético.

En esta forma de producción de electricidad se basa el funcionamiento de los alternadores, motores y dinamos.

- Alternador: Dispositivo capaz de transformar el movimiento rotativo en electricidad.
- Motor: Dispositivo capaz de transformar la electricidad en movimiento rotatorio.
- Dinamo: Dispositivo capaz de transformar el movimiento rotativo en electricidad.
- Turbina: Dispositivo mecánico que transforma, la energía cinética de un fluido, en movimiento rotativo y viceversa

Cualquier central eléctrica, basa su producción de electricidad en el giro de turbinas unidas a ejes de alternadores. Este giro se producirá por la caída de agua (central hidroeléctrica) o por el empuje de vapor de agua a presión. En función del origen del calor utilizado para producir vapor, podemos encontrarnos con centrales:

- Térmicas: Queman combustibles fósiles (normalmente carbón).
- Nucleares: Emplea combustibles atómicos (fusión nuclear).
- Geotérmicas: Utilizan el calor del interior de la Tierra.
- Solares: Utilizan el calor del Sol.
- Otras: Cualquier forma de producir calor.

### 2.2.3 MAGNITUDES ELÉCTRICAS

#### ➤ Tensión eléctrica

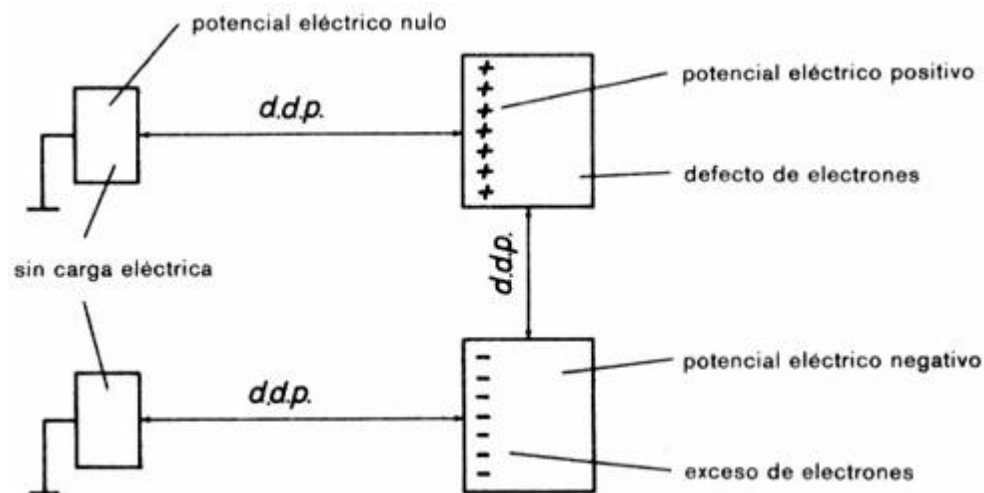
Siempre que dos cuerpos con distintas cargas entran en contacto, se produce una circulación de electrones desde el cuerpo con más carga negativa al de más carga positiva, hasta que las cargas de los cuerpos se igualan.

Para cargar un cuerpo, es necesario producir un exceso o defecto de electrones.

La energía necesaria para cargar este cuerpo se llama fuerza electromotriz (f.e.m.), con la cual se consigue que el cuerpo adquiera una energía o potencial eléctrico.

Si este cuerpo se compara con otro que tenga una carga eléctrica distinta, se tendrán diferentes energías o potenciales eléctricos y existirá entre ambos, una diferencia de potencial (d.d.p)

**Figura 2. 7 Esquema de diferencia de potencial**



Si, mediante un conductor, estos dos cuerpos se unen, habrá una circulación de electrones desde el de menor potencial al de mayor, tendiendo a igualarse, con lo que cesará la

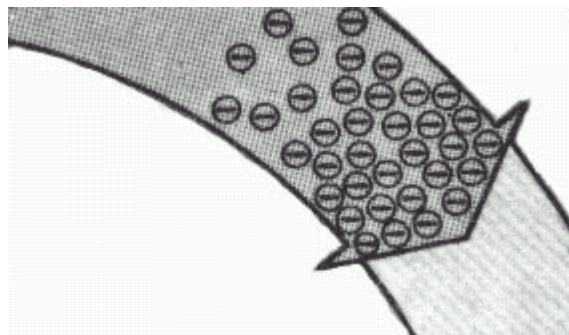
circulación de corriente. Para que continúe la circulación de electrones, hay que mantener la diferencia de potencial mediante un dispositivo que produzca fuerza electromotriz.

A la fuerza electromotriz se la representa mediante la letra E, y a la diferencia de potencial mediante la letra V. A la diferencia de potencial se le llama comúnmente tensión o voltaje eléctrico, su unidad es el voltio.

➤ Corriente eléctrica

Es la cantidad de electrones que recorre un conductor por unidad de tiempo. Se representa por letra I, y se mide en amperios y se representa con la letra A.

**Figura 2. 8 Representación de la corriente eléctrica**



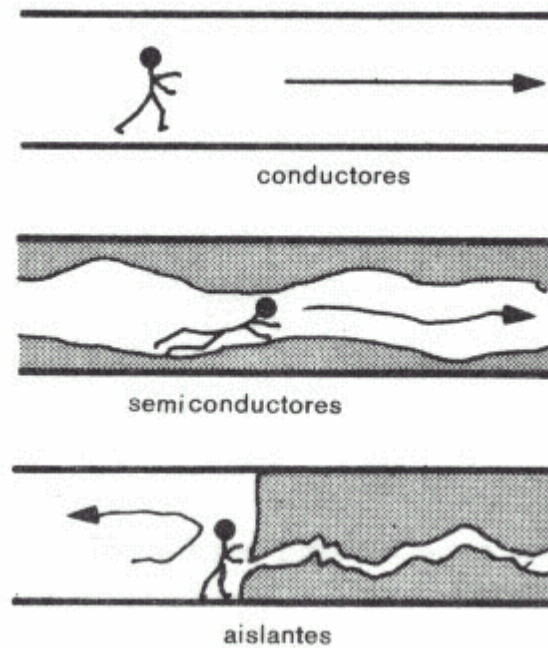
Un amperio equivale al paso de una carga eléctrica de un culombio por segundo, o lo que es lo mismo, el paso de 6.3 trillones de electrones cada segundo.

➤ Resistencia eléctrica

Mide la dificultad que presenta un material al paso de la corriente eléctrica. Se representa por la letra R, y se mide en ohmios ( $\Omega$ ).

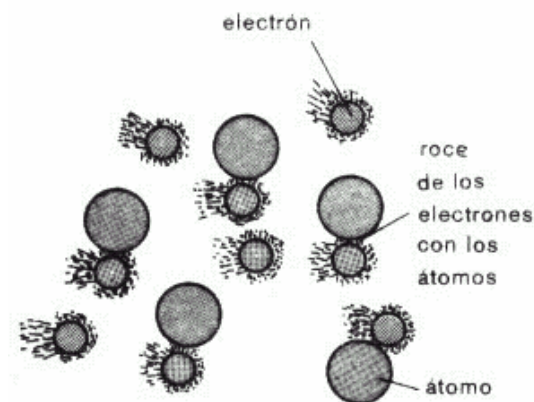


**Figura 2. 9 Representación de la resistencia al flujo de electrones**



La resistencia eléctrica de un material dependerá de su composición. Según sea esta, presentará mayor o menor facilidad al paso de electrones a través de él.

**Figura 2. 10 Rose de los electrones con los átomos**



El ohmio se define como la resistencia que opone al paso de corriente eléctrica, una columna de mercurio de 106.3 centímetros de longitud y 1 milímetro de sección

## 2.2.4 LEY DE OHM

Ya se ha comentado que la diferencia de potencial (tensión) es la causa de la circulación de los electrones en un circuito eléctrico. Por consiguiente, a mayor diferencia de potencial, mayor corriente de electrones.

También se ha visto que la resistencia eléctrica es la dificultad que ofrece un material al paso de la corriente eléctrica. Por lo tanto, si se mantiene constante la causa que hace circular a los electrones (diferencia de potencial), la corriente eléctrica dependerá de la dificultad que oponga el material a su paso, es decir, de su resistencia eléctrica.

Experimentalmente se comprueba que en un circuito eléctrico, la intensidad de la corriente que lo recorre es igual a la diferencia de potencial (d.d.p.) dividida por la resistencia del circuito.

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{Tension (d. d. p.)}}{\text{Resistencia}} \qquad \text{Ecuación 2. 2}$$

Esta es la conocida como Ley de Ohm, que relaciona los tres parámetros fundamentales de la electricidad.

## 2.2.5 POTENCIA Y ENERGÍA ELÉCTRICA

En Física se define la fuerza como cualquier causa capaz de producir o modificar un movimiento.

Ya se ha visto que para producir el movimiento de los electrones, se necesita una fuerza que llamamos fuerza electromotriz.

La energía se define como el producto de la fuerza aplicada sobre un cuerpo y el espacio que le hace recorrer en el movimiento provocado.

$$\text{Energía} = \text{Fuerza} \times \text{Espacio}$$

**Ecuación 2.3**

La potencia se define como energía por unidad de tiempo.

$$\text{Potencia} = \text{Energía} \div \text{Tiempo}$$

**Ecuación 2.4**

Matemáticamente se demuestra que la potencia eléctrica es igual al producto de la tensión y la intensidad que circula por el circuito.

$$\text{Potencia} = \text{Tensión} \times \text{Intensidad}$$

**Ecuación 2.5**

La potencia eléctrica se mide en watios (w) y la energía en watios por hora (w.h), aunque lo más común es emplear el Kilowatio (Kw) y el Kilowatio por hora (Kw.h).

### **2.2.6 CONCEPTO DE ONDA.**

La definición más general establece que la onda consiste en una perturbación que se propaga con una determinada dependencia espacio - temporal, que avanza o que se propaga en un medio material o incluso en el vacío.

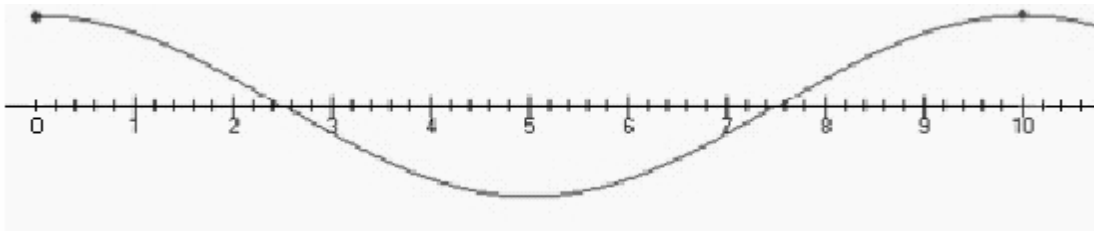
Dado que la perturbación de una magnitud física consiste a menudo en una variación periódica y, sobre todo, oscilatoria, la onda puede considerarse como la propagación de una vibración originada en un punto.

#### **2.2.6.1 MOVIMIENTO ONDULATORIO**

Es el tipo de movimiento característico de las ondas y su propiedad esencial es que no implica un transporte de materia de un punto a otro. Si tiramos un trozo de papel a la superficie de un lago, y luego generamos una onda arrojando una piedra, veremos que el

papel no se mueve de su lugar (se mueve apenas unos centímetros adelante y atrás, quedándose al final en el mismo sitio). Ello quiere decir que lo que desplaza en el movimiento ondulatorio es la perturbación. El movimiento ondulatorio supone únicamente un transporte de energía y de cantidad de movimiento.

**Figura 2. 11 Representación de una onda**



✓ Longitud de onda

Es la distancia mínima entre dos puntos con el mismo valor de la perturbación (se toman como referencia los picos). Es, por tanto, una distancia.

✓ Amplitud

Es el valor máximo de la función de onda y corresponde al máximo valor que alcanza la perturbación en un punto. Es la medida entre el pico (o el valle) y el punto de equilibrio.

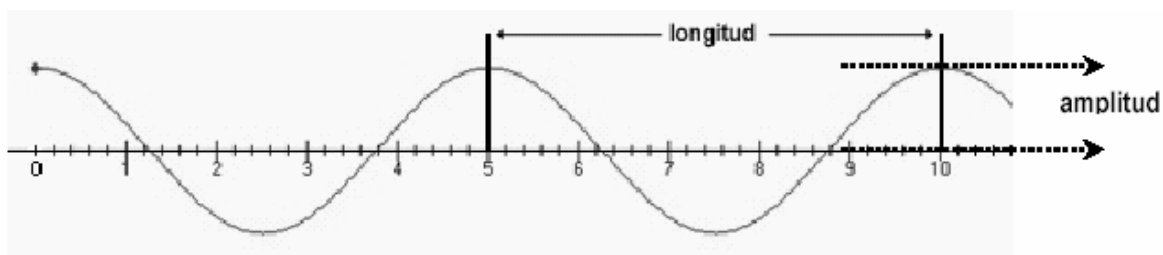
✓ Período

Es el tiempo mínimo transcurrido para que en un punto se repita un mismo valor de la perturbación.

✓ Frecuencia

Es el número de veces que en la unidad de tiempo se repite el mismo valor de la perturbación en un punto. Equivale a la inversa del periodo. Dicho de otro modo, es el número de vibraciones por unidad de tiempo (el segundo), y su unidad es el ciclo por segundo o Hertzio (Hz).

**Figura 2. 12 Algunas magnitudes de una onda**



Longitud de onda, frecuencia y periodo están relacionados, con lo que podemos calcular la frecuencia de una onda si conocemos su longitud, y viceversa. Así, la longitud es inversamente proporcional a su frecuencia. A mayor longitud de onda, menor será su frecuencia y viceversa. Ahora bien: las ondas electromagnéticas siguen una trayectoria rectilínea y su velocidad es siempre constante (en el vacío, su velocidad es la de la luz, es decir, 300,000 km/seg. Por lo tanto, podemos establecer la siguiente fórmula:

$$L = C \times T \qquad \text{Ecuación 2. 6}$$

Donde “L” es la longitud de onda, “C” la velocidad de la luz en el vacío y “T” el período. Esta fórmula se puede también expresar de la siguiente manera:

$$L = C \div F \qquad \text{Ecuación 2. 7}$$

Donde “F” es la frecuencia. Medida, como ya se ha indicado, en Hertzios (Hz) o ciclos por segundo.

### **2.2.7 ESPECTRO RADIO - ELÉCTRICO O ELECTROMAGNÉTICO.**

Llamamos así a todas las ondas electromagnéticas que existen en el universo o que han sido descubiertas por el hombre. Organizadas de forma continua según su longitud, forman un

espectro que va desde las ondas más largas (de kilómetros de longitud) a las más cortas (millonésima de milímetro). En función de dicha longitud y consecuentemente su frecuencia- las ondas electromagnéticas pueden ser detectadas por distintos procesos en los que la electrónica juega un papel fundamental. Así, por ejemplo, las ondas más largas estimulan receptores de radio o de televisión (Ondas de Radio), mientras que las más cortas, son las llamadas Ondas Gamma.

✓ Impedancia

Oposición que ofrece algún material o aparato a la circulación de la radio frecuencia.

✓ Condensador

Se define un capacitor o condensador como aquel elemento eléctrico que tienen la capacidad de almacenar la energía eléctrica. Este elemento se forma por la construcción de los elementos o placas que se encuentran cargadas y separadas mediante un medio aislante con una cierta permeabilidad eléctrica.

La Capacitancia o capacidad de almacenar energía está dada por:

$$C = \frac{Q}{V} \qquad \text{Ecuación 2. 8}$$

Sus unidades están determinadas en (coulomb / volts), C / V, o también llamados Faradios, F.

➤ Conductancia

Es la capacidad de un componente de portar o dar paso a la corriente eléctrica.

Es lo inverso a la resistencia su símbolo es la G, y se expresa en unidades siemens

$$S = \Omega^{-1}$$

➤ Impedancia Característica ( $Z_0$ )

Se denomina Impedancia Característica a la relación entre el voltaje aplicado y la corriente alterna circulante, en un punto cualquiera de una línea de transmisión considerada infinitamente larga. Tal como su nombre lo indica, impedancia es el conjunto de parámetros que se opone al paso de una señal alterna. La impedancia característica se determina, por medio de los cuatro parámetros primarios, de la línea de transmisión (Resistencia, Capacitancia, Inductancia y Conductancia) y se expresa de la siguiente forma:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} [\Omega]$$

**Ecuación 2. 9**

Donde:

$Z_0$  = Impedancia característica de la línea expresada en  $\Omega$ .

$R$  = Resistencia de lazo de la línea expresada en  $\Omega$ .

$C$  = Capacidad de la línea expresada en Faradios.

$L$  = Inductancia de la línea expresada en henrios.

$\omega = 2\pi \times f$

$f$  = Frecuencia expresada en hertz

$j$  = Factor imaginario

➤ Decibel (dB)

Unidad que expresa la relación entre dos potencias que viene dada por:

$10\log (P1/P2)$ .

$\text{dBmV}$

Abreviatura de decibel mili voltio. Que es la medida en el sistema de televisión por cable que indica el nivel actual de la señal; en términos técnicos, es una señal referenciada a 1 mili voltio sobre una impedancia de 75 ohmios.

dBm

Abreviatura de decibeles referidos a un miliwatio. Los niveles de potencia óptica se expresan en dBm.

### 2.3 CONCEPTOS DE TERMODINAMICA

Los sistemas físicos que encontramos en la naturaleza consisten en un agregado de un número muy grande de átomos.

La materia está en uno de los tres estados: sólido, líquido o gas. En los sólidos, las posiciones relativas (distancia y orientación) de los átomos o moléculas son fijas. En los líquidos, las distancias entre las moléculas son fijas, pero su orientación relativa cambia continuamente. En los gases, las distancias entre moléculas, son en general, mucho más grandes que las dimensiones de las mismas. Las fuerzas entre las moléculas son muy débiles y se manifiestan principalmente en el momento en el que chocan. Por esta razón, los gases son más fáciles de describir que los sólidos y que los líquidos.

El gas contenido en un recipiente, está formado por un número muy grande de moléculas,  $6.023 \times 10^{23}$  moléculas en un mol de sustancia. Cuando se intenta describir un sistema con un número tan grande de partículas resulta inútil e imposible describir el movimiento individual de cada componente. Por lo que mediremos magnitudes que se refieren al conjunto: volumen ocupado por una masa de gas, presión que ejerce el gas sobre las paredes del recipiente y su temperatura. Estas cantidades físicas se denominan macroscópicas, en el sentido de que no se refieren al movimiento individual de cada partícula, sino del sistema en su conjunto.

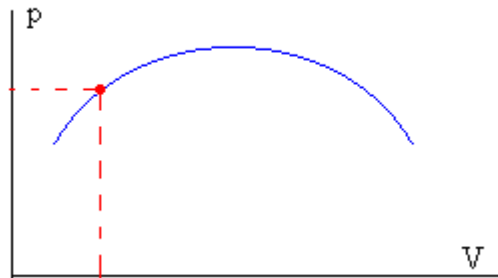


### 2.3.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Denominamos estado de equilibrio de un sistema cuando las variables macroscópicas presión ( $p$ ), volumen ( $V$ ) y temperatura ( $T$ ) no cambian. El estado de equilibrio es dinámico en el sentido de que los constituyentes del sistema se mueven continuamente.

El estado del sistema se representa por un punto en un diagrama  $p$ - $V$ . Podemos llevar al sistema desde un estado inicial a otro final a través de una sucesión de estados de equilibrio.

**Figura 2. 13 Representación del estado de un sistema**



Se denomina ecuación de estado a la relación que existe entre las variables  $p$ ,  $V$ , y  $T$ , para un gas. La ecuación de estado más sencilla es la de un gas ideal  $pV=nRT$ , donde  $n$  representa el número de moles, y  $R$  la constante de los gases.

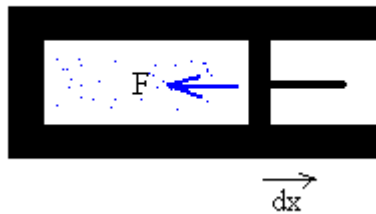
$$R = 8.314 \text{ J/mol K} = 1.986 \text{ cal/mol K}$$

Se denomina energía interna del sistema a la suma de las energías de todas sus partículas. En un gas ideal las moléculas solamente tienen energía cinética, los choques entre las moléculas se suponen perfectamente elásticos, la energía interna solamente depende de la temperatura, para un gas ideal.

### 2.3.2 TRABAJO MECÁNICO HECHO POR O SOBRE EL SISTEMA.

Consideremos, por ejemplo, un gas dentro de un cilindro. Las moléculas del gas chocan contra las paredes cambiando la dirección de su velocidad, o de su momento lineal. El efecto del gran número de colisiones que tienen lugar en la unidad de tiempo, se puede representar por una fuerza  $F$  que actúa sobre toda la superficie de la pared.

**Figura 2. 14 Trabajo mecánico sobre un sistema**



Si una de las paredes es un émbolo móvil de área  $A$  y éste se desplaza  $dx$ , el intercambio de energía del sistema con el exterior puede expresarse como el trabajo realizado por la fuerza  $F$  a lo largo del desplazamiento  $dxdW = -Fdx = -pAdx = -pdV$ , siendo  $dV$  el cambio del volumen del gas.

El signo menos indica que si el sistema realiza trabajo (incrementa su volumen) su energía interna disminuye, pero si se realiza trabajo sobre el sistema (disminuye su volumen) su energía interna aumenta.

El trabajo total realizado cuando el sistema pasa del estado A cuyo volumen es  $V_A$  al estado B cuyo volumen es  $V_B$ .

$$W = - \int_{V_a}^{V_b} p dV$$

**Ecuación 2. 10**

### 2.3.3 EL CALOR

El calor no es una nueva forma de energía, es el nombre dado a una transferencia de energía de tipo especial en el que intervienen gran número de partículas. Se denomina calor a la energía intercambiada entre un sistema y el medio que le rodea debido a los choques entre las moléculas del sistema y el exterior al mismo y siempre que no pueda expresarse macroscópicamente como producto de fuerza por desplazamiento.

Se debe distinguir también entre los conceptos de calor y energía interna de una sustancia. El flujo de calor es una transferencia de energía que se lleva a cabo como consecuencia de las diferencias de temperatura. La energía interna es la energía que tiene una sustancia debido a su temperatura, que es esencialmente a escala microscópica la energía cinética de sus moléculas.

El calor se considera positivo cuando fluye hacia el sistema, cuando incrementa su energía interna y se considera negativo cuando fluye desde el sistema, por lo que disminuye su energía interna.

Cuando una sustancia incrementa su temperatura de  $T_A$  a  $T_B$ , el calor absorbido se obtiene multiplicando la masa (o el número de moles  $n$ ) por el calor específico  $c$  y por la diferencia de temperatura  $T_B - T_A$ .

$$Q = nC(T_B - T_A)$$

Cuando no hay intercambio de energía (en forma de calor) entre dos sistemas, decimos que están en equilibrio térmico. Las moléculas individuales pueden intercambiar energía, pero en promedio, la misma cantidad de energía fluye en ambas direcciones, no habiendo intercambio neto. Para que dos sistemas estén en equilibrio térmico deben de estar a la misma temperatura.

### 2.3.4 PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La primera ley no es otra cosa que el principio de conservación de la energía aplicado a un sistema de muchísimas partículas. A cada estado del sistema le corresponde una energía interna  $U$ . Cuando el sistema pasa del estado A al estado B, su energía interna cambia en

$$\Delta U = U_B - U_A \qquad \text{Ecuación 2. 11}$$

Supongamos que el sistema está en el estado A y realiza un trabajo  $W$ , expandiéndose. Dicho trabajo mecánico da lugar a un cambio (disminución) de la energía interna de sistema

$$\Delta U = -W \qquad \text{Ecuación 2. 12}$$

También podemos cambiar el estado del sistema poniéndolo en contacto térmico con otro sistema a diferente temperatura. Si fluye una cantidad de calor  $Q$  del segundo al primero, aumenta su energía interna en  $\Delta U=Q$ .

Si el sistema experimenta una transformación cíclica, el cambio en la energía interna es cero, ya que se parte del estado A y se regresa al mismo estado,  $\Delta U=0$ . Sin embargo, durante el ciclo el sistema ha efectuado un trabajo, que ha de ser proporcionado por los alrededores en forma de transferencia de calor, para preservar el principio de conservación de la energía,  $W=Q$ .

- ✓ Si la transformación no es cíclica  $\Delta U \neq 0$
- ✓ Si no se realiza trabajo mecánico  $\Delta U=Q$
- ✓ Si el sistema está aislado térmicamente  $\Delta U=-W$
- ✓ Si el sistema realiza trabajo,  $\Delta U$  disminuye
- ✓ Si se realiza trabajo sobre el sistema,  $\Delta U$  aumenta
- ✓ Si el sistema absorbe calor al ponerlo en contacto térmico con un foco a temperatura superior,  $\Delta U$  aumenta.

- ✓ Si el sistema cede calor al ponerlo en contacto térmico con un foco a una temperatura inferior,  $\Delta U$  disminuye.

Todos estos casos, los podemos resumir en una única ecuación que describe la conservación de la energía del sistema.

$$\Delta U = Q - W$$

**Ecuación 2. 13**

Si el estado inicial y final están muy próximos entre sí, el primer principio se escribe

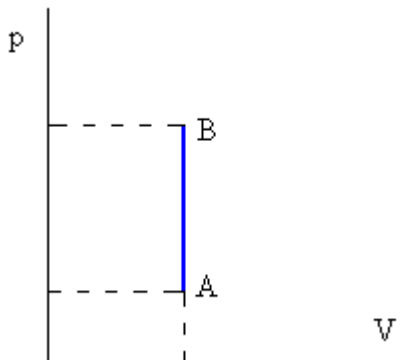
$$dU = dQ - pdV$$

**Ecuación 2. 14**

### 2.3.5 TRANSFORMACIONES

La energía interna  $U$  del sistema depende únicamente del estado del sistema, en un gas ideal depende solamente de su temperatura. Mientras que la transferencia de calor o el trabajo mecánico dependen del tipo de transformación o camino seguido para ir del estado inicial al final.

- ✓ Isócora o a volumen constante



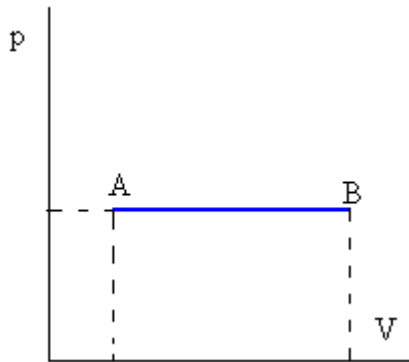
No hay variación de volumen del gas, luego

$$W = 0$$

$$Q = nC_V(T_B - T_A)$$

Donde  $c_V$  es el calor específico a volumen constante

- ✓ Isóbara o a presión constante



$$W = p(v_B - v_A)$$

$$Q = nC_p(T_B - T_A)$$

Donde  $c_p$  es el calor específico a presión constante

- ✓ Calores específicos a presión constante  $C_p$  y a volumen constante  $C_v$

En una transformación a volumen constante  $dU = dQ = nC_vdT$

En una transformación a presión constante  $dU = nC_pdT - pdV$

Como la variación de energía interna  $dU$  no depende del tipo de transformación, sino solamente del estado inicial y del estado final, combinando las ecuaciones se puede escribir como:  $nC_vdT = nC_pdT - pdV$

Empleando la ecuación de estado de un gas ideal  $pV = nRT$ , obtenemos la relación entre los calores específicos a presión constante y a volumen constante:

$$C_v = C_p - R$$

Para un gas monoatómico  $U = \frac{3}{2}nRT$   $C_v = \frac{3}{2}R$   $C_p = \frac{5}{2}R$

Para un gas diatómico  $U = \frac{5}{2}nRT$   $C_v = \frac{5}{2}R$   $C_p = \frac{7}{2}R$

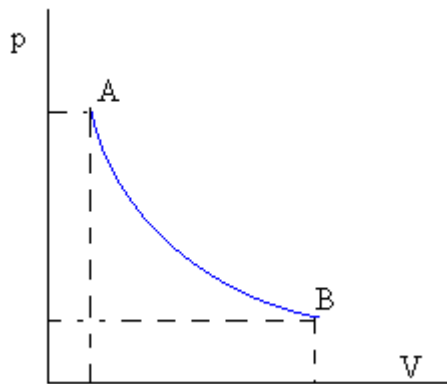
La variación de energía interna en un proceso AB es  $\Delta U = nC_v(T_B - T_A)$

Se denomina índice adiabático de un gas ideal al cociente  $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$

✓ Isoterma o a temperatura constante

$$pV = nRT$$

La curva  $p = \text{cte}/V$  que representa la transformación en un diagrama p-V es una hipérbola cuyas asíntotas son los ejes coordenados.



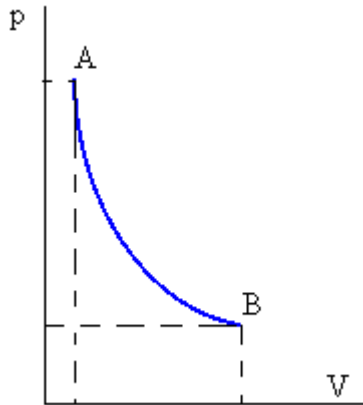
$$W = \int_{V_A}^{V_B} p dV = \int_{V_A}^{V_B} \frac{nRT}{V} dV = nRT \cdot \ln \frac{V_B}{V_A}$$

$$\Delta U = 0$$

$$Q = W$$

✓ Adiabática o aislada térmicamente,  $Q=0$

La ecuación de una transformación adiabática la hemos obtenido a partir de un modelo simple de gas ideal. Ahora vamos a obtenerla a partir del primer principio de la Termodinámica.



Ecuación de la transformación adiabática

Del primer principio  $dU = -pdV$

$$nc_v dT = -\frac{nRT}{V} dV \quad \frac{dT}{T} = -\frac{R}{C_v} \cdot \frac{dV}{V}$$

Integrando

$$\ln T + \frac{R}{C_v} \ln V = \text{cte} \quad TV^{\frac{R}{C_v}} = \text{cte} \quad PV^{\frac{R}{C_v}+1} = \text{cte}$$

Donde el exponente de V se denomina índice adiabático del gas ideal

$$\gamma = \frac{R}{C_v} + 1 = \frac{C_p + C_v}{C_v} + 1 = \frac{C_p}{C_v}$$

Si A y B son los estados inicial y final de una transformación adiabática se cumple que

$$P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma = \text{cte}$$

Para calcular el trabajo es necesario efectuar una integración similar a la transformación isoterma.

$$\begin{aligned} W &= \int_{\lambda}^{V_s} p dV = \int_{\lambda}^{V_s} \frac{\text{cte}}{V^\gamma} dV = \frac{\text{cte}}{-\gamma + 1} (V_B^{-\gamma+1} - V_A^{-\gamma+1}) = \frac{1}{-\gamma + 1} (P_B V_B - P_A V_A) \\ &= -nC_v(T_B - T_A) \end{aligned}$$

Como podemos comprobar, el trabajo es igual a la variación de energía interna cambiada de signo

$$\text{Si } Q=0, \text{ entonces } W = -\Delta U = -nC_v(T_B - T_A)$$



## 2.4 EL HIDROGENO

### 2.4.1 EL HIDRÓGENO EN LA NATURALEZA.

El H atómico es el más simple, formado por un protón y un electrón. La formación de H molecular es exotérmica y provoca altas temperaturas en su combustión (4000 °C) utilizada para soldadura y para fundir óxidos refractarios.

La disociación en sus átomos se consigue aportando energía:

- En forma de calor: haciendo pasar una corriente de H<sub>2</sub> a través de un arco eléctrico con electrones de wolframio.
- Mediante descarga eléctrica: en un tubo de descarga.

En el universo es el elemento más abundante. En la tierra nunca se encuentra en forma de átomos libres y raramente en forma molecular (gas natural). Ocupa el noveno puesto en porcentaje en peso y el tercero en número de átomos.

### 2.4.2 NIVELES ENERGÉTICOS ELECTRÓNICOS

El nivel energético del estado fundamental electrónico de un átomo de hidrógeno es -13,6 eV, que equivale a un fotón de luz ultravioleta de aproximadamente 92 nm.

Los niveles energéticos del hidrógeno pueden calcularse con bastante precisión empleando el modelo atómico de Bohr, que considera que el electrón orbita alrededor del protón de forma análoga a la órbita terrestre alrededor del Sol. Sin embargo, la fuerza electromagnética hace que el protón y el electrón se atraigan. Debido al carácter discreto del momento angular postulado en los inicios de la Mecánica Cuántica por Bohr, el electrón en el modelo de Bohr sólo puede orbitar a ciertas distancias permitidas alrededor del protón y, por extensión, con ciertos valores de energía permitidos. Una descripción más precisa del átomo de hidrógeno viene dada mediante un tratamiento puramente mecano - cuántico que

emplea la ecuación de Schrödinger o la formulación equivalente de las integrales de camino de Feynman para calcular la densidad de probabilidad del electrón. El tratamiento a través de la hipótesis de De Broglie (dualidad onda - partícula) el electrón reproduce resultados químicos (tales como la configuración del átomo de hidrógeno) de manera más natural que el modelo de partículas de Bohr, aunque la energía y los resultados espectrales son los mismos. Si en la construcción del modelo se emplea la masa reducida del núcleo y del electrón (como se haría en el problema de dos cuerpos en Mecánica Clásica), se obtiene una mejor formulación para los espectros del hidrógeno, y los desplazamientos espectrales correctos para el deuterio y el tritio. Pequeños ajustes en los niveles energéticos del átomo de hidrógeno, que corresponden a efectos espectrales reales, pueden determinarse usando la Teoría Mecano - Cuántica completa, que corrige los efectos de la Relatividad Especial (ver ecuación de Dirac), y compatibilizando los efectos cuánticos originados por la producción de partículas virtuales en el vacío y como resultado de los campos eléctricos (ver Electrodinámica Cuántica).

En el hidrógeno gaseoso, el nivel energético del estado electrónico fundamental está dividido a su vez en otros niveles de estructura hiperfina, originados por el efecto de las interacciones magnéticas producidas entre los espines del electrón y del protón. La energía del átomo cuando los espines del protón y del electrón están alineados es superior que cuando los espines no lo están. La transición entre esos dos estados puede tener lugar mediante la emisión de un fotón a través de una transición de dipolo magnético.

### 2.4.3 ISÓTOPOS DEL HIDRÓGENO.

El hidrógeno posee tres isótopos naturales que se denotan como  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$  y  $^3\text{H}$ . Otros isótopos altamente inestables (del  $^4\text{H}$  al  $^7\text{H}$ ) han sido sintetizados en laboratorio, pero nunca observados en la naturaleza.

- Protio  $H_1^1$ : es el isótopo más común del hidrógeno con una abundancia de más del 99.98%. Debido a que el núcleo de este isótopo está formado por un solo protón se

le ha bautizado como protio, nombre que a pesar de ser muy descriptivo, es poco usado.

- Deuterio  $H_2^1$  ó  $D_2^1$ : el otro isótopo estable del hidrógeno y su núcleo contiene un protón y un neutrón. El deuterio representa el 0.0026% o el 0.0184% (según sea en fracción molar o fracción atómica) del hidrógeno presente en la Tierra, encontrándose las menores concentraciones en el hidrógeno gaseoso, y las mayores (0.015% o 150 ppm) en aguas oceánicas. El deuterio no es radiactivo, y no representa un riesgo significativo de toxicidad. El agua enriquecida en moléculas que incluyen deuterio en lugar de hidrógeno  $^1H$  (protio), se denomina agua pesada.

El deuterio y sus compuestos se emplean en el marcado no radiactivo para experimentos y también en disolventes usados en espectroscopia  $^1H$  - RMN. El agua pesada se utiliza como moderador de neutrones y refrigerante en reactores nucleares. El deuterio es también un combustible potencial para la fusión nuclear con fines comerciales.

- Tritio  $H_3^1$  ó  $T_3^1$ : contiene un protón y dos neutrones en su núcleo. Es radiactivo, desintegrándose en  $^3_2He^+$  a través de una emisión beta. Posee un periodo de semi desintegración de 12.33 años. Pequeñas cantidades de tritio se encuentran en la naturaleza por efecto de la interacción de los rayos cósmicos con los gases atmosféricos. También ha sido liberado tritio por la realización de pruebas de armamento nuclear. El tritio se usa en reacciones de fusión nuclear, como trazador en Geoquímica Isotópica, y en dispositivos luminosos auto - alimentados. Antes era común emplear el tritio como radiomarcador en experimentos químicos y biológicos, pero actualmente se usa menos. Al igual que el H sus isótopos también pueden formar moléculas tanto puras ( $D_2$ ,  $T_2$ ) como mixtas (HD, HT, DT).

El hidrógeno es el único elemento que posee diferentes nombres comunes para cada uno de sus isótopos (naturales). Durante los inicios de los estudios sobre la radioactividad, a algunos isótopos radiactivos pesados les fueron asignados nombres, pero ninguno de ellos

se sigue usando. Los símbolos D y T (en lugar de  $^2\text{H}$  y  $^3\text{H}$ ) se usan a veces para referirse al deuterio y al tritio, pero el símbolo P corresponde al fósforo y, por tanto, no puede usarse para representar al protio. La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) declara que aunque el uso de estos símbolos sea común, no es lo aconsejado.

#### 2.4.4 FORMAS ELEMENTALES MOLECULARES

Existen dos tipos distintos de moléculas diatómicas de hidrógeno que difieren en la relación entre los espines de sus núcleos:

- Orto - hidrógeno: los espines de los dos protones se encuentran paralelos y conforman un estado triplete.
- Para - hidrógeno: los espines de los dos protones se encuentran anti paralelos y conforman un estado singular.

En condiciones normales de presión y temperatura el hidrógeno gaseoso contiene aproximadamente un 25% de la forma para y un 75% de la forma orto, también conocida como "forma normal". La relación del equilibrio entre orto - hidrógeno y para - hidrógeno depende de la temperatura, pero puesto que la forma orto es un estado excitado, y por tanto posee una energía superior, es inestable y no puede ser purificada. A temperaturas muy bajas, el estado de equilibrio está compuesto casi exclusivamente por la forma para. Las propiedades físicas del para - hidrógeno puro difieren ligeramente de las de la forma normal (orto). La distinción entre formas orto / para también se presenta en otras moléculas o grupos funcionales que contienen hidrógeno, tales como el agua o el metileno.

La interconversión no catalizada entre el para - hidrógeno y el orto - hidrógeno se incrementa al aumentar la temperatura; por esta razón, el  $\text{H}_2$  condensado rápidamente contiene grandes cantidades de la forma orto que pasa a la forma para lentamente. La relación orto / para en el  $\text{H}_2$  condensado es algo importante a tener en cuenta para la preparación y el almacenamiento del hidrógeno líquido: la conversión de la forma orto a la forma para es exotérmica y produce el calor suficiente para evaporar el hidrógeno líquido,

provocando la pérdida del material licuado. Catalizadores para la interconversión orto / para, tales como compuestos de hierro, son usados en procesos de refrigeración con hidrógeno.

Una forma molecular llamada "hidrógeno molecular protonado" o  $H_3^+$ , se encuentra en el medio interestelar, donde se genera por la ionización del hidrógeno molecular provocada por los rayos cósmicos. También se ha observado en las capas superiores de la atmósfera de Júpiter. Esta molécula es relativamente estable en el medio del espacio exterior debido a las bajas temperaturas y a la densidad. El  $H_3^+$  es uno de los iones más abundantes del universo, y juega un papel notable en la química del medio interestelar.

#### 2.4.5 PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO.

El hidrógeno es un elemento químico representado por el símbolo H y con un número atómico de 1. En condiciones normales de presión y temperatura, es un gas diatómico ( $H_2$ ) incoloro, inodoro, insípido, no metálico y altamente inflamable, difícil de licuar y solidificar. Con una masa atómica de 1.00794 u, el hidrógeno es el elemento químico más ligero y es, también, el elemento más abundante, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia visible del universo.

**Tabla 2. 4 Datos técnicos del hidrogeno**

INFORMACION GENERAL	
Nombre, Símbolo, Numero	Hidrógeno, H, 1
Serie química	No metales
Grupo, Periodo, Bloque	1, 1, s
Densidad	0.0899 kg/m <sup>3</sup>
Apariencia	Incoloro

## VARIOS

Electronegatividad	2, 2
Calor específico	$1.4304 \times 10^4 \text{ J}(\text{kg} \cdot \text{K})$
Conductividad eléctrica	-S/m
Conductividad térmica	$0.1815 \text{ W}(\text{m} \cdot \text{K})$
Energía de ionización	1312 kJ/mol

## PROPIEDADES ATOMICAS

Radio medio	25 pm
Radio atómico	53 pm (radio de Bohr)
Radio covalente	37 pm
Radio de van der Waals	120 pm
Configuración electrónica	$1s^1$
Electrones por nivel de energía	1
Estado(s) de oxidación	1, -1
Oxido	Anfótero
Estructura cristalina	Hexagonal

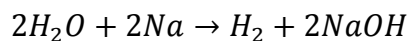
Al ser el hidrógeno un gas, conviene almacenarlo en estado líquido, para lo cual es necesario presurizarlo, enfriarlo y mantenerlo a  $253^\circ\text{C}$  bajo cero ( $-253^\circ\text{C}$  /  $20 \text{ K}$  /  $-423.17^\circ\text{F}$ ), con lo que llega a ocupar la milésima parte de su volumen. El hidrógeno líquido se abrevia:  $\text{LH}_2$ . También puede ser almacenado comprimido en tanques.

Tiene una densidad de energía, menor que la gasolina. Se requieren cuatro litros de  $\text{LH}_2$  para obtener la misma energía de un litro de gasolina. Por otro lado es el elemento más liviano de la naturaleza debido a su baja densidad,  $0.078 \text{ gr/cm}^3$ , es muy liviano y un litro de  $\text{LH}_2$  pesa solo  $0.07 \text{ kg}$  o  $70 \text{ gramos}$ , a una temperatura de  $20 \text{ K}$ . Un litro de agua, con una densidad de  $1 \text{ gr/cm}^3$  pesa  $1 \text{ kilo}$  y un litro de gasolina, de densidad  $0.75 \text{ gr/cm}^3$  pesa  $750 \text{ gr}$ .

Las ventajas del H<sub>2</sub> es que por kilo almacena unas 2.6 veces más energía que la gasolina, la desventaja es que se necesitan unas 4 veces en volumen para dar la misma cantidad de energía. Un tanque de 57 litros de gasolina pesa 40 kilos. El correspondiente tanque de hidrógeno sería de 227 litros y pesaría sólo 15.4 kilos<sup>1</sup>.

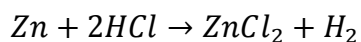
#### 2.4.6 MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE HIDRÓGENO.

- a) Reacción del agua con metales de potencial normal de reducción fuertemente negativos (alcalinos y alcalinotérreos).

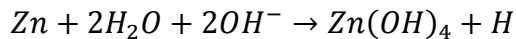


Otros metales como el Al, Mg y Zn no reaccionan con el agua a temperatura ambiente pero si lo hacen cuando se calienta.

- b) Reacción de los metales más reductores que el hidrógeno con ácidos no oxidantes.



- c) Reacción de metales (de hidróxidos anfóteros) con disoluciones acuosas concentrada de bases fuertes. Al, Zn, Si.



- d) Electrolisis del agua.



---

<sup>1</sup> Datos de John McCarthy de la U. de Stanford.

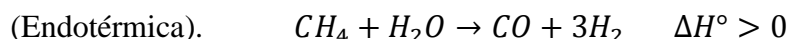
## 2.4.7 SÍNTESIS INDUSTRIAL DEL HIDRÓGENO.

El H se encuentra en la naturaleza formando parte (5%) del gas natural y disuelto en el petróleo. Pero los métodos de síntesis industrial parte de manera directa o indirecta del agua, siendo la energía de descomposición del agua  $\Delta G^\circ = 474.4 \text{ KJ/molK}$

- a) Reformado del gas natural y de las fracciones ligeras del petróleo (naftas) con vapor de agua.

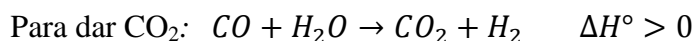
La mitad del H producido tiene este origen se produce en dos etapas:

1ª Se pasa la mezcla de gas natural y vapor de agua sobre un catalizador de níquel cobalto a 800 ° C.



La mezcla del 2º miembro recibe el nombre de gas de agua o gas de síntesis.

2ª El CO reacciona con más vapor de agua en presencia de otro catalizador (mezclas de óxidos Fe).

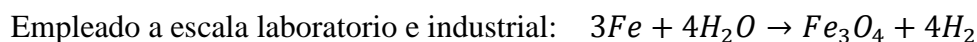


La energía necesaria se toma de la combustión del gas cuando alternativamente se sustituye el vapor por aire. El CO<sub>2</sub> se elimina mediante un proceso de compresión y enfriamiento.

- b) Gasificación del carbón con vapor de agua (método de Lurgi)

El 25% se obtiene por este método. Consiste en hacer pasar vapor de agua sobre carbón a 1500 ° C y 3-4 Mpa siendo los productos y la reacción parecida al método anterior, siendo también necesario 2 etapas y la entrada alternativa de aire.

- c) Reacción de vapor de agua con el hierro.

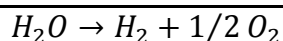
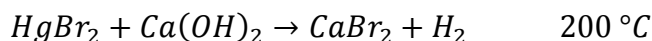
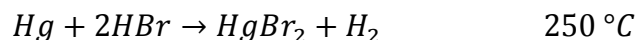
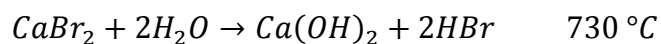




d) Métodos de descomposición del agua basados en ciclos termodinámicos.

Este método se fundamenta en la disminución de la energía libre de descomposición del agua, rebajando la temperatura necesaria para la descomposición a unos valores muy inferiores.

➤ Ciclo Mark-1



Existen otros métodos basados en la descomposición térmica de otros compuestos de H (sulfuro de hidrógeno):  $H_2S \rightarrow H_2 + S$

También se obtiene H como subproducto de otros procesos:

- Electrólisis del cloruro sódico en disolución acuosa.
- Destilación seca del carbón para la obtención de coque.

## 2.5 ELECTROLISIS

La electrolisis es la parte de la química que trata de la relación entre las corrientes eléctricas y las reacciones químicas y de la conversión de la energía química en eléctrica y viceversa. En un sentido más amplio, la electrolisis es el estudio de las reacciones químicas que producen efectos eléctricos y de los fenómenos químicos causados por la acción de las corrientes o voltajes.

La mayoría de los compuestos inorgánicos y algunos de los orgánicos se ionizan al fundirse o cuando se disuelven en agua u otros líquidos; es decir, sus moléculas se disocian en componentes cargados positiva y negativamente que tienen la propiedad de conducir la

corriente eléctrica. Si se coloca un par de electrodos en una disolución de un electrolito (o compuesto ionizable) y se conecta una fuente de corriente continua entre ellos, los iones positivos de la disolución se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia el positivo. Al llegar a los electrodos, los iones pueden ganar o perder electrones y transformarse en átomos neutros o moléculas; la naturaleza de las reacciones del electrodo depende de la diferencia de potencial o voltaje aplicado.

### 2.5.1 ELECTRÓLISIS DEL AGUA.

El fenómeno de la electrolisis consiste en provocar una reacción no espontánea de reducción-oxidación mediante aplicación, por medio de una fuente de corriente eléctrica continua, de una diferencia de potencial tal que suministre la energía necesaria para que ocurra el fenómeno químico.

La reacción de descomposición del agua para dar hidrógeno y oxígeno gaseosos no se produce de manera espontánea, sino que es necesario aplicar una energía correspondiente al cambio de energía libre de Gibbs, que en condiciones estándar toma el valor:  $\Delta G^\circ = 474.4 \text{ KJ/mol}$

Por tanto, la ruptura de la molécula de agua por vía electroquímica requiere aplicar un potencial eléctrico mínimo en la celda electrolítica ( $E_{\text{equilibrio}}$ ) para vencer el valor de  $\Delta G$  en unas condiciones dadas.

El potencial de celda necesario se relaciona con la energía libre de Gibbs mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta G = -n_{\text{mol}} \cdot F \cdot E_{\text{equilibrio}} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

En la Figura 2.15 puede verse un esquema de un sistema electrolítico básico. Consta de una fuente de alimentación encargada de generar un paso neto de corriente entre dos conductores, llamados electrodos, en contacto con una disolución que contiene los reactivos

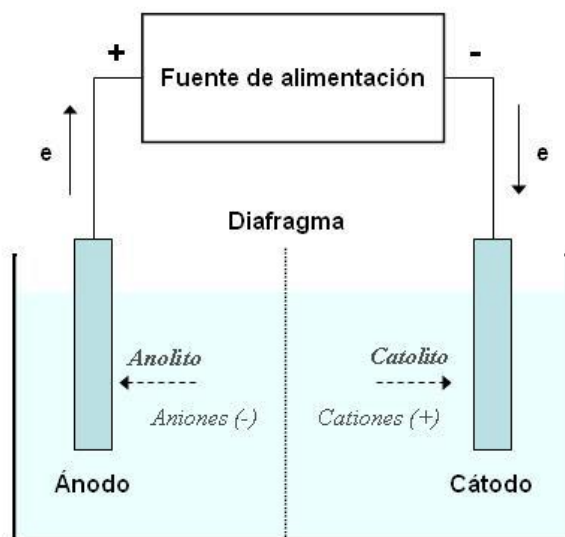
susceptibles de oxidarse (anolito) y reducirse (catolito). Así, gracias al potencial eléctrico aplicado por la fuente se genera un flujo de electrones desde el electrodo positivo (ánodo) hacia el electrodo negativo (cátodo) a través de un circuito eléctrico externo.

La reacción de reducción en la que una especie química gana electrones se produce por tanto en el cátodo, mientras que la reacción de oxidación con pérdida de electrones por parte de un elemento se produce en el ánodo.

Para mantener el balance de cargas en el sistema es necesario que exista también un transporte electrónico dentro de la celda electrolítica. Dicho transporte se consigue mediante la introducción de un electrolito que aporta al medio de reacción iones cargados positiva y negativamente. Los aniones transportan las cargas eléctricas negativas hacia el ánodo y los cationes transportan las cargas eléctricas positivas hacia el cátodo, completando de esta forma el circuito de corriente eléctrica.

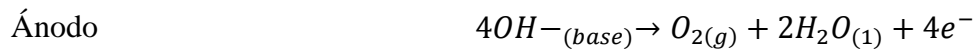
Finalmente la celda electrolítica suele constar de un diafragma que separa los productos de la reacción redox, para evitar su posible recombinación.

**Figura 2. 15 Sistema electrolítico**

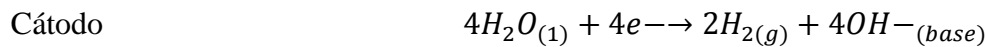


En el caso de la electrolisis de agua generalmente se adiciona una base que actúa como electrolito y proporciona al medio de reacción los iones necesarios para aumentar la conductividad del medio.

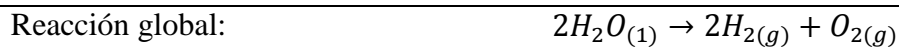
En medio alcalino, las reacciones que se producen en ambos electrodos son:



(oxidación):



(reducción):



Este método de producción de hidrogeno es el menos utilizado por su gran coste en energía eléctrica.

Debe de tenerse en cuenta la resistencia del baño electrolítico al paso de la corriente y la polarización de los electrodos para incrementar el valor del voltaje a aplicar.

Se mejora el rendimiento aumentando la temperatura y la presión siendo otros factores importantes: la conductividad electrolítica del baño y la densidad de corriente (I/S)

## 2.5.2 TIPOS DE ELECTROLIZADORES

### ➤ Electrolizadores alcalinos.

Emplea un baño alcalino de KOH al 30% con electrodos de Fe (cátodo) y Fe+Ni (ánodo).

- ✓ Unipolares: formados por el tanque con electrolito y dos electrodos separados por una membrana de amianto.

- ✓ Bipolares: formado por electrodos Fe (2 o más) en serie, ligeramente ondulados para aumentar su superficie y entre los electrodos una membrana de amianto. Se obtiene un H de menor pureza pero el rendimiento es mejor.

➤ **Electrolizadores de membrana de intercambio protónico.**

Se utiliza como electrolito una membrana sólida de una resina intercambiadora de protones. Los electrodos son de platino. Es un sistema reversible, pudiéndose emplear como pila combustible.

➤ **Electrolizadores cerámicos de alta temperatura.**

Utiliza como electrolito compuestos cerámicos conductores de iones oxilo( $O^-$ ) que atraviesan el material cerámico descargándose en el ánodo. Los electrones suelen ser de platino.

## 2.6 ANALISIS ENERGÉTICO EN LA ELECTROLISIS

### 2.6.1 LAS LEYES DE FARADAY DE LA ELECTRÓLISIS

Cuando una corriente eléctrica se hace pasar por una célula, esta puede causar reacciones químicas que ocurren en sus electrodos. Este proceso se denomina electrólisis y la celda en la que se produce se llama una célula electrolítica. En la década de 1830, el científico Inglés Michael Faraday estudio las reacciones que tienen lugar en los electrodos de celdas electrolíticas y como resultado formulo dos leyes que explican el fenómeno.

Declaraciones de las leyes

1<sup>o</sup> Ley de electrólisis - La masa de una sustancia en una alteración del electrodo durante la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida en ese electrodo. Cantidad de electricidad se refiere a la carga eléctrica, normalmente medida en culombios, y no a la corriente eléctrica.

2<sup>a</sup> Ley de electrólisis - Para una cantidad determinada de electricidad (carga eléctrica), la masa de un elemento material alterado en un electrodo es directamente proporcional a la del elemento de peso equivalente. El peso equivalente de una sustancia es su masa molar dividida por un número entero que depende de la reacción sufrida por el material.

La primera parte no es difícil de comprender. Una corriente de mucha intensidad que circule a través del electrolito durante mucho tiempo depositará más sustancia que una corriente débil que actúe durante un tiempo corto. La segunda parte dice que cuando la misma corriente circula durante el mismo tiempo, las cantidades de sustancia depositadas dependerán de su peso equivalente. El peso equivalente de una sustancia es el número de unidades de peso de una sustancia que se combinarán con una unidad de peso de hidrógeno.

En una molécula de agua, dos moléculas de hidrógeno, cada una de las cuales pesa una unidad, se combinan con un átomo de oxígeno, que pesa dieciséis unidades. De modo que si dos unidades de hidrógeno se combinan con dieciséis unidades de oxígeno, una unidad de hidrógeno lo hará con ocho unidades de oxígeno. El peso equivalente del oxígeno es, entonces, ocho, de manera que durante la electrólisis del agua se libera, en peso, ocho veces más oxígeno que hidrógeno. Cuanto mayor sea el peso equivalente de un elemento, tanto mayor será el peso de él, que se depositará durante la electrólisis.

### **Forma matemática**

Las leyes de Faraday se pueden resumir en la siguiente ecuación.

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

**Ecuación 2. 16**

La cantidad de electricidad o carga contenida en una corriente por un tiempo determinado se puede calcular:

Donde

$$Q = I (t)$$

Q = cantidad de electricidad o carga en culombios (C)

I = corriente en amperios (A)

t = tiempo (segundos)

La constante de Faraday, F, es la cantidad de electricidad transportada por un mol de electrones.

F = Número de Avogadro x carga de electrones en culombios

$$F = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \times 1.602192 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$F = 96,485 \text{ C mol}^{-1}$$

Este suele ser redondeado a 96,500 C mol<sup>-1</sup> para los cálculos de la química.

m: es la masa de la sustancia en un electrodo modificado

M: es la masa molar de la sustancia

Z: es el número de valencia de los iones de la sustancia (los electrones transferidos por iones)

Tenga en cuenta que M / z es el mismo que el peso equivalente de la sustancia alterada.

De la primera ley de Faraday, F, M, y z son constantes, de modo que cuanto mayor sea el valor de la Q será mayor.

Para la segunda ley de Faraday, Q, F, y z son constantes, de modo que cuanto mayor sea el valor de m / z (equivalente de peso), mas grande será “m”.

En el simple caso de la electrólisis de corriente directa, Q = I t

$$m = \frac{It}{F} \cdot \frac{M}{z} \quad \text{Ecuación 2. 17}$$

Y luego

$$N = \frac{It}{F} \cdot \frac{1}{z} \quad \text{Ecuación 2. 18}$$

Dónde

$N$ : es la cantidad de sustancia ("número de moles") alterado:  $N = m / M$

$t$ : es el tiempo total de la corriente constante se aplicó.

Estas ecuaciones se pueden arreglar para darle un enfoque más práctico a la electrolisis como se muestra a continuación:

$$m = \frac{Q}{qn} \left( \frac{M}{N_A} \right) = \frac{1}{qN_A} \left( \frac{QM}{n} \right) = \frac{1}{F} \left( \frac{QM}{n} \right) = \frac{1}{96,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}} \left( \frac{QM}{n} \right) \quad \text{Ecuación 2. 19}$$

Donde:

$m$  es la masa de la sustancia producida en el electrodo (en gramos),

$Q$  es la carga eléctrica total que pasó por la solución (en Culombios),

$q$  es la carga del electrón =  $1.602 \times 10^{-19}$  culombios por electrón,

$n$  es el número de valencia de la sustancia como ion en la solución (electrones por ion),

$F = qN_A = 96,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$  Es la Constante de Faraday,

$M$  es la masa molar de la sustancia (en gramos por mol),

$N_A$  es el Número de Avogadro =  $6.022 \times 10^{23}$  iones por mol.

En el más complicado caso de una variable de la corriente eléctrica, el total de carga  $Q$  es la corriente eléctrica  $I(\tau)$  integrado en el tiempo  $\tau$ :

$$Q = \int_0^t I(\tau) d\tau \quad \text{Ecuación 2. 20}$$



Aquí  $t$  es el tiempo total de la electrólisis. Tenga en cuenta que el paréntesis en el punto I ( $\tau$ ) no indican multiplicación, sino más bien que la actual es una función de tiempo,  $\tau$ .

## 2.6.2 ENFOQUE TERMODINAMICO

El análisis termodinámico nos permite determinar las características termodinámicas de un sistema bajo estudio, donde un sistema es la región o conjunto de materia en el espacio que es seleccionada para su análisis.

El análisis termodinámico de sistemas, utiliza los principios de conservación de masa y de la energía, para cuantificar la interacción del sistema con su entorno, consigo mismo o con otro sistema, cuando se analizan procesos industriales compuestos por un número específico de equipos interconectados entre sí. En términos generales, el análisis termodinámico permite cuantificar las transferencias de energía, a través de interacciones de calor y trabajo, así como las transferencias de masa cruzando sus fronteras, cuando el sistema se encuentra en un estado específico para su análisis.

El análisis aplicado a un sistema abierto (figura 2.16), también denominado volumen de control, desde el punto de vista termodinámico, establece las siguientes formulaciones para los principios de conservación de masa y energía, respectivamente:

$$\sum_{in} \dot{m}_i - \sum_{out} \dot{m}_e = \frac{dm_{vc}}{dt} \quad \text{Ecuación 2. 21}$$

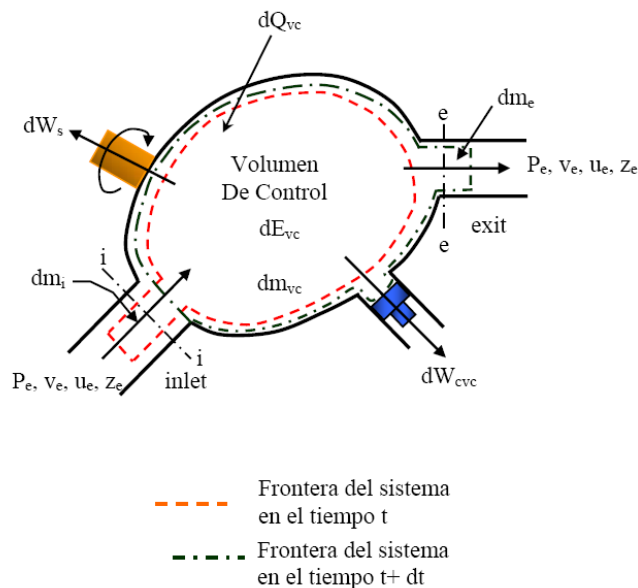
$$Q - W_{net} + \sum_{in} \dot{m}_i \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_i - \sum_{out} \dot{m}_e \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_e = \frac{dE_{vc}}{dt} \quad \text{Ecuación 2. 22}$$

Por otro lado, la propiedad de la entropía, está relacionada a la segunda ley de la termodinámica. La entropía puede ser una cantidad positiva, o cero. La limitación de

positividad está relacionada a la generación de entropía, esta definición es utilizada cuando se analizan procesos irreversibles. Solamente la energía y la masa están sujetas a balance, la entropía no está sujeta a balance y su representación matemática toma la siguiente forma:

$$\dot{S}_{gen} = \frac{dS_{vc}}{dt} - \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_i \dot{m}_i s_i \geq 0 \quad \text{Ecuación 2. 23}$$

**Figura 2. 16 Volumen de control para un sistema abierto**



Considerando un sistema abierto operando bajo condición de estado estacionario (Figura 2.16) implica que las propiedades del sistema como densidad, energía específica y entropía específica no cambian con el tiempo. Sin embargo, tales propiedades pueden variar espacialmente de un punto a otro dentro del volumen de control. En consecuencia, si el sistema opera de esta forma, los términos de la forma  $d/dt = 0$ , en las ecuaciones 2.21 a 2.23 desaparecen y, toman la forma siguiente:

$$\sum_{in} \dot{m}_i = \sum_{out} \dot{m}_e \quad \text{Ecuación 2. 24}$$

$$\dot{Q} - \dot{W}_{net} = \sum_{out} \dot{m}_e \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_e - \sum_{in} \dot{m}_i \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_i \quad \text{Ecuación 2. 25}$$

$$\dot{S}_{gen} = \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} \geq 0 \quad \text{Ecuación 2. 26}$$

Las ecuaciones 2.24 y 2.25 constituyen las ecuaciones de conservación y son la herramienta principal para analizar sistemas abiertos, que son los sistemas que caracterizan a un gran número de procesos industriales.

### 2.6.2.1 PROCESOS IRREVERSIBLES

Las relaciones establecidas por la primera y segunda ley de la termodinámica, para el análisis de un sistema en particular, han sido obtenidas en base a premisas en las cuales el sistema, para pasar desde un estado inicial a otro final, pasa por una serie de estados de equilibrio, los cuales son idealizaciones que facilitan describir en términos matemáticos los procesos reales, es decir los procesos irreversibles.

La irreversibilidad de un proceso es establecida en la ecuación 2.26, a través de la segunda ley de la termodinámica, en consecuencia un proceso irreversible está inevitablemente asociado a un incremento en la generación de entropía del sistema bajo análisis.

El objetivo final en el análisis de un sistema utilizando los principios de la segunda ley de la termodinámica es ser capaz de reconocer las irreversibilidades, evaluar su influencia y, desarrollar los medios efectivos para reducirlas. La exergía es una propiedad termodinámica que está presente cuando se analizan procesos reales, es decir procesos irreversibles.

### 2.6.2.2 CRITERIO DE GIBBS

La segunda ley de la termodinámica, aplicada a las reacciones químicas, establece que las reacciones espontáneas incrementan la entropía del universo. Para poder determinar la espontaneidad de una reacción, es preciso recurrir al concepto de energía libre, de Gibbs, el cual se define matemáticamente como:

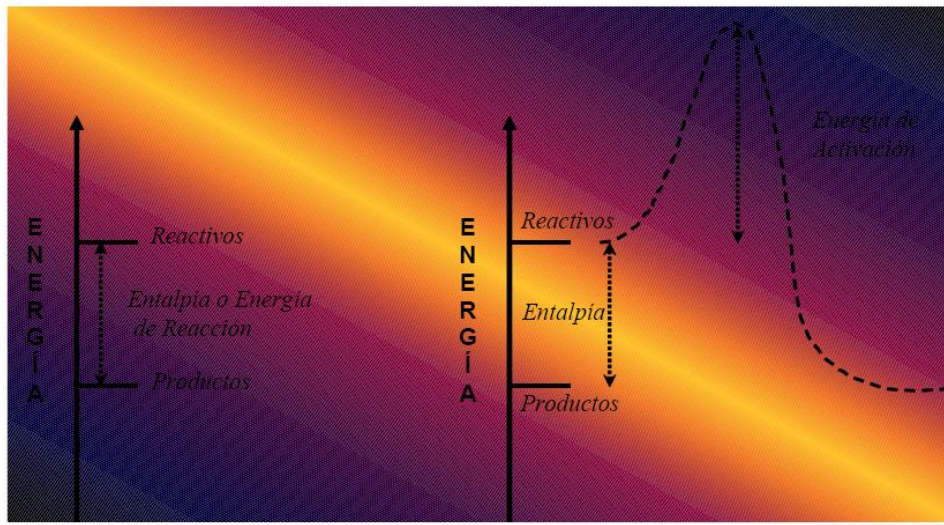
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

**Ecuación 2. 27**

Cuando  $\Delta G = (-)$  Reacción Espontánea  
 $\Delta G = 0$  Coexisten Productos y Reactivos  
 $\Delta G = (+)$  Reacción Inducida

En donde “ $\Delta S$ ” representa el cambio en el orden del sistema y T la temperatura. Cuando  $\Delta G$  es negativo, la reacción será espontánea; cuando es positivo, la reacción no ocurrirá, salvo que se adicione energía al sistema desde los alrededores. No obstante, debe tenerse en cuenta el concepto de “energía de activación”, ilustrado mediante la (figura 2.17).

Figura 2. 17 Energía de activación necesaria en una reacción química



### 2.6.3 EXERGÍA

Los diferentes tipos de energía presentan también diferentes calidades. Estas diferencias radican en la posibilidad de producir trabajo o de transformar un tipo de energía en otro.

Por ejemplo, la calidad del calor depende de su temperatura; a mayor temperatura, una fuente de calor puede transferir su energía con más posibilidades que a menor temperatura.

En general, se acepta como medida de la calidad de la energía, su capacidad para producir trabajo. El problema con esta definición es elegir el nivel de referencia adecuado. Hay que tener en cuenta, que para que una máquina térmica realice trabajo, debe tomar calor desde una fuente a alta temperatura, y ceder parte de ese calor a un sumidero a baja temperatura.

Si la temperatura (fría) del sumidero es muy alta, muy pocas fuentes tendrán la temperatura necesaria como para que una máquina térmica puede transformar el calor de esta fuente en trabajo. Por tanto el nivel de referencia (es decir, el valor de la temperatura fría) es muy importante a la hora de definir la exergía. Como es habitual que las máquinas térmicas

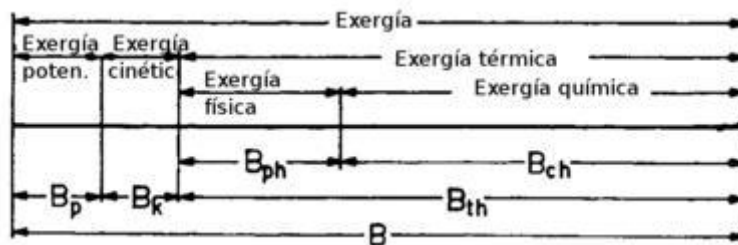
trabajen con el medio que las rodea como foco frío, se suele tomar el nivel de referencia en la temperatura ambiente.

Por tanto, a la hora de calcular la exergía es necesario especificar cuál es el entorno en el que trabaja la máquina térmica. Debido a la falta de un equilibrio termodinámico en la naturaleza, no se puede especificar completamente cuál es el estado de referencia (debido a que, como ya se ha dicho, las condiciones del medio son cambiantes). Normalmente, es suficiente con definir el estado de equilibrio mediante la temperatura.

La capacidad de un medio energético para realizar trabajo expresa su potencial para transformarse en otros tipos de energía, y por tanto la exergía puede aplicarse al estudio de procesos tecnológicos además de plantas de energía, ciclos termodinámicos, máquinas, etc.

A diferencia de la energía, no existe una ley de conservación para la exergía. Cualquier fenómeno irreversible causa una pérdida de exergía, lo que conlleva una reducción del potencial de los efectos útiles de la energía, o por el contrario a un aumento del consumo de energía proporcionado por el foco caliente (para lograr una generación de trabajo igual).

**Figura 2. 18 Componentes de la exergía de una sustancia**



Si excluimos los efectos nucleares, magnéticos y eléctricos, la exergía, B, de una sustancia se puede dividir en cuatro componentes: exergía cinética B<sub>k</sub>, exergía potencial B<sub>p</sub>, exergía física B<sub>ph</sub> y exergía química B<sub>ch</sub>. La exergía cinética es igual a la energía cinética cuando la velocidad tiene como nivel de referencia la superficie de la Tierra. Lo mismo ocurre con la exergía potencial. En la figura se muestran los diferentes tipos de exergía.

$$B = B_k + B_p + B_{ph} + B_{ch}$$

**Ecuación 2. 28**

La exergía física es el trabajo que se puede obtener sometiendo a la sustancia a procesos físicos reversibles desde la temperatura y presión iniciales, hasta el estado determinado por la presión y la temperatura del entorno.

La exergía química es el trabajo que se puede obtener de una sustancia que se encuentra a la presión y temperatura del entorno, si alcanza un estado de equilibrio termodinámico mediante reacciones químicas.

En ocasiones, a la suma de la exergías física y química se le denomina *exergía térmica*,  $B_{th}$ .

$$B_{th} = B_{ph} + B_{ch}$$

**Ecuación 2. 29**

La diferencia entre los balances de exergía y energía, es basada en el hecho que el balance de energía establece la ley de conservación de energía, mientras que el de exergía establece la ley de degradación de la energía.

De la misma forma en que se analiza un sistema abierto (volumen de control), a través de un balance de energía, los mismos criterios aplican a los balances de exergía. En ambos, tres tipos de transferencia de energía atraviesan la superficie de control, estas son:

- ✓ Transferencia de trabajo.
- ✓ Transferencia de calor.
- ✓ Transferencia de energía asociada a la transferencia de masa.

### **2.6.3.1 BALANCE DE EXERGÍA EN SISTEMAS ABIERTOS**

Desde el punto de vista de la obtención del trabajo máximo que podemos obtener de un sistema termodinámico, uno de los sistemas se considera el universo, y otro nuestro dispositivo. En general, como el universo es muy grande respecto a nuestro sistema se aplican las siguientes simplificaciones, el estado muerto no varía con la cesión de energía

de nuestro sistema y como universo se toma el medio ambiente que rodea a nuestro sistema, por ejemplo, la temperatura y la presión atmosférica del lugar en el que se encuentra nuestro sistema (densidad y temperatura del aire que rodea el motor de un vehículo).

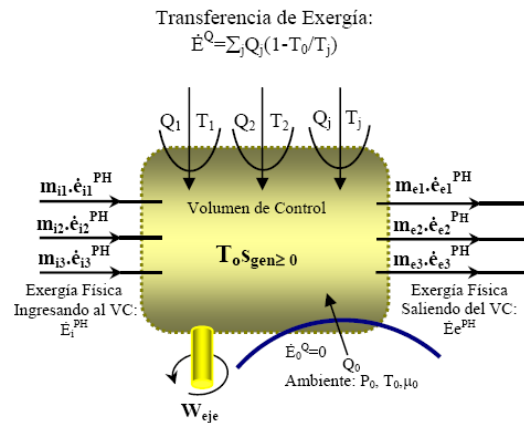
En realidad un balance de exergía no es más que la combinación de un balance de energía y de entropía, que derivan a su vez del primer y segundo principio de la termodinámica. No es por tanto un resultado independiente, pero puede utilizarse como formulación alternativa de la segunda ley de la termodinámica.

Como alternativa al principio de incremento de entropía, se puede formular la segunda ley estableciendo que, los únicos procesos que puede experimentar un sistema aislado son aquellos en los que la exergía del sistema disminuye.

Para sistemas abiertos, en los que hay transferencia de masa, se maneja el concepto de exergía de flujo, que no es más que la exergía asociada a una corriente material que atraviesa un volumen de control determinado.

Así como la masa, energía y entropía, la exergía también es una propiedad, entonces ésta puede ser transferida hacia dentro o hacia fuera del volumen de control cuando las corrientes de materia ingresan y salen de él (Figura 2.19).

**Figura 2. 19 Flujos de exergía asociados a un volumen de control**





Teniendo en cuenta el volumen de control mostrada en la Figura 2.19, se desarrolla la expresión para el balance de exergía a través de la combinación de las expresiones para los balances de energía (Ecuación 2.21) y entropía (Ecuación 2.22).

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{vc} - p_0 \frac{dV_{vc}}{dt}\right) + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_i \dot{m}_e e_e - E_D \quad \text{Ecuación 2.30}$$

El término del lado izquierdo de la ecuación 2.30 representa la razón de tiempo de cambio en la exergía del volumen de control, el término  $\dot{Q}_j$  representa la razón de tiempo de la transferencia de calor ubicada sobre la frontera del volumen de control donde la temperatura instantánea es  $T_j$ . La ecuación 2.30 puede ser expresada en términos de la variable exergía.

Exergía asociada a la transferencia de calor:

$$\dot{E}_{q,j} = \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j \quad \text{Ecuación 2.31}$$

Exergía asociada a la transferencia de trabajo y trabajo de flujo:

$$\dot{E}_w = \dot{W}_{vc} - p_0 \frac{dV_{vc}}{dt} \quad \text{Ecuación 2.32}$$

Exergías asociadas a las corrientes de materia ingresando y abandonando el volumen de control:

$$\dot{E}_i = \dot{m}_i e_i \quad \text{Ecuación 2.33}$$

$$\dot{E}_e = \dot{m}_e e_e \quad \text{Ecuación 2.34}$$

La razón de tiempo de la destrucción de exergía debido a las irreversibilidades dentro del volumen de control:

$$\dot{E}_D = T_0 \dot{S}_{gen} \quad \text{Ecuación 2. 35}$$

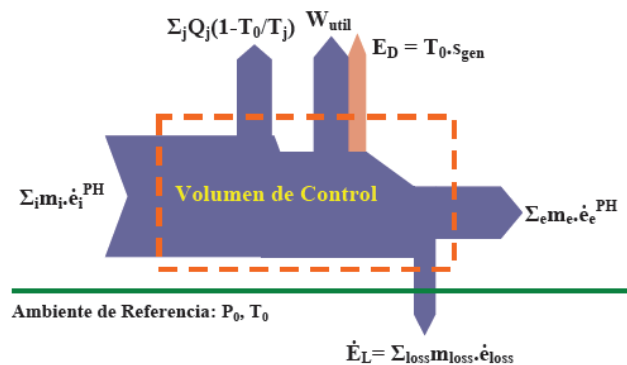
Utilizando las ecuaciones 2.30 a 2.35 para analizar el volumen de control bajo la condición de estado estable ( $dE_{vc}/dt = 0$ ), la ecuación 2.30 toma la forma:

$$0 = \sum_j \dot{E}_{q,j} - \dot{E}_w + \sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e - \dot{E}_D \quad \text{Ecuación 2. 36}$$

La ecuación 2.36 establece que la razón a la cual la exergía es transferida hacia el volumen de control excede a la razón a la cual la exergía abandona el mismo, la diferencia entre las dos es la exergía destruida en el interior del volumen de control, debido a las irreversibilidades.

En otras palabras el balance de exergía establece la ley de degradación de la energía, una representación ilustrativa de este balance es mostrado en la figura 2.20.

**Figura 2. 20 Diagrama de exergía**



El término definido como destrucción de exergía debido a las irreversibilidades internas del sistema (ecuación 2.35) es conocido también como el Teorema de Gouy-Stodola. Este

teorema establece que la razón de destrucción de irreversibilidades de un proceso es proporcional al producto de la razón de la producción de entropía de todo el sistema por la temperatura ambiente. Kotas expresa el teorema de la siguiente forma:

$$\dot{I} = T_0 \left( \sum_{\text{out}} \dot{m}_e s_e - \sum_{\text{in}} \dot{m}_i s_i - \sum_r Q_r \right) \quad \text{Ecuación 2. 37}$$

La ecuación 2.37 en combinación con las ecuaciones para los balances de masa, energía y entropía se convierten en las herramientas para analizar sistemas abiertos o procesos industriales, desde el punto de vista termodinámico.

### 2.6.3.2 CRITERIOS DE EFICIENCIA UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS DE EXERGÍA

Desde el punto de vista del análisis de exergía, todo sistema abierto interactúa con su entorno a través de flujos de exergía, los cuales se encuentran asociados de manera directa o indirecta a combustibles fósiles o a alguna otra forma de recursos energéticos. En consecuencia su uso genera destrucción y pérdida de su exergía durante la operación del sistema, que no es sino la destrucción y pérdida del recurso energético. Bejan, establece que el análisis de exergía involucra el cálculo de medidas de rendimiento en un sistema termodinámico, a través de los siguientes parámetros:

1. Eficiencia exergética.
2. Razón de destrucción de exergía.
3. Razón de pérdida de exergía.

## 1. Eficiencia exergética:

La eficiencia exergética es un parámetro importante utilizado en el análisis de exergía, para su utilización es necesario identificar los flujos de materia que interactúan con el sistema, una es el denominado “producto” y la otra el “fuel”. El criterio “producto” debe ser consistente con la función para la que ha sido construido el sistema. Mientras que el criterio “fuel” debe plasmar la representación de los recursos energéticos utilizados para generar el producto en el sistema y, no necesariamente debe ser un combustible real (gas, petróleo o carbón); tanto el “producto” como el “fuel” están expresados en términos de exergía.

Si tenemos, en forma general, a un sistema operando en estado estable y, es analizado con base exergética (Figura 2.20), la razón a la cual el combustible,  $\dot{E}_f$ , es suministrado y el “producto”,  $\dot{E}_p$ , es generado, este sistema es definido a través del análisis de exergía como:

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad \text{Ecuación 2. 38}$$

Bajo estas definiciones, la eficiencia exergética,  $\varepsilon_{ex}$ , es la razón entre el producto y el combustible:

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F} \quad \text{Ecuación 2. 39}$$

La eficiencia exergética muestra qué porcentaje de la exergía del combustible suministrada al sistema es encontrada en la exergía del “producto”.

## 2. Razones de destrucción y pérdida de exergía:

Los valores de la razón de destrucción de exergía  $E_D$  y de pérdida de exergía  $E_L$  proporcionan la medida termodinámica de las ineficiencias del sistema. A partir de este tipo de mediciones se generan las denominadas razones de destrucción de exergía  $y_D$ ,  $^*y_D$  y la razón de pérdida de exergía  $y_L$

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{F,tot}} \quad \text{Ecuación 2. 40}$$

$$y_D^* = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{D,tot}} \quad \text{Ecuación 2. 41}$$

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_{F,tot}} \quad \text{Ecuación 2. 42}$$

Como mencionamos anteriormente, el proceso o sistema a ser analizado puede ser subdividido en sub sistemas, con el objeto de facilitar el análisis, entonces con la ecuación 2.40 se está realizando la comparación de la destrucción de la exergía de un componente del sistema contra la razón de exergía del combustible o recurso energético suministrado al sistema total. En la ecuación 2.41 se realiza la comparación de la destrucción de la exergía de un componente del sistema contra la destrucción total de exergía dentro del sistema, el mismo criterio es aplicado a la ecuación 2.42.

Desde el punto de vista de las razones de exergía, la reducción en la eficiencia total del sistema, causada por la destrucción y pérdida de exergía es:

$$\varepsilon_{ex} = 1 - \sum y_D - \sum y_L \quad \text{Ecuación 2. 43}$$

La ecuación 2.43 es utilizada para determinar la eficiencia total de un sistema que está formado por un número grande de equipos, de los cuales se pueden determinar sus respectivas razones de destrucción y perdida de exergía.

Otros dos parámetro importantes utilizados en la evaluación del funcionamiento de sistemas es la efectividad ( $\varepsilon$ ) y la “mejora potencial” ( $P_{tm}$ ).

La efectividad de un sistema es definida a partir de la irreversibilidad del sistema y es una medida de cuán bien el sistema es capaz de producir un incremento deseado de exergía, se expresa como:

$$\varepsilon = 1 - \frac{Irr}{Exergia\ Neta\ Suplida} \quad \text{Ecuación 2. 44}$$

La denominada “mejora potencial” de un sistema es una medida de cuánto y con qué facilidad el sistema puede ser mejorado para propósitos de optimización y es obtenida a partir de irreversibilidad y la efectividad del sistema, se define como:

$$Ptm = Irr \cdot (1 - \varepsilon) + E_{efl} \quad \text{Ecuación 2. 45}$$

La ecuación (2.45) está formada por tres tipos de contribuciones. El potencial relativo ( $1 - \varepsilon$ ) que es una medida de con qué facilidad puede ser mejorado; si la efectividad es muy baja el potencial relativo alcanza un valor alto, entonces el sistema puede ser mejorado con bastante facilidad. El potencial absoluto ( $I_{rr}$ ) es una medida de cuanto un sistema puede ser mejorado. Por último el potencial ambiental ( $E_{efl}$ ) es la medida de cuanto un sistema puede ser mejorado si se utilizan los flujos de exergía perdidos por el sistema en lugar de expulsar sus exergías al medio ambiente.

### 3. BANCO DE ELECTROLIZADORES

Este capítulo tratara de explicar con un poco de más detalle las características de diseños de diferentes electrolizadores extraídos de diversas fuentes consultadas.

Un electrolizador es básicamente un recipiente que aloja dentro de sí un juego de platinas que funcionan como electrodos, dichas platinas están sumergidas en agua, se hace pasar una corriente continua a través de los electrodos y esta descompone el agua en hidrogeno y oxigeno el cual se extrae por medio de tuberías colocadas para tal propósito.

El desempeño y eficiencia de un electrolizador depende de muchos factores, entre ellos de la buena actividad electro-catalítica y estabilidad de los electrodos, así como de la buena conductividad iónica, pero la eficiencia y desempeño de un electrolizador depende también de la geometría de la celda, y de parámetros tales como la separación entre los electrodos, forma de los mismos, diseño de las tuberías de salida de los gases, el tipo de conexiones eléctricas de los electrodos, etc. En general y resumiendo, la ingeniería del diseño de un dispositivo de esta naturaleza ejerce fuerte impacto en el desempeño del mismo. Mención aparte merece la seguridad que se debe guardar dentro de un electrolizador y el grado de pureza que se quiere obtener de los gases producidos ( $H_2$  y  $O_2$ ).

Todo esto convierte al electrolizador en un sistema de tamaño considerable, sofisticado y complejo, que debe cumplir ciertas exigencias y estándares.

Una explicación simplificada de los sistemas que funcionan con generadores de oxihidrogeno es la siguiente:

Empecemos con el agua, debe ser por lo menos filtrada o destilada. Cuando al agua se le introduce una corriente eléctrica, esta tiene la tendencia de dividirse en sus elementos base; hidrógeno y oxígeno. El agua debe tener un electrolito que ayude a mejorar su conductancia.

Al aplicar corriente al agua con el electrolito, el agua se descompone en  $H_2$  y  $O_2$ . Este se introduce al motor usando su vacío natural. Se combina el oxihidrogeno con gasolina y el aire en la cámara de combustión y se quema. Una vez quemado, se convierte de nuevo en agua. Este va a absorber el calor del interior del motor normalmente a 350 - 400 °F y se convierten en vapor. Entonces se empuja afuera de la recamara durante el escape de los gases por las válvulas colocadas para este fin. Allí se condensa de nuevo en agua para ser expulsada por el tubo de escape del vehículo.

Se produce vapor de agua debido a que el combustible (gasolina) produce suficiente calor durante la combustión para mantener el oxihidrogeno quemado en un estado de vapor de

agua, pero luego se condensa en agua totalmente fuera del sistema de escape y así se elimina cualquier posibilidad de corrosión interna.

➤ **Por que utilizar un generador en un motor de combustión interna**

Uno de los objetivos más importantes de los diseñadores de equipos para automóviles es incrementar el kilometraje en relación al combustible consumido sin sacrificar las demandas de bajar las emisiones dañinas que ellos generan.

Debido a que los motores de combustión interna tienen muy baja eficiencia mucha de la energía que se le suministra en forma de combustible se pierde en trabajo no útil, por eso lo más conveniente es buscar alternativas de suministro de combustible lo cual probablemente de una mayor eficiencia al motor.

Una opción es alimentar el motor con una mezcla de gas de hidrogeno y oxigeno llamado oxihidrogeno junto con el aire de alimentación del motor, tal dispositivo se llama “generador” o “electrolizador” con el cual no solo aumentara la combustión del combustible sino que extraerá un porcentaje mayor de energía del mismo y las emisiones generadas serán mucho menos dañinas que si funcionara sin este dispositivo. A todo esto sumemos que el motor tendrá mayor potencia de salida y no se generaran residuos de carbón dentro del motor, los cuales son muy perjudiciales para mantener la eficiencia de diseño del motor.

Se debe aclarar que quemar gas oxihidrogeno dentro del motor no causara problemas más grandes que los que causan los derivados del petróleo, ya que los hidrocarburos son realmente un compuesto de hidrogeno y carbón que se rompe para ser quemado dentro del motor. En realidad la parte dañina del hidrocarburo es el carbón ya que produce dióxido de carbono, monóxido de carbono y depósitos físicos de carbón dentro del motor.

Así que las mejoras que podríamos esperar en el incremento del kilometraje de un automóvil utilizando un generador para suministrarle oxihidrogeno podrían ir desde el 8%



que es el peor de los casos, 20% un resultado más alentador, 25% y 35% que es lo más común de obtener con un buen diseño y ajuste al utilizar uno de estos dispositivos.

A continuación se detallan algunos diseños de electrolizadores los cuales van desde los más básicos hasta algunos de complicada construcción, sus sistemas de alimentación de corriente y sus respectivos controles de mando.

### **3.1 PRIMER PROTOTIPO<sup>2</sup>**

Este prototipo está diseñado para aumentar el kilometraje de un automóvil, para esto utiliza energía de la batería del vehículo para romper el agua en una mezcla de gases llamada oxihidrogeno que se agrega a la corriente de aire que está siendo suministrada al motor a través del filtro.

Este generador es fácil de construir y sus componentes son relativamente baratos. Tiene un desempeño muy bueno pues produce 1.7 litros de gas por minuto con una corriente de 20 amperios.

El generador es hecho de tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro, dos tapaderas, varias placas de metal, un par de tiras de metal y algunas otras piezas menores.

Una característica importante de este diseño es que en el cuerpo de la tubería de PVC, que funciona como la carcasa o housin del generador, se instala una tubería plástica transparente que por medio de principios de manometría muestra el nivel del líquido dentro del generador sin necesidad de tener que levantar la tapadera del mismo.

Además contiene un depósito primario que no es más que un recipiente con un poco de agua en el, que funciona como una trampa de condensado. El depósito tiene el gas entrando en el fondo y burbujeando a través del agua. El gas se coloca sobre la superficie

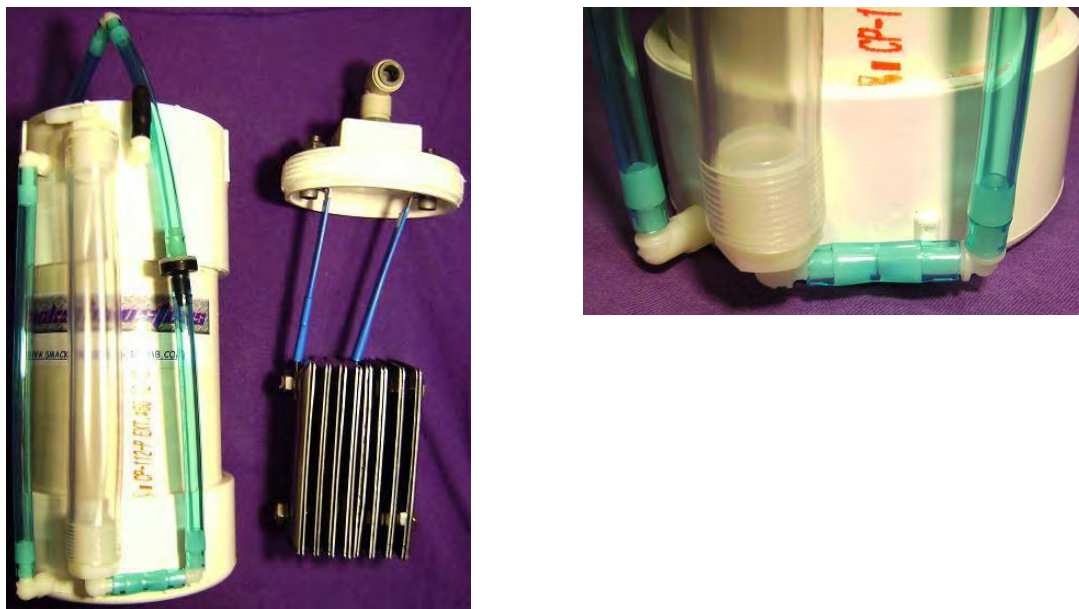
---

<sup>2</sup> Referencia de "The Smack's Booster", <http://www.smacksboosters>

del agua y entonces se puede sacar por medio de una tubería para tal propósito. Para prevenir que el agua sea arrastrada dentro del generador cuando este esté apagado o frío se coloca una válvula de sentido único entre el generador y el depósito primario.

Este depósito primario sirve también como medida de seguridad en dado caso que se produzca una chispa ya que bloqueara la llama evitando que esta atravesase por la tubería hacia el generador. Además este depósito removerá cualquier rastro de vapor de electrolito del gas listo para usar. Otra característica es que es compacto, transparente, se puede acoplar al generador, muestra el flujo de gas que viene del generador y la longitud de la tubería principal de PVC puede ajustarse para satisfacer las necesidades de espacio disponibles. La siguiente figura muestra este arreglo.

**Figura 3.1 Vista completa del prototipo y detalle del fondo**

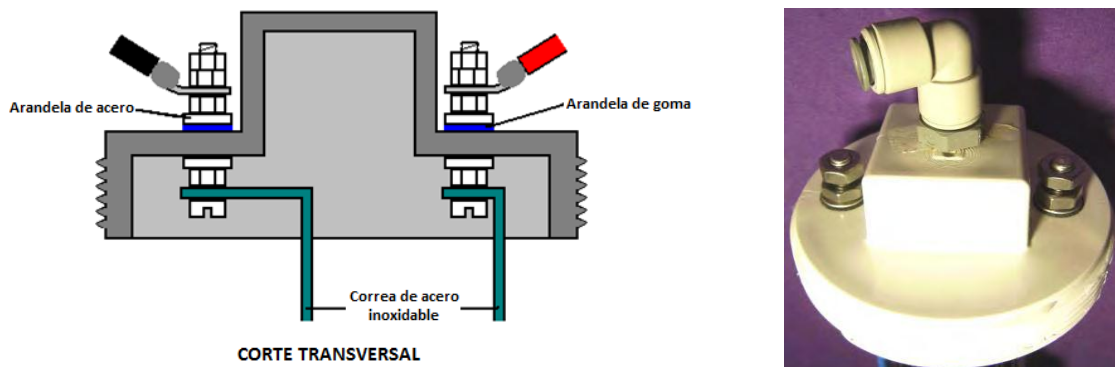


El hogar del electrolizador o la carcasa se fabrica entonces de tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro que se le da forma de depósito por medio de dos tapaderas; la del fondo que es una normal y la superior que debe ser roscada para permitir montar y extraer el arreglo de electrodos. En la tapadera superior se deben hacer tres agujeros de los cuales dos

funcionaran para hacer la conexión eléctrica y el otro como escape para instalar la tubería de suministro de gas.

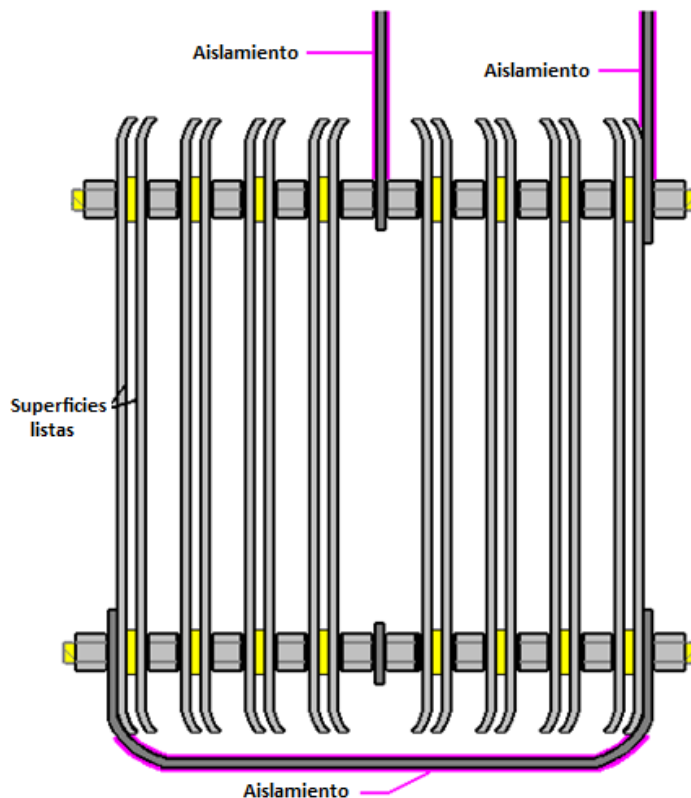
Debe tenerse muy en cuenta que la conexión externa o de suministro de corriente al electrolizador debe ser capaz de manejar como mínimo 20 amp. DC y esto incluye cualquier otro dispositivo de mando o control que debe incluirse.

**Figura 3. 2 Detalle de la tapadera superior**



Para la conexión interna del juego de electrodos se debe usar un juego de platinas que conecte los electrodos con los bornes colocados en la tapadera superior, además se debe utilizar una extra para conectar el borde negativo común en ambos extremos del juego de electrodos. Estas platinas deben estar aisladas muy bien para evitar fugas de corriente a través del electrolito. Para asegurar las platinas se utilizan dos pernos sujetos con seguridad por dentro y por fuera y además se agrega una arandela de caucho entre la pared de la tapadera para hacer sello y evitar fugas.

**Figura 3.3 Conexión interna de los electrodos**

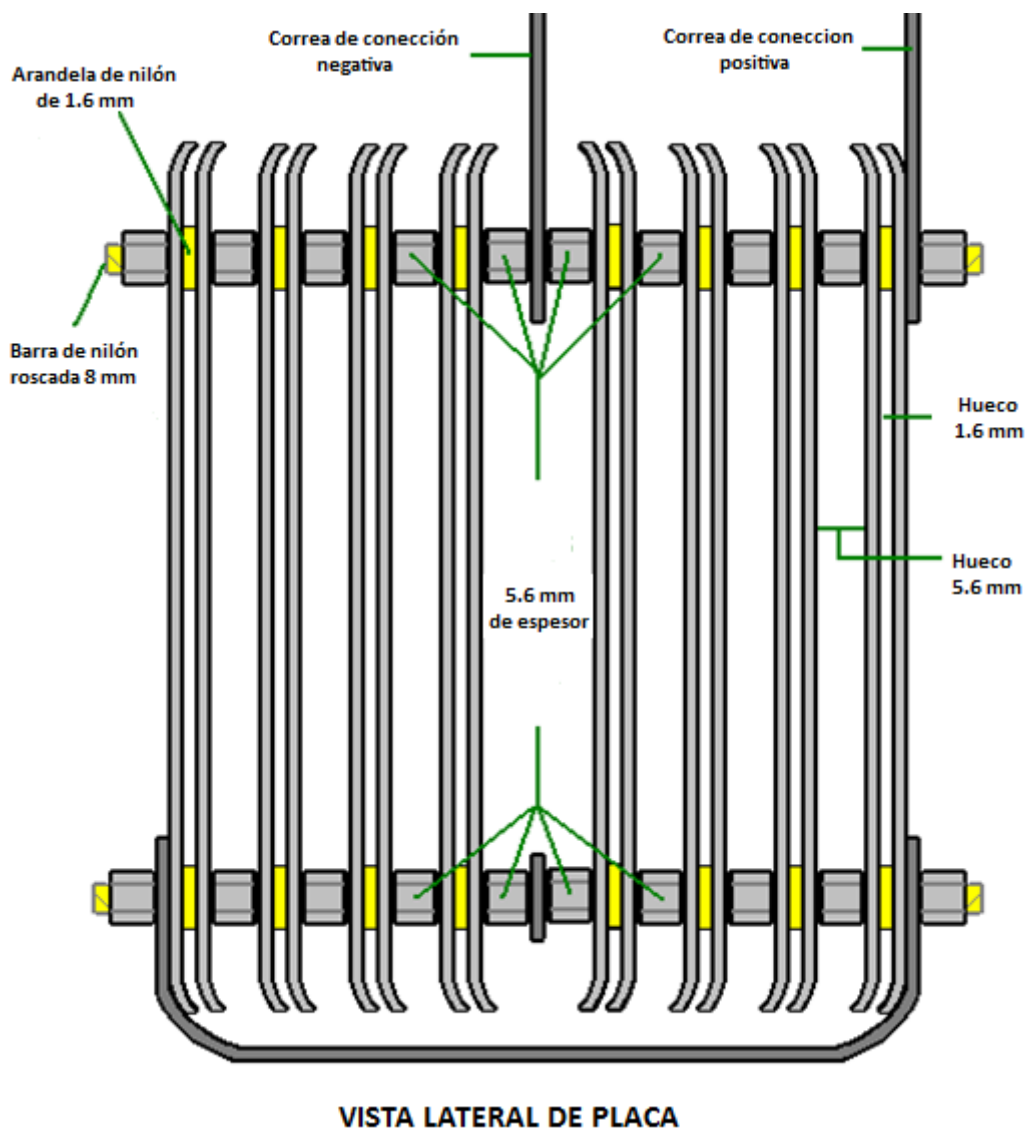


El arreglo de ocho electrodos consiste en 16 platinas de 70 mm  $\times$  115 mm y en ellas se hacen agujeros de 8 mm de diámetro para atravesar un perno de plástico que permita mantener el ensamble de las platinas haciendo una serie de ocho electrodos.

El arreglo debe tener un espacio de 1.6 mm entre cada par de electrodos, este espacio se produce por medio de pequeñas arandelas plásticas entre las caras de un par de platinas y esto debe hacerse para los ocho pares respectivamente. Esta pequeña separación de 1.6 mm entre pares de platinas es una de las más importantes pues se ha encontrado que es donde ocurre la electrolisis con más eficiencia para este diseño.

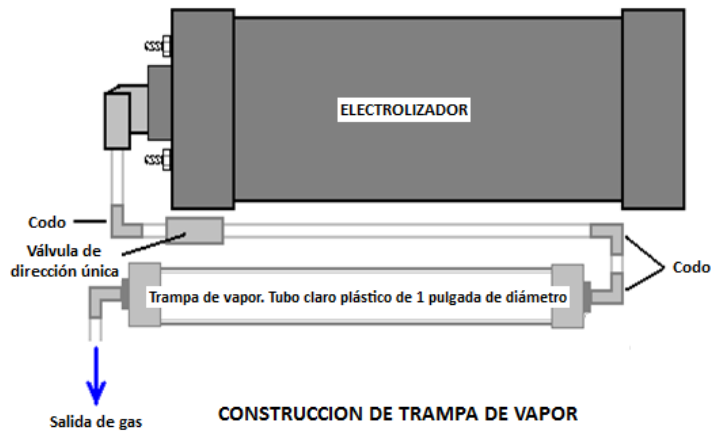
Habiendo garantizado la separación entre los pares de platinas que funcionarán como electrodos se conectan las demás con pequeños cilindros de acero de 7/32 pulgadas de longitud para que la corriente eléctrica fluya por allí y permita conectar un juego de electrodos con otros haciendo así un arreglo en serie de ocho pares de electrodos.

Figura 3. 4 Detalle de las dimensiones del arreglo de electrodos



El cuerpo del depósito primario debe ser de tubería plástica rígida transparente de 1 pulg. de diámetro y como ya se mencionó antes debe contener un poco de agua que permita hacer sello, para esto debe llenarse aproximadamente a 1/3 o 1/2 de su longitud y puede utilizarse agua común para esto. Debe contener una válvula de sentido único instalada en la tubería que va desde el electrolizador con el objetivo que impida el flujo desde el depósito hasta el hogar del electrolizador así se evitara que el agua sea aspirada dentro del generador como también los gases. La manguera de salida del gas del depósito debe ser tan corta como sea posible para reducir la cantidad de volumen de gas que pueda almacenarse en ella

**Figura 3.5 Vista del depósito conectado al electrolizador**



El ensamble final del electrolizador debe ser como se muestra aquí:

**Figura 3.6 Ensamble completo del prototipo**



### **3.1.1 EL ELECTROLITO**

El agua que utilizada para el electrolito es muy importante, existen algunas opciones aparentemente como el agua de lluvia, agua de garrafón o agua del simple grifo proveniente del suministro local. Realmente todas estas diferentes clases de agua contienen impurezas, minerales, sólidos suspendidos, etc. que son dejadas en el hogar del electrolizador cuando

el agua se convierte en gas mediante la electrolisis. Estos sólidos se ven como nata café, negra o verde sobre el agua además de causar decoloración severa al agua. La mugre que estos dejan no solo sirve para obstruir los electrodos sino que también impide el funcionamiento de la celda totalmente.

La formación de estos sólidos es acompañada por la formación de gases que se mezclan con el oxihidrogeno para formar gases de naturaleza rara que posiblemente sea muy dañina. Por estas razones solo se debe utilizar agua destilada en las celdas.

Ya que el agua destilada no puede conducir la electricidad sola, se debe añadir un electrolito. Idealmente el electrolito debería ser un catalizador que es una sustancia que facilita la electrolisis sin sufrir cambios o ser consumida en el proceso.

Por esto el bicarbonato de sosa y la sal no son una buena opción pues no son catalizadores y durante la electrolisis ellos rompen sus enlaces y se combinan con el hidrogeno y el oxigeno y forman gases tóxicos como el gas de cloro y monóxido de carbono además que utilizar estas sustancias pueden originar corrosión en los electrodos dañándolos muy rápidamente. Otro producto que no es recomendable usar es el acido ya que a pesar del incremento que este propicia en la producción de hidrogeno también aumenta la acides del agua y se dan ataques severos en los electrodos y producen algunas trazas de gases muy tóxicos.

Existen dos muy buenas opciones para utilizar como electrolito y que son simples catalizadores; el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de sodio (NaOH), estos han demostrado ser buenos catalizadores y disminuyen significativamente los daños en el sistema. Así que utilizar uno de estos dos catalizadores para combinar con el agua destilada dará un baño de celda mucho más limpio y una mezcla de oxihidrogeno mas homogénea, reduciendo los problemas del baño y dando una mejor eficiencia en la producción del gas.

Teniendo en cuenta lo anterior se debe llenar el generador solo con agua destilada 2” debajo del límite superior del depósito y agregar 12 onz (una cucharada) de KOH o NaOH al agua inicialmente. La cantidad de catalizador la determinaran las lecturas de la corriente que están demandando los electrodos junto con el electrolito siendo esta de 16 amp, cuando esta frio y aumentando a 20 amp cuando la temperatura del baño ha aumentado. Así que si la corriente es demasiado alta se deberá descargar un poco de electrolito y agregar agua destilada y si es muy baja se deberá agregar más catalizador.

### 3.1.2 CONDICIONES DE LAS PLATINAS

Debido que este es considerado como el corazón del generador se debe hacer una buena elección del material a utilizar y para esto hay muchos criterios a utilizar como conductancia del material, su resistencia a la corrosión y oxidación y costo del mismo.

Las experimentaciones han demostrado que los mejores materiales para esto son aceros inoxidables 317L, 316L y 302L yendo del de mayor costo al menor respectivamente.

En este diseño se utilizan platinas de acero inoxidable 302L de 70 × 115 mm, a las cuales se les hace un marcado muy fino mediante algún material abrasivo para generar pequeñas puntas en una forma bidireccional.

**Figura 3. 7 Patrón de marcado que se debe procurar en las platinas**





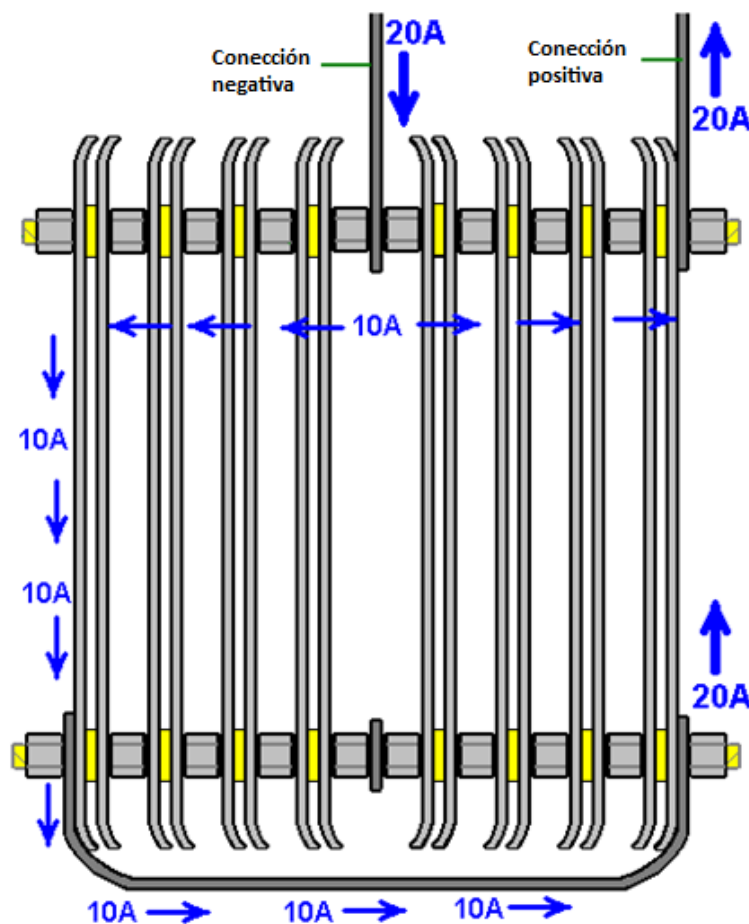
Este marcado es muy importante pues provoca que las burbujas se rompan y se desprendan de ella, ya que cuando la burbuja se queda adherida a la pared de la platina disminuye el área efectiva de la misma provocando una caída en la producción de gas.

Adicional a esto también el área efectiva es mejorada debido a los pequeños picos y valles que se generan en aproximadamente 40%.

#### ➤ Arreglo eléctrico del juego de electrodos

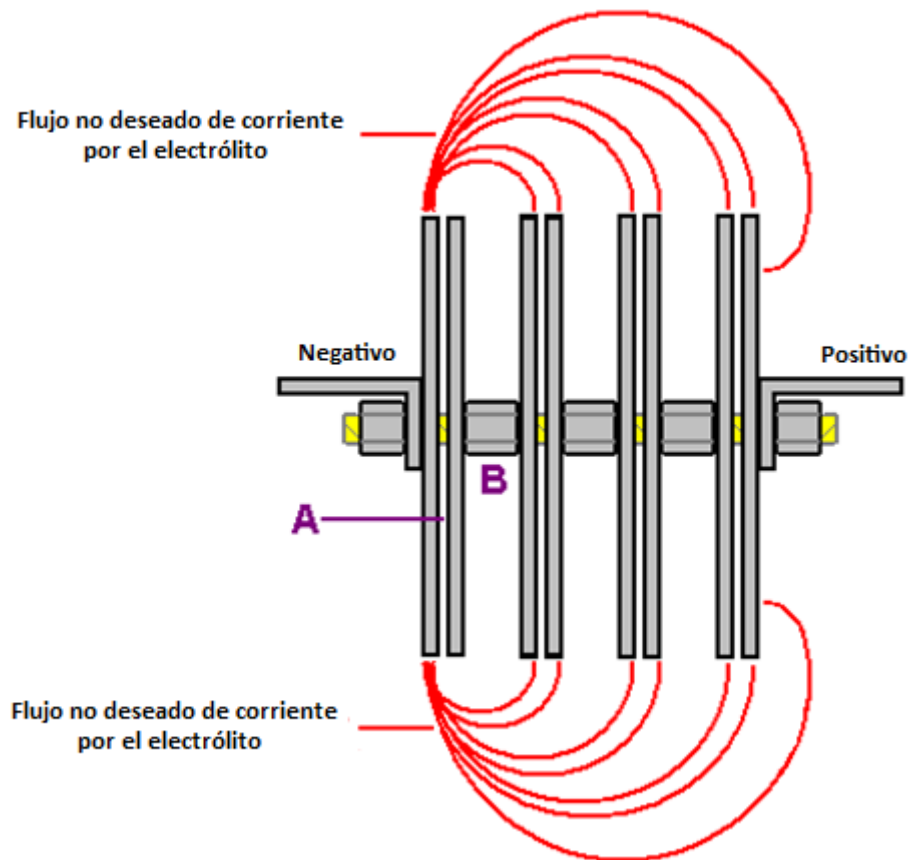
El arreglo eléctrico es bastante simple y se puede ver como dos juegos idénticos de cuatro celdas. Y donde para obtener la eficiencia eléctrica máxima se debe obligar a la corriente a atravesar los electrodos a través del electrolito solo en el punto en que la separación es de 1.6 mm, excluyendo todos los otros posibles caminos del flujo de corriente.

Figura 3.8 Sentido del flujo de corriente en los electrodos



Debido a las características de este diseño, de baño abierto, tendremos algunas fugas a través del electrolito lo cual dará una caída en la producción de gas por la corriente desperdiciada que no generara mucho gas y provocara un aumento en la temperatura.

**Figura 3.9 Sentido de flujo de corriente no deseado**



Este diagrama muestra la manera en que se dan las fugas de corriente. Debido a esto el espacio entre cada celda o par de electrodos debe ser tan grande como sea posible para así darle un camino con menor resistencia a la corriente.

### 3.1.3 LIMITES DE OPERACIÓN

El periodo normal de funcionamiento de este prototipo ha sido de 1.5 horas para el cual se ha desempeñado muy bien, pero pruebas hasta de cuatro horas se han realizado para registrar su comportamiento.

Aquí se muestran condiciones de temperatura y corriente en una prueba de 4 horas con un voltaje aplicado de 13 Vol DC.

**Tabla 3. 1 Pruebas de funcionamiento largo del generador**

Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Corriente (Amp)
0	13	7.0
1	53	15.3
2	92	26.0
3	91	29.0
4	94	29.4

Hay un punto de funcionamiento óptimo para este prototipo y es basado en la concentración del electrolito y el tiempo de funcionamiento y estas variables están íntimamente relacionadas con la corriente de arranque en frío. La producción de gas no se ve significativamente disminuida si la corriente de alimentación se mantiene debajo de los 20 amp. Debido a que esto dará una temperatura aproximada de 60°C lo cual es manejable por el equipo.

Además a temperaturas superiores puede causar daño a las tuberías y se generara mucho vapor de agua que nos dará problemas de manejo y posibles daños al equipo.

### **3.2 SEGUNDO PROTOTIPO<sup>3</sup>**

Este apartado muestra el diseño y la construcción de un generador de oxihidrogeno pensado para suplir el gas a un vehículo para incrementar el promedio de kilómetros recorridos utilizando menos cantidad de gasolina en el proceso. Ha mostrado un desempeño en un Chevy 1992 de 5 litros muy bueno levantando de 18 a 27 mpg lo cual es un incremento muy aceptable.

---

<sup>3</sup> Referencia de "The Hotsabi Booster", hotsabi@gmail.com

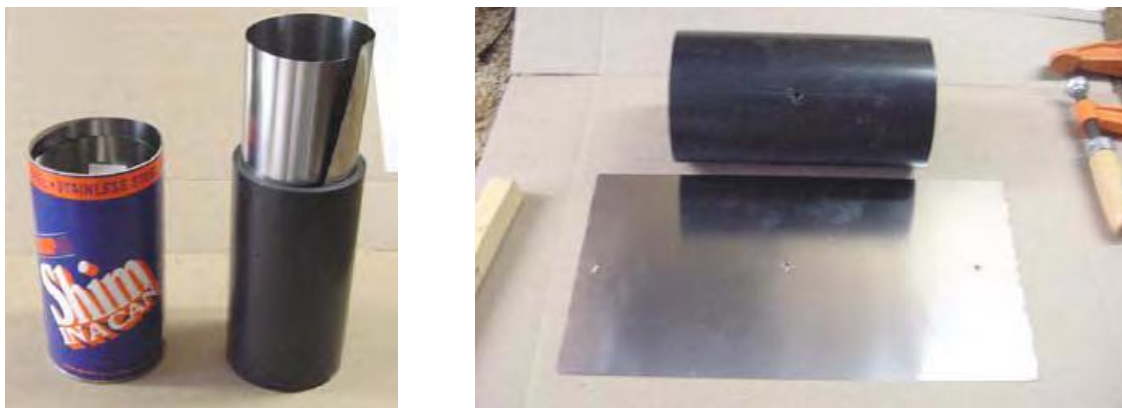
La unidad es bastante básica y en una perspectiva muy general consiste en un tubo que aloja una lamina de acero inoxidable enrollada en su interior con un electrodo en el centro. Esta es sellada por medio de tapaderas en el fondo y la parte superior donde se instala la tubería para poder drenar el gas generado en el interior.

### 3.2.1 DETALLES DEL CUERPO DEL ELECTROLIZADOR

El housin o carcasa esta hecho de tubería ABS de 7" de longitud por 3" de diámetro y es el encargado de proteger la celda.

La tapadera del fondo también es de tubería ABS de 3". En la parte superior se utiliza un adaptador de tubería ABS del mismo diámetro pero este debe tener rosca en uno de sus extremos.

**Figura 3. 10 Muestra del cuerpo principal del electrolizador con un electrodo**

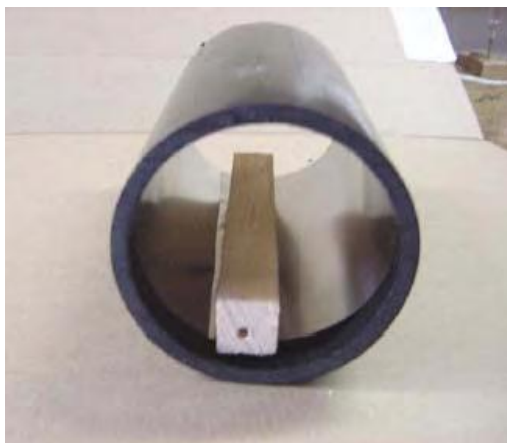


El electrodo es de acero inoxidable 302L de 11" × 6" de 0.003" es espesor.

Para preparar el electrolizador se le deben abrir tres agujeros de 1/4" a la lámina y dos de la misma medida a la tubería.

Es importante que los agujeros hechos a la tubería estén lo más alineados que se pueda y estos tienen que concordar con los de la lámina. Para esto es muy conveniente hacer los agujeros con la lámina enrollada en la parte interna de la tubería y utilizar madera cuando se tenga que taladrar el agujero.

**Figura 3. 11 Forma segura para abrir los agujeros**



Una vez hechos los agujeros se ensambla la lámina al tubo por medio de pernos de acero inoxidable. Es importante que cuando se instalen estos pernos se pongan arandelas por fuera y por dentro para evitar fugas del electrolito, además de sellar con silicón las juntas.

**Figura 3. 12 Ensamble del electrodo a la tubería**



Para la tapadera del fondo se utiliza siempre tapadera de tubería ABS del mismo diámetro del tubo central y se le taladra un agujero al centro de 1/4 "esto para instalar una barrilla de acero inoxidable de la misma calidad que la lamina. Esta barrilla debe ser de 6" de longitud con un diámetro de 1/4". Se tiene que usar tanto tuercas como arandelas para sujetar este electrodo y asegurarse muy bien de no dejar fugas, aislando con suma precaución pues el líquido reposara sobre esta tapadera.

Para la tapadera superior se utiliza el adaptador roscado y una tapadera también roscada, ambas del mismo diámetro y material. Y a la tapadera superior se le abren dos agujeros uno al centro para conexión de 3/8" NPT y el otro a un lado para conexión de 1/4" NPT.

**Figura 3. 13 Adaptador y tapadera superior del prototipo**



El adaptador se instala por la parte no roscada en la tubería central o cuerpo del electrolizador con pegamento. El arreglo de las piezas montadas queda de la siguiente manera:

**Figura 3. 14 Vista del cuerpo del electrolizador**



Ahora se utiliza malla de acero inoxidable de la misma calidad que los electrodos, esta malla se debe cortar en círculos del tamaño de la tapadera superior, se deberán usar tres mallas una encima de otra y colocadas cuidadosamente dentro de la tapadera.

Una vez encajadas se sujetan con un tornillo de 10/32" de acero inoxidable a la tapadera, este tornillo debe ir montado al lado opuesto del agujero de 1/4" que ya se había hecho.

**Figura 3. 15 Ensamble de la malla en la tapadera superior**



Esta malla funciona tanto como para limpiar cierta parte del gas del vapor del hidróxido de potasio y condensado de vapor de agua así como un arrestador de llama por posibles retrocesos a la unidad.

Una vez instalada la malla se instala un tapón en el agujero del centro y un conector con salida para manguera en el de la orilla. El tapón del centro funcionara para alimentar la celda con electrolito y el de la orilla para extraer el gas que se está produciendo por efecto de la electrolisis.

**Figura 3. 16 Ensamble de la tapadera superior con sus conexiones**



### 3.2.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN

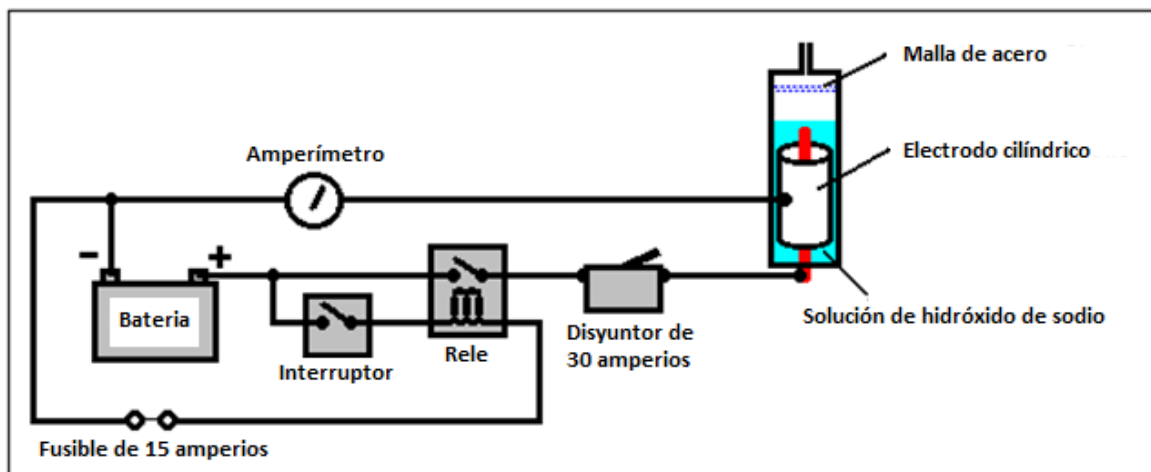
Como se instalaron dos pernos al centro de la tubería para empotrar el electrodo que va enrollado, estos se utilizan para la conexión del polo negativo. La conexión del polo positivo se hace por medio del perno que se instaló al fondo del electrolizador, se debe utilizar cable AWG #12 / SWG 14 para todas las conexiones externas a la celda.

Esta unidad se alimenta con 15 amp. y el electrolito se prepara con una cucharada de NaOH para 8 litros de agua destilada.

Para tener un arreglo seguro se deben instalar algunas protecciones que garanticen minimizar los riesgos de cualquier accidente proporcionando una operación más confiable.

El ensamble completo se muestra a continuación:

**Figura 3. 17 Circuito eléctrico del electrolizador**

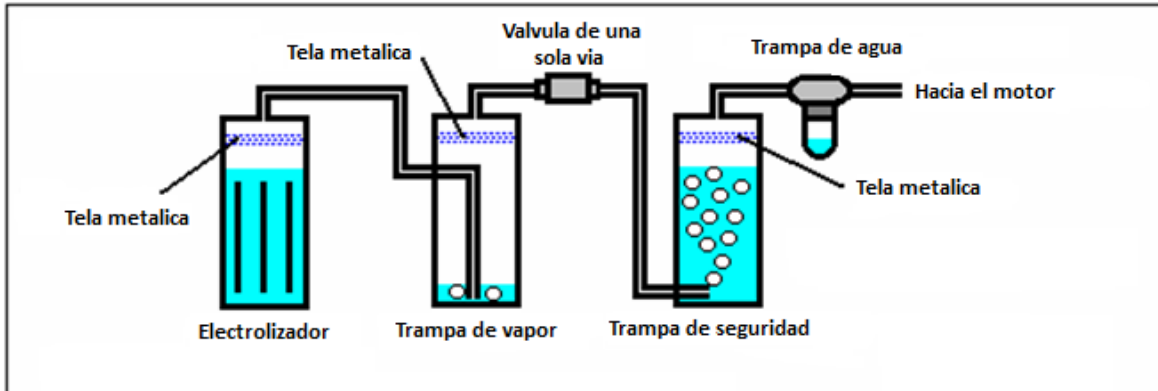


También se pueden instalar dispositivos extras para garantizar que sea solo oxihidrogeno el que se está poniendo a la disposición para la alimentación. Para esto se pueden instalar más depósitos que irán atrapando el condensado tanto de vapor de agua como de otros gases producto de la reacción de electrolisis.



El arreglo de estos depósitos extras se muestra a continuación:

**Figura 3. 18 Depósitos extras para limpiar el gas de impurezas**

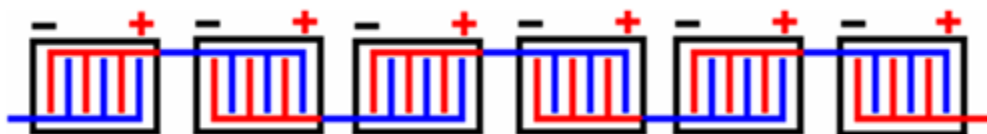


Cuando se instale el equipo se debe de asegurar que todas las conexiones eléctricas estén bien hechas, que las juntas de las tuberías con los depósitos y el electrolizador estén bien acopladas y sin fugas y también que el cuerpo del electrolizador este totalmente libre de fugas, esto debe tomarse en cuenta rigurosamente para no tener que lamentar algún accidente.

### 3.3 TERCER PROTOTIPO

Hay muchas maneras diferentes de construir un equipo para electrólisis. Una estructuración eléctrica para las celdas bastante convencional se muestra aquí:

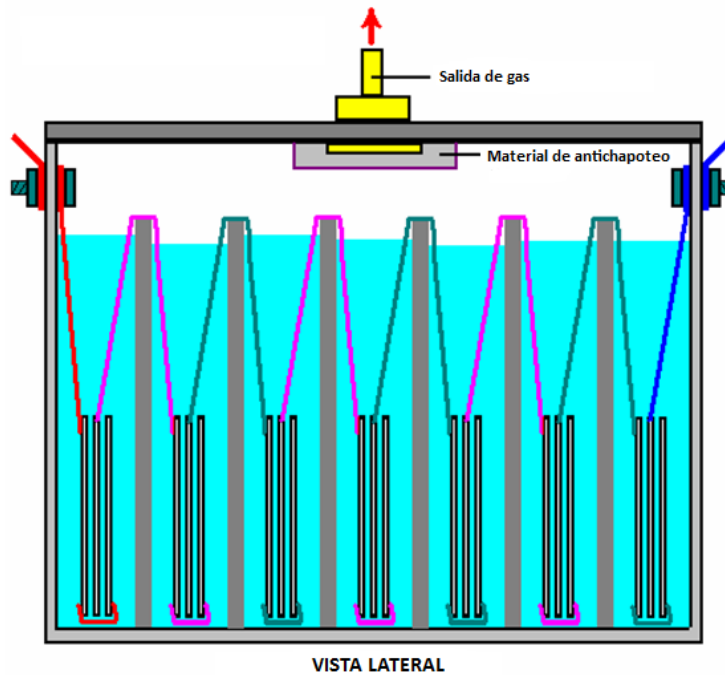
**Figura 3. 19 Arreglo de seis celdas**



Se usan tres platinas para cada célula y estas se conectan en serie. Éste es un arreglo absolutamente bueno y tiene la ventaja que las platinas pueden sumergirse profundamente

en el electrólito, las células se aíslan totalmente del exterior. También, el gas de cada célula ayuda a desalojar las burbujas de gas de las otras y mejorar la eficacia con la que opera el sistema.

**Figura 3. 20 Arreglo de las celdas en el deposito**



Tiene la ventaja de ser capaz de ser construido en cualquier tamaño conveniente, y con una cantidad grande de electrólito en cada célula, no hay necesidad de un sistema de llenado de agua automatizado complicado. Una unidad bien construida de este tipo es capaz de producir 3 lpm de gas oxihidrogeno con sólo 15 amperios de corriente que debe dar una mejora del kilometraje muy respetable cuando usa como generador en un automóvil.

Este dispositivo tiene una buena eficiencia porque toda la corriente se obliga a fluir a través de los siete juegos de platinas. En el caso de un electrolizador de baño abierto, como el primer prototipo descrito en este capítulo, la corriente tiene la opción de desviar los platos centrales y saltar a otros e incluso al último, esto produce muy poco gas debido a que el hueco es grande y hay sólo un área de generación en lugar de siete áreas separadas.

También, ese propulsor tiene sólo ocho pares de platinas que lo que utiliza por lo menos 65% del poder de alimentación para aumentar la temperatura en el electrolito. En el caso de

un diseño 7 células, con células aisladas, sólo el 38% del poder va a utilizarse para calentar el electrolito. Así que, la eficacia de producción de gas se dobla y la energía gastada disminuye casi en la mitad.

En este diseño el nivel del electrolito en cada compartimiento no es crítico por eso un volumen considerable de él puede mantenerse sobre las platinas. Esto significa que el proceso de llenado por perdidas se hará muy raras veces. El método de construcción es muy simple y el área efectiva de los electrodos puede hacerse muy grande.

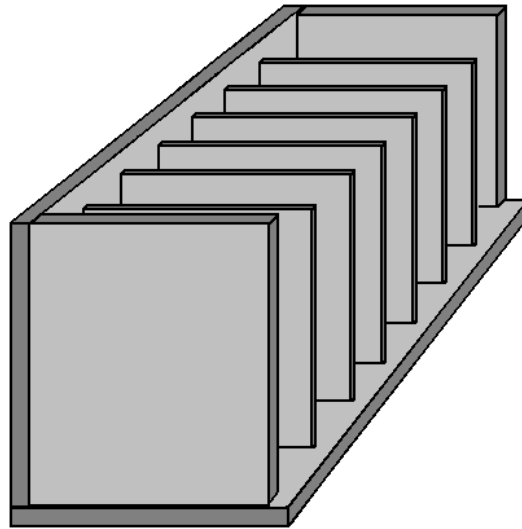
Como cuando el motor del vehículo está en marcha, el alternador produce casi 14 voltios para cubrir los 12 voltios de la batería del vehículo. Esto significa que habrá aproximadamente 2 voltios por cada una de las siete células y la producción de gas será siete veces lo de una sola célula.

Como se desea la eficiencia eléctrica máxima, debe comprenderse que mientras se reduce la concentración del electrolito bajará la corriente esto hace que al gasto por resistencia aumente al flujo actual a través de la célula creando un calentamiento adicional. Así que, para un desempeño óptimo, el electrolito debe ser la concentración máxima de 28% de KOH por relación en peso y la corriente a través de la unidad debe controlarse utilizando un modulador de pulso.

La construcción de un depósito para siete células es relativamente fácil. Los pedazos se cortan para dos lados, una base, una tapa y ocho particiones completamente idénticas. Estas particiones deben ser exactamente iguales para que no haya ninguna tendencia a desarrollar fugas.

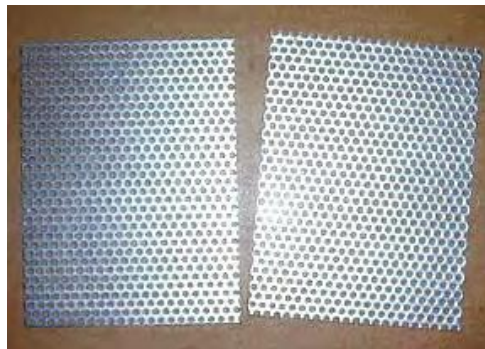
La tira del fondo es de la misma longitud como la de los lados, y es la anchura de las particiones más dos veces el espesor del material usado para construir el cuerpo del electrolizador. El acrílico es un buen material para construir este depósito. El arreglo queda como se muestra en la figura 3.2

**Figura 3. 21 Vista de una sección del deposito**



Los electrodos para este diseño son mallas de acero inoxidable, lo que lo hace un material relativamente más fácil de manejar con herramienta de corte. Si la malla es particularmente flexible, entonces puede ser necesario apoyarla para impedir el contacto entre ellas y que se genere un cortocircuito. Aunque generalmente la mayoría de las mallas es lo bastante rígida para no tener encorvamiento y generar problemas.

**Figura 3. 22 Mallas de acero inoxidable que funcionaran como electrodos**



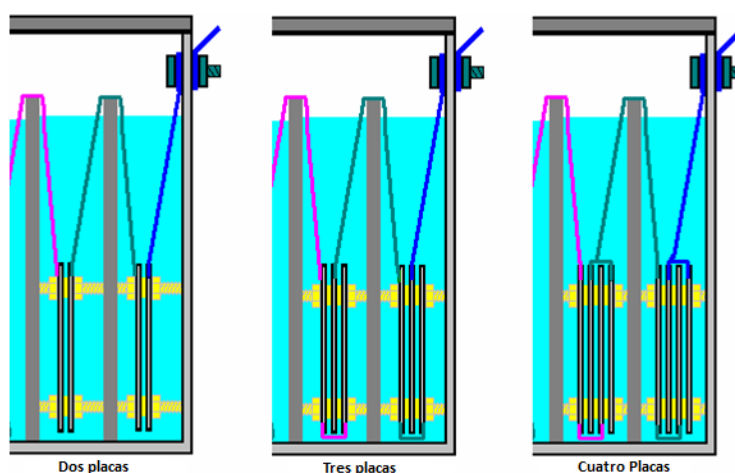
Estos electrodos deben sostenerse a una distancia de aproximadamente 3 mm (1/8 pulgada) entre caras para hacer más eficiente la electrolisis y esto debe hacerse usando plástico en las esquinas de las mallas para mantener la separación entre hojas. Si los trozos plásticos se cortan con bastante precisión pueden mantener una partición bastante precisa y uniforme además de darle firmeza al arreglo dentro de la celda.

### 3.3.1 DIFERENTES ARREGLOS DE LOS ELECTRODOS

Hay varias maneras de conectar los electrodos en forma de placas que se ponen en cada compartimiento de esta celda. El método de conexión depende del número de electrodos que utilice por compartimiento. El arreglo más simple es utilizar dos electrodos por compartimiento, pero pueden ser fácilmente, tres, cuatro, cinco, o más sin olvidar que la alimentación de energía debe también ser acorde.

Los arreglos se muestran a continuación:

Figura 3. 23 Diferentes formas de conexión de las placas



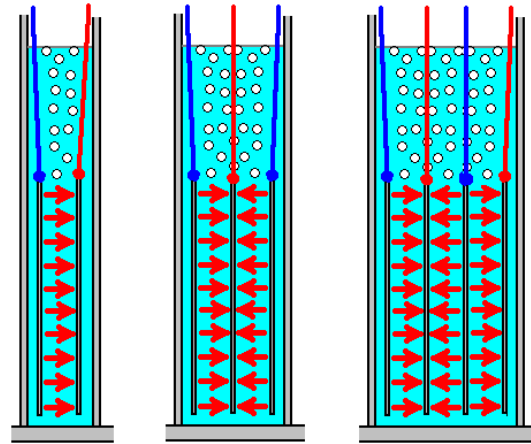
La electrólisis tiene lugar en los huecos entre los electrodos, con dos electrodos, hay simplemente un área de electrólisis. Con tres electrodos, hay dos espacios entre placas y la electrólisis tiene lugar en ambos lados del electrodo central en cada compartimiento. Con cuatro electrodos, hay tres espacios entre placas y la electrólisis tiene lugar en ambas caras de los dos electrodos internos en cada compartimiento.

Si cada electrodo es de 5" x 4" tendrá  $20in^2$  de área en cada cara, entonces con dos electrodos, el área de la electrólisis es  $20in^2$  que permite manejar 10 amperios. Con el arreglo de tres electrodos, el área de la electrólisis es  $40in^2$ , mientras permite una corriente

de 20 amperios a través del electrolizador. Con el arreglo de cuatro electrodos, el área de la electrólisis de los electrodos es  $60in^2$ , mientras permite que 30 amperios pasen a través de la celda. Las corrientes más altas no son un problema con este diseño porque con siete celdas en serie, hay poco calentamiento del electrólito y el funcionamiento de la célula permanece estable.

Para representar esto más claramente la figura 3.24 muestran los diagramas para cada uno de estos tres arreglos, mostrando los flujos actuales entre los electrodos.

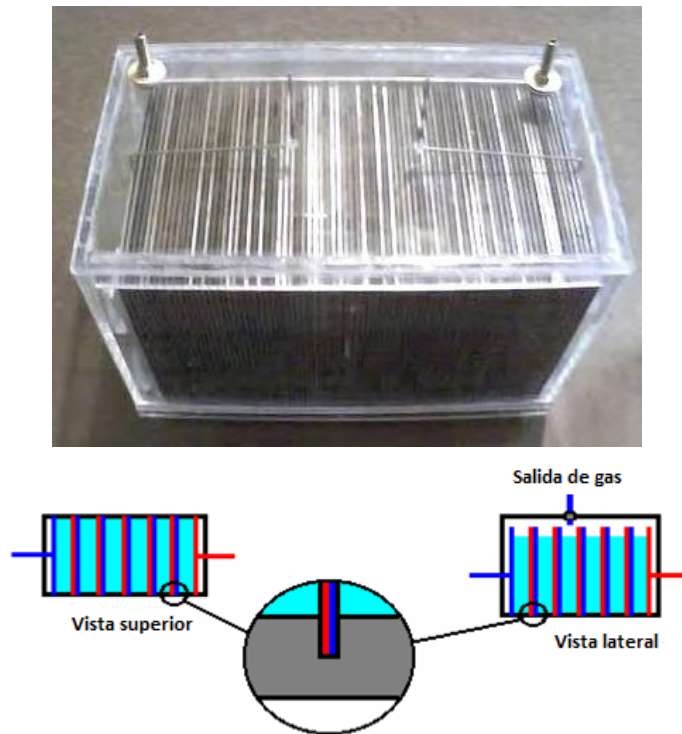
**Figura 3. 24 Dinámica de la generación de oxihidrogeno en las placas**



Propiamente construido, con electrodos limpios y bien acondicionados un electrolizador de este tipo es capaz de producir 2 lpm de gas oxihidrogeno con sólo 10 amperios, 3 lpm a 15 amperios, 4 lpm a 20 amperios y 5 lpm a 25 amperios.

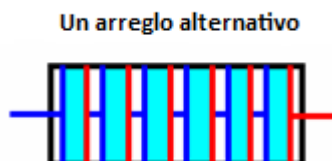
Hay muchos estilos diferentes de células. Es posible distribuir con las particiones mostradas muchas células si se está dispuesto a sacrificar el volumen de electrólito sobre el nivel del los electrodo. Este tipo de diseño es necesario si en lugar de tener simplemente siete particiones en la célula hay setenta o más. Esto lleva al estilo de construcción mostrado aquí:

**Figura 3. 25 Vista del ensamble para un arreglo de múltiples celdas**



Aquí, la cubierta externa es ranurada para recibir las placas del electrodo. La exactitud de la construcción tiene que ser muy buena ya que se espera que las placas de los electrodos formen un sello hermético para crear células separadas. En la figura 3.26 se muestran las placas de electrodos centrales en rojo para positivo y azul para conexiones de voltaje negativo. Las placas deben ser exclusivamente de acero inoxidable. Como el electrolito no es libre de moverse entre compartimentos, esto produce el mismo efecto eléctrico que el arreglo mostrado aquí.

**Figura 3. 26 Arreglo de empotramiento de las placas**



Mientras esto es lo mismo eléctricamente, requiere la producción y el espaciado de cinco placas adicionales. Cada placa suplementaria es con eficiencia redundante porque el espacio entre los pares internos es vacío y una placa de acero solamente es alambrada

directamente a la siguiente. Como las placas son alambradas juntas en pares, no hay ninguna necesidad de tener dos placas y un cable que las una. La razón de indicar esto detalladamente es porque es bastante difícil de ver ya que el arreglo estándar es unido eléctricamente con los lados de enfrente de una placa que forman la parte de dos células adyacentes y además, la conexión eléctrica entre aquellas dos células.

### 3.3.2 SOLUCIONES AL PROBLEMA DEL CALENTAMIENTO

Cuando la electrólisis de corriente continua es usada, la tasa de producción de gas es proporcional a la corriente que fluye por las células. Con sistemas de 12 voltios, la corriente puede ser controlada por la concentración del electrólito y esto repercute en la temperatura de la placa, además que la insuficiente o incorrecta área de la misma realmente requiere que el voltaje sea empujado hasta que alcance la corriente requerida y este voltaje suplementario tienen un efecto de calentamiento fuerte. Cuando un electrolizador se comienza a utilizar, estos por lo general tienen una temperatura baja. Con el tiempo, varias ineficiencias del proceso de electrólisis levantan la temperatura del electrólito.

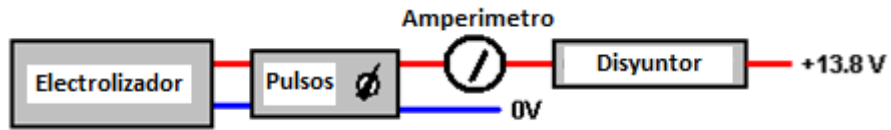
Esto aumenta la corriente que fluye por el electrolizador, que al mismo tiempo, calienta el electrólito aún más. Esto causa dos problemas, en primer lugar, la tasa de producción de gas es inferior que la esperada cuando el electrólito no está tan caliente. En segundo lugar, cuando el electrolizador ha estado funcionando desde hace algún tiempo, un efecto de aumento de temperatura es creado donde la corriente se descontrola. También, la temperatura generada causa la producción de cantidades excesivas de vapor de agua.

Hay varias soluciones para estas situaciones. Se debe aceptar que la producción de gas será baja en las primeras pruebas, se ajustará la concentración del electrólito con la corriente de diseño, de modo que no sobrepase niveles excesivos de temperatura el electrolizador. Esto no es una solución buena sobre todo cuando se hace funcionar al motor de combustión muchos periodos cortos entre otros largos. La mejor solución es usar la concentración más alta de electrólito y un control electrónico o Modulador de Pulso que nos ayudara a controlar la corriente. Usando esta solución, un amperímetro para mostrar la corriente y un



botón de control PWM es montado sobre un tablero de mando desde donde se puede controlar la corriente con la mano si comienza a hacerse demasiado alta.

**Figura 3. 27 Diagrama eléctrico**

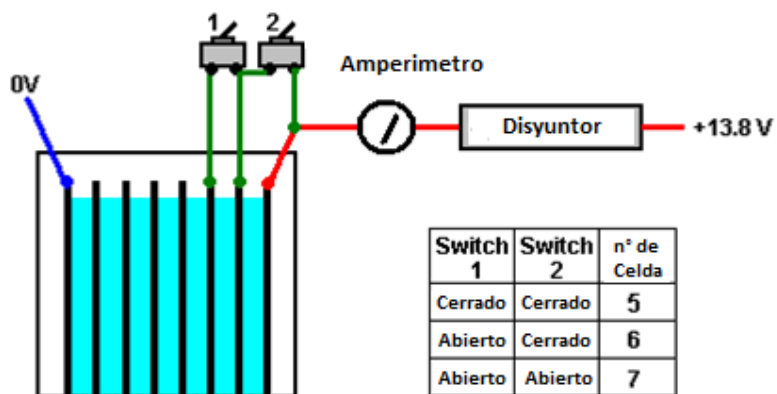


Es recomendable usar un circuito PWM de 30 amperios ya que este puede manejar fácilmente un rango de corriente como los elegidos para operar el electrolizador que normalmente son de 15 a 22 amp. El amperímetro también debe ser capaz de mostrar lecturas de 30 amperios.

La otra manera muy eficaz, pero no la alternativa más utilizada es utilizar las células como células de electrolisis suplementarias. Así se puede controlar mejor la corriente y se levantara la eficiencia de la producción de gas.

Esto puede ser alcanzado de varios modos. Una opción es instalar células suplementarias con un interruptor de 12 volt a través de ellos. Cuando el interruptor está abierto, se corta la corriente de suministro a la célula y esta no genera gas usando los interruptores, el arreglo se muestra en la figura 3.28.

**Figura 3. 28 Conexión de los interruptores a las celdas**



Aquí, el arreglo es muy simple con dos interruptores que permiten a una o dos células adicionales para ser añadidas.

Hay muchos factores prácticos que afectan la eficacia eléctrica de cualquier clase de corriente continua en el electrolizador. Investigaciones de laboratorio tienden a escoger el platino para el empleo como electrodo, pero la verdad es que no es un metal adecuado para usar ya que actúa como un catalizador para combinar de nuevo el hidrógeno y gases de oxígeno y tiene una oposición intrínseca para la electrólisis. Después de muchas pruebas, el acero inoxidable grado 317L fue encontrado para ser una opción excelente, pero debido a su disponibilidad limitada y el alto coste, el acero inoxidable grado 316L generalmente es usado en su defecto.

### **3.3.3 FACTORES QUE AUMENTAN LAS PERDIDAS**

Los factores de pérdida en la electrólisis pueden ser examinados por el flujo de la corriente.

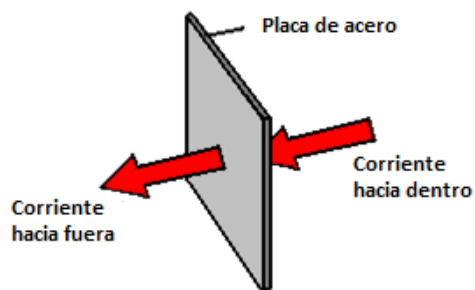
Estos son:

1. Resistencia a flujo de corriente por los electrodos metálicos.
2. Resistencia para fluir entre el electrodo y el electrólito.
3. Resistencia para fluir por el electrólito mismo.

Estas pérdidas eléctricas producen calor, que en cantidades limitadas no es un problema, pero de ser dejado sin control, causa problemas considerables, como la producción de vapor de agua que diluye el gas, y reducen el contenido de energía de salida, y en casos extremos, derritiendo o debilitando el material del electrolizador

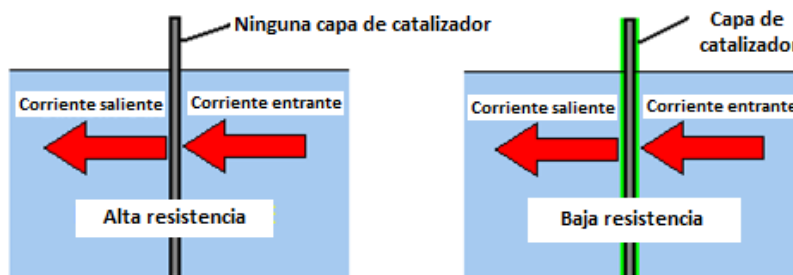
Para entender que pasa se tienen que examinar las áreas efectivas y ver que se puede hacer para reducir pérdidas eléctricas a un mínimo, además de la limitación de voltaje descubierta por Michael Faraday donde él mostró que ningún gas adicional será producido si el voltaje a través de un cuerpo de electrólito fuera arriba de 1.24 voltios.

**Figura 3.29 Flujo de corriente a través de la placa de acero**



1. La resistencia al flujo de corriente por las placas de electrodos metálicos es algo que no puede ser vencido fácilmente y económicamente, y tiene que ser aceptado. Por lo general, el calentamiento de esta fuente es baja y no un asunto de preocupación principal.

**Figura 3.30 Flujo de la corriente con ayuda del catalizador**



2. La resistencia para fluir entre el electrodo y el electrolito es un asunto completamente diferente y avances principales pueden ser hechos en esta área. Después de pruebas extensas, se descubrió que una mejora principal puede ser hecha si una capa catalítica es desarrollada sobre la superficie de la placa activa.

**Figura 3.31 Flujo de corriente a través del electrolito**



3. La resistencia para fluir por el electrólito mismo puede ser reducida al mínimo usando el mejor catalizador en su concentración óptima, y controlando el flujo de corriente usando un circuito electrónico. Las opciones aquí están empleando un MWM o un Circuito de Corriente Continua. Un circuito PWM apaga la corriente para cualquier porcentaje escogido del tiempo. Esto reduce la corriente media que fluye por el electrólito y mejora el rendimiento de producción de gas. El circuito mantiene automáticamente constante la corriente en cualquier valor escogido por el electrólito. Otro factor es la distancia que la corriente tiene que fluir por el electrólito, a mayor la distancia, mayor la resistencia. Reducir el hueco entre las placas mejora la eficacia. Sin embargo, factores prácticos entran en el juego aquí como las burbujas que tienen que tener el espacio suficiente para escaparse entre las placas y en un electrolizador compacto unido por series, el volumen de electrólito entre placas sucesivas es restringido con severidad. El espaciado que se recomienda es de 3mm o 1/8 de pulgada.

Estos factores permiten obtener el doble de los resultados de Faraday, o por otro lado, dan la salida de gas de Faraday para menos de la mitad de la corriente que él encontró que era necesaria utilizar.

El mejor catalizador conocido en este tiempo es el hidróxido de potasio o KOH. Este es 20 % más eficiente que el hidróxido de sodio o NaOH. Es bastante posible que un mejor catalizador pueda ser descubierto en el futuro, que bajaría la exigencia de corriente para cualquier rendimiento requerido de gas.

El área de las placas es importante para que el electrodo tenga una vida más prolongada y una placa de  $4in^2$  por amperio de corriente dará estos resultados.

### 3.4 CUARTO PROTOTIPO<sup>4</sup>

Hay una ventaja teniendo las placas más amplias que los electrodos ya que estos pueden ser más grandes y proporcionar más superficie de electrólito.

---

<sup>4</sup> Referencia de "The Duplex Booster", <http://www.free-energy-info.com>

Con base a este y otros criterios es posible generar otro diseño de generador de hidrogeno; siempre regido por la idea de las diferentes célula. Una ventaja realmente grande de este diseño consiste en que no se utiliza contenedor para alojar la celda, el material de placa es bastante delgado para ser cortado a mano y no es necesario ningún trabajo de alta precisión.

La célula de este prototipo luce como la fotografía de la figura 3.32.

**Figura 3. 32 Cuerpo del generador**



### **3.4.1 CONSTRUCCIÓN**

Hay dos placas fuertes de acero que actúan como abrazaderas para aprisionar una serie de placas circulares que forman las células del generador, y además de actuar como electrodos. Para este diseño es necesario tener una serie de anillos de material aislante, que tengan el mismo diámetro exterior de las placas circulares internas, para poder impedir que se produzca de alguna manera un cortocircuito, y lograr cierres herméticos entre las placas circulares. Y es dentro de estos espacios que generan los anillos junto con las placas, que se forman las células que trabajan en la electrolisis.

**Figura 3. 33 Ensamble de las placas**

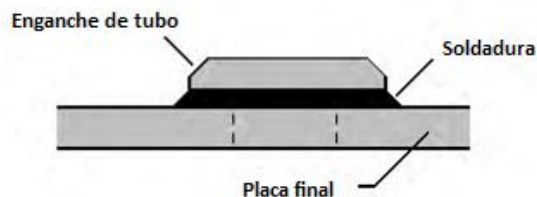


Como no debe producirse un cortocircuito entre las placas internas y el cierre hermético, el material debe ser lo suficientemente rígido tal como una sección de tubo PVC, además debe tener un espesor de aproximadamente un cuarto pulgada, sobre el cual circulara el electrolito por cada una de las celdas.

Las placas de los extremos deben recibir una preparación cuidadosa, tal como una limpieza profunda con ácido hidroclicórico, para quitar de su superficie cualquier tipo de impureza. Este proceso produce una superficie de placa bastante aceptable.

Es necesario perforar dos agujeros en una de las placas de los extremos (de tratarse de una celda simple), con el fin de proporcionar a través de estos agujeros el abastecimiento de electrolito y la evacuación del gas.

**Figura 3. 34 Agujeros elaborados en las placas**

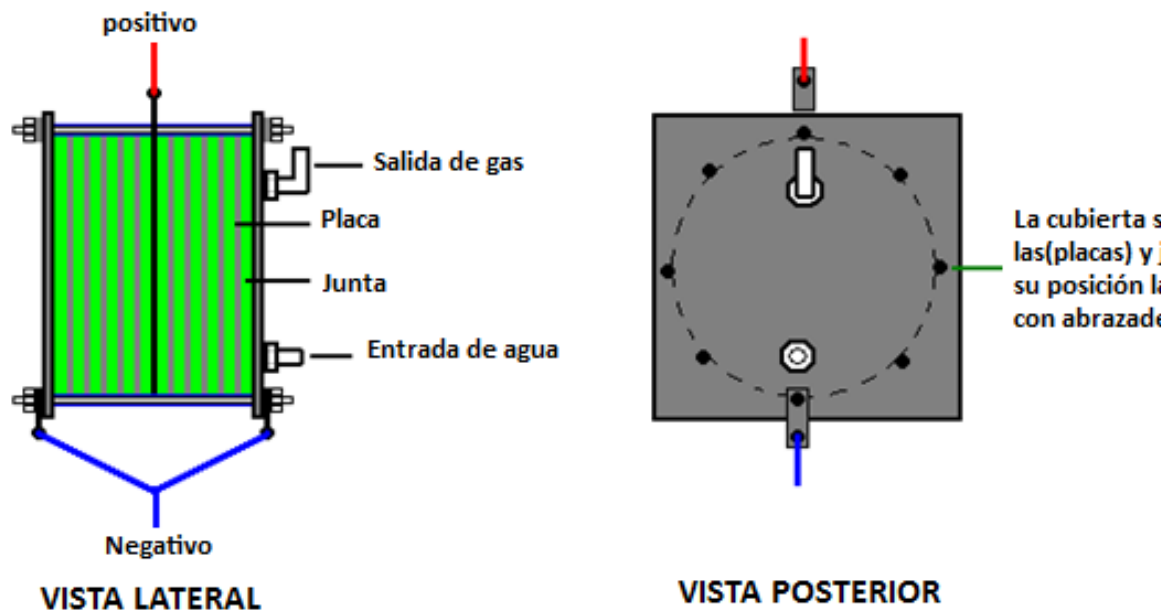


Los accesorios que se deben adherir a las placa de los extremos (pletina de ¼ de espesor), pueden ser tubos de ½ pulgada de diámetro, con una altura lo suficiente para poder acoplar a sus extremos las mangueras que suministrarán el agua y evacuarán los gases producto de la electrolisis. Para prevenir posibles fugas en las uniones los tubos pueden ser soldados a las placas del extremo del aparato.

### 3.4.2 EL ARREGLO ELÉCTRICO

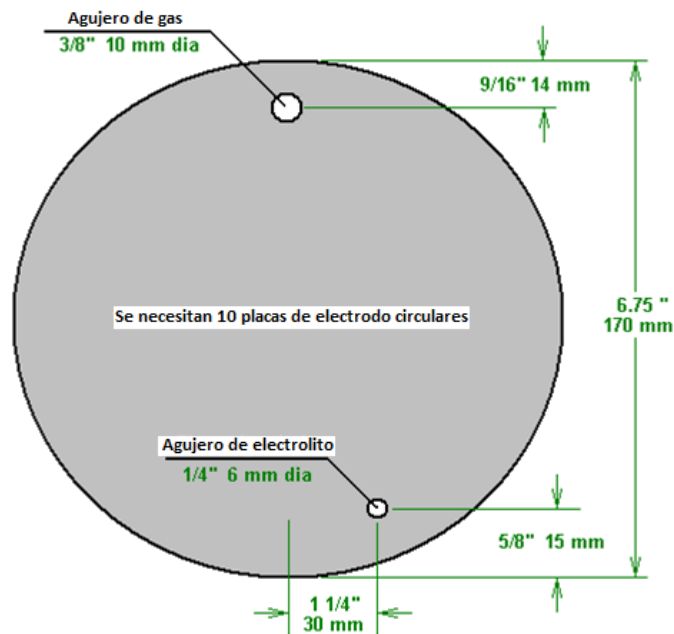
Para la conexión al suministro de energía se conectan las dos placas de los extremos a un terminal de la fuente de energía y la placa del centro se conecta a la otra terminal, ya que es usada como el otro contacto eléctrico. Esta configuración produce aparentemente dos generadores.

**Figura 3.35 Vistas del cuerpo del electrolizador con los electrodos**



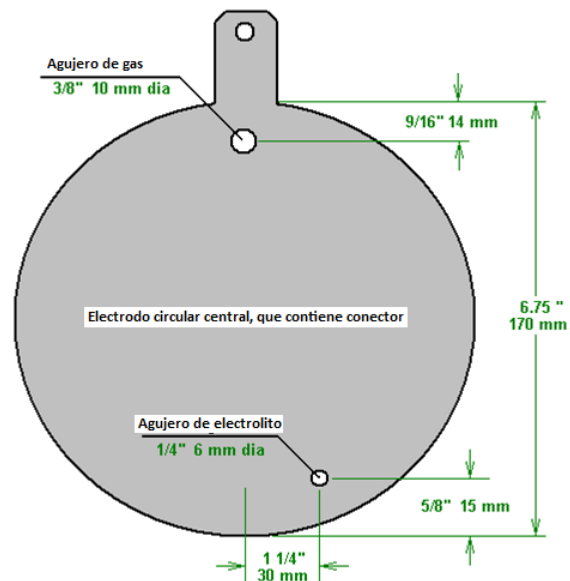
En ambas disposiciones, hay cinco placas circulares sobre cada lado, que forman dos generadores separados de seis celdas cada uno. Las placas centrales pueden ser construidas de hoja de acero inoxidable de grado 316L de 0.047" de espesor.

**Figura 3.36 Detalle de las placas a utilizar como electrodos**



En la versión simple, cuando solamente una de las placas de los extremos es taladrada para acoplar la salida de gas y el tubo de suministro agua.

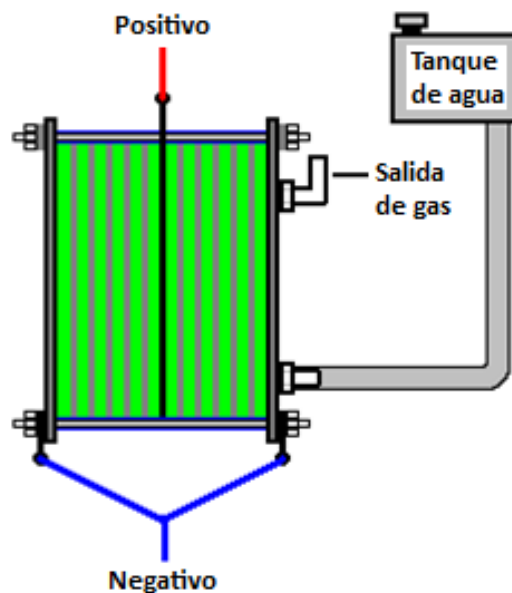
**Figura 3.37 Detalle de la placa central**





Esto permite a un arreglo como el mostrado en la siguiente figura.

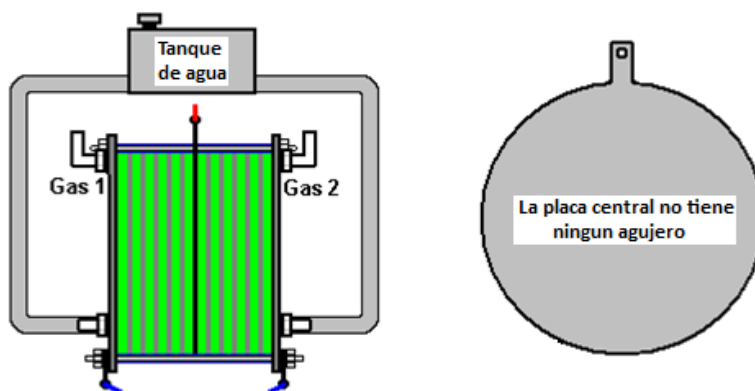
**Figura 3. 38 Ensamble simple**



Sin embargo, puede optarse por un arreglo doble; permitiendo la salida de gas a ambos lados de las placas de los extremos.

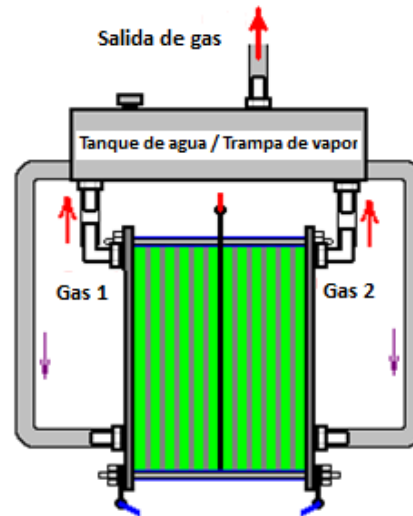
Cuando el motor funciona en vacío o en carga muy ligera puede optarse por utilizar una sola salida del gas, pero cuando el motor funciona con mayor carga puede funcionar el segundo suministro de gas, este se puede lograr activando y desactivando el suministro de energía a un extremo de las placas del electrolizador.

**Figura 3. 39 Ensamble doble**



Como un paso final podría utilizarse el depósito que suministra el agua al generador como una trampa de vapor, ya que siempre existe el riesgo que se evapore una cierta cantidad del electrolito que se encuentra en el generador.

**Figura 3. 40 Detalle del ensamble doble con la trampa de vapor**



Este es un arreglo muy curioso ya que el electrolizador es inundado deliberadamente. Las burbujas de gas producidas sobre las placas se elevan y se reúnen en lo alto de las placas hasta que se escapan por los agujeros de gas, perforados en las placas, pasando hacia arriba por el depósito de agua que entonces actúa como un filtro o trampa de vapor.

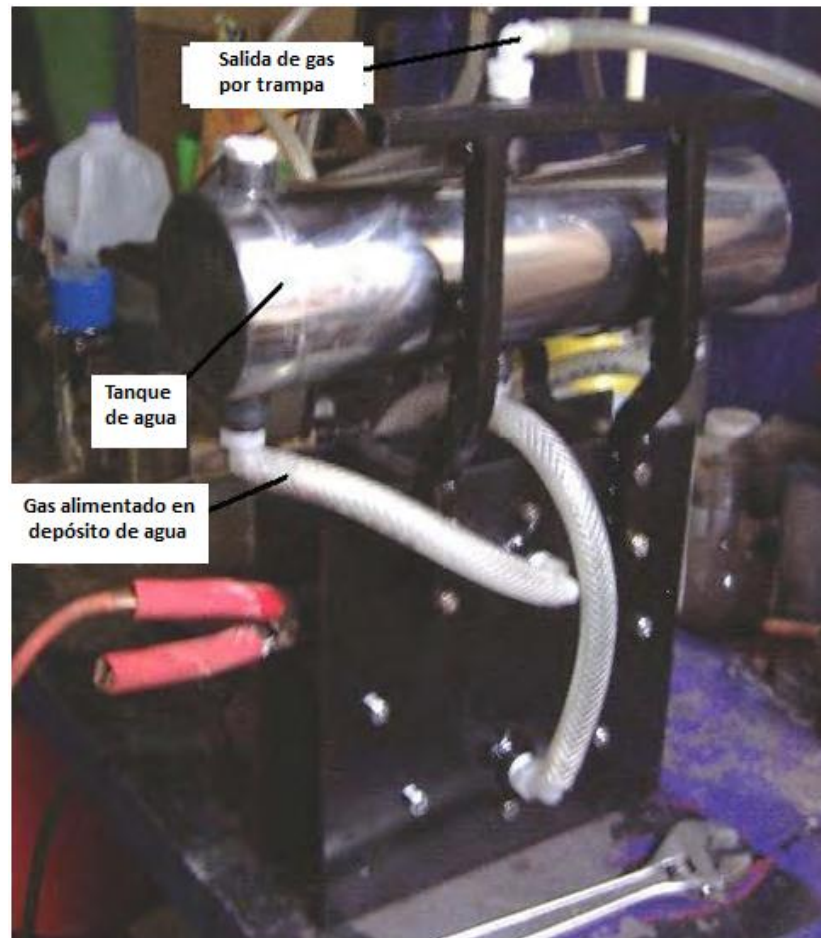
Es muy importante mencionar que el tanque también contiene el electrolito y no solamente el agua. Debido a esto se debe tener un especial cuidado con ello, ya que si se abre el tanque para añadir agua, debe tenerse presente que este contendrá el oxihidrogeno producto de la electrolisis; entonces no se debe permitir ninguna llama o chispa cerca, hasta que el gas se haya escapado hacia arriba y se haya dispersado.

Como el depósito de agua contiene el electrolito, es esencial tener al menos una trampa de vapor entre el generador y el motor, de modo que cualquier vapor del electrolito sea extraído del gas antes de que este alcance el motor.

Este generador produce 3 lpm de oxihidrogeno para una corriente de entrada de solamente 15 amperios. La operación de este generador es muy estable ya que la temperatura no se eleva a niveles excesivos.

A continuación se muestra una fotografía del prototipo.

**Figura 3. 41 Ensamble completo del generador**

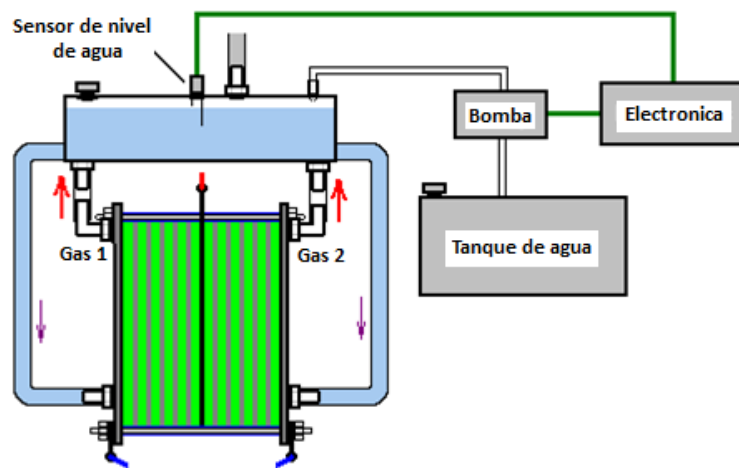


Finalmente debe mantenerse el nivel de electrolito en el tanque. Este nivel de líquido es mantenido dentro de límites bastante estrechos para que la concentración del electrolito pueda ser mantenida en el porcentaje deseado. El electrolito usado puede ser una concentración óptima y eficiente del 20 % por peso de hidróxido de sodio (NaOH) o el 28 % por peso de hidróxido de potasio (KOH).

En el 20 % en peso la concentración de NaOH tiene 200 gramos de NaOH añadido a aproximadamente 800 cc del agua destilada. En el 28 % en peso la concentración de KOH tiene 280 gramos de KOH añadido a aproximadamente 720 cc del agua destilada. Se debe prestar mucha atención a las precauciones de seguridad necesarias para la manipulación y preparación del electrolito.

El arreglo de abastecimiento de agua puede verse en la figura 3.42

**Figura 3. 42 Diagrama de control del abastecimiento del agua**



### 3.5 QUINTO PROTOTIPO<sup>5</sup>

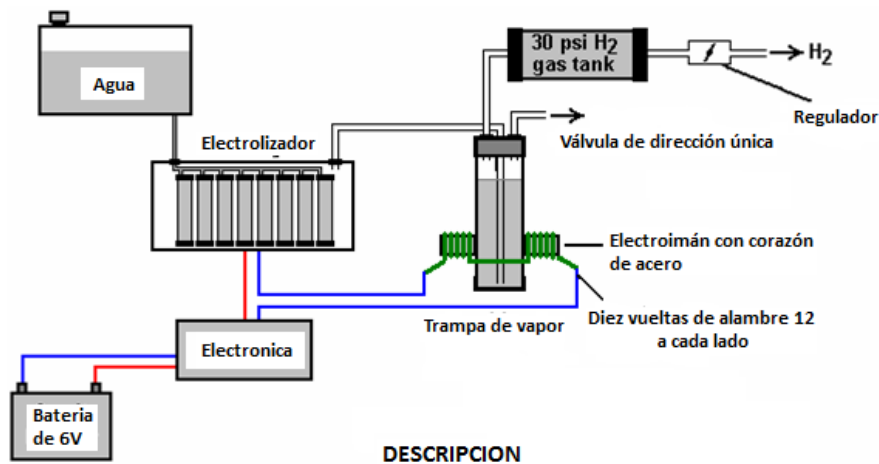
Este es un diseño concebido con la idea de hacer un arreglo diferente en la configuración geométrica de los electrodos para sacarle la mayor eficiencia posible al proceso de electrolisis. El rendimiento de este prototipo es aproximadamente de 17 litros de oxihidrogeno por minuto.

En un contorno amplio, este prototipo se alimenta con agua desde un tanque, que debe estar posicionado arriba del generador para que la gravedad ayude en el proceso de alimentación de agua. El generador contiene varios pares de electrodos en forma de élice que dividen el agua dentro en hidrogeno y oxigeno cuando se alimenta con señal eléctrica a través de un

<sup>5</sup> Referencia de "The Zach West Electrolyser", <http://www.free-energy-info.com>

modulo electrónico. El gas producido por el generador es alimentado a un contenedor primario de doble uso ya que previene cualquier accidente de ignición de los gases por retroceso de llama y quita la mayor cantidad de oxígeno del gas que se está produciendo. El gas de oxihidrogeno produce un golpe de gran velocidad cuando se inflama por eso el depósito primario necesita ser de construcción fuerte para resistir esto.

**Figura 3. 43 Esquema general del quinto prototipo**



Algunas peculiaridades de este diseño es que el gas hidrogeno producido desde el electrolizador no es alimentado directamente sino que en cambio este va a un tanque de presión que permite aumentar la presión hasta  $30 \text{ lb/in}^2$  antes de poder suministrarlo. El gas en el tanque de presión que ha atravesado el depósito primario, tendrá vapor de agua además de hidrogeno así que se debe tener precaución cuando la presión baje pues producirá vapor de flasheo que nos dará problemas en el sistema si no lo sabemos controlar.

La mayoría del oxígeno producido por la electrolisis es sacado a través de una válvula unidireccional de 30 psi que se instala para guardar la presión en el depósito.

La forma en que se instalan los dispositivos de este arreglo permite darle ventajas al conjunto pues tiene un sistema simple de llenado de agua. Este suministro de agua opera teniendo un tanque hermético posicionado a un nivel más alto que el generador. Una tubería de diámetro pequeño de  $\frac{1}{4}$  "alimenta el agua a través de la tapadera del generador

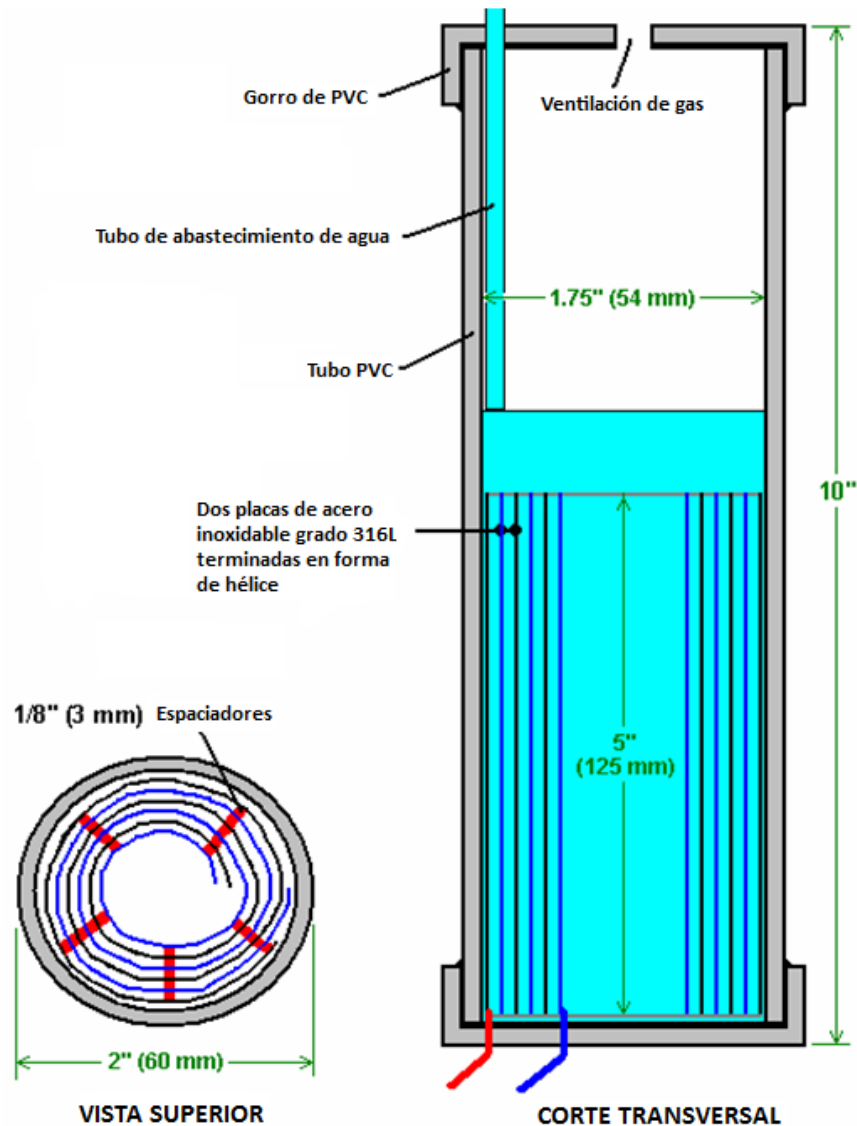
desde el tanque de suministro directamente hacia abajo, terminando hasta exactamente el nivel de la superficie deseada del electrolito de cada una de las tuberías del generador.

Cuando la electrólisis baja el nivel del electrolito baja al fondo de la tubería, las burbujas de gas pasan hacia arriba de la tubería dejando que algo de agua fluya desde el tanque para que suba el nivel de la superficie del electrolito de nuevo a la posición de diseño. Éste es un sistema pasivo muy sencillo que no necesita ninguna parte móvil, control eléctrico o electrónico pero da un control bastante aceptable del nivel del electrolito. Es muy importante que la tapadera sea hermética para prevenir que el tanque se descargue dentro del electrolizador.

El generador contiene ocho pares de electrodos enrollados en forma de hélice e insertados dentro de una tubería de 50mm de diámetro y 250mm de longitud. Cada electrodo esta hecho de 250mm de longitud por 125mm de ancho de acero inoxidable grado 316L.

A pesar que se ha encontrado que el acero inoxidable 316L es el material más conveniente para los electrodos nos dará siempre un problema pues no es totalmente un conductor eléctrico. Por lo tanto cada electrodo causa una pérdida de voltaje de casi medio voltio, entonces las medidas de preparación de las superficies, limpieza y acondicionamiento son necesarias para alcanzar el máximo rendimiento de los electrodos. El arreglo se muestra a continuación:

Figura 3. 44 Esquema de la celda



Debido a la elasticidad del material de los electrodos se usan espaciadores de material aislante para mantenerlos uniformemente separados a lo largo de su longitud cada espaciador consiste en una tira vertical espaciadas 1/8" en la longitud de los electrodos.

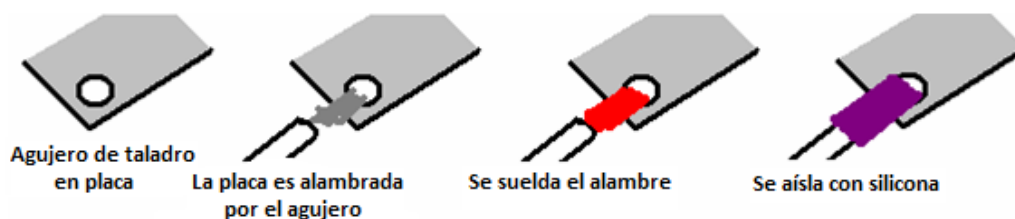
Una característica importante de este diseño es que cada uno de los pares de electrodos es eficazmente un electrolizador separado desde la superficie hasta el fondo, efectiva y físicamente aislado de los otros. El agua de alimentación llega a través de la tapadera superior que tiene un agujero taladrado en ella para permitir que el gas escape. Los

alambres de alimentación eléctrica llegan a través de la base y que debe estar sellada para evitar fugas del electrolito. Cada una de estas unidades tiene algún electrolito guardado sobre él, así que no hay ninguna oportunidad que alguna parte de la superficie del electrodo no pueda generar gas. Las tapaderas del fondo son tapaderas normales de tubería de PVC.

Se deberá utilizar alambre eléctricos AWG #12 / SWG 14 en el suministro de corriente para garantizar que no habrán problemas de calentamiento.

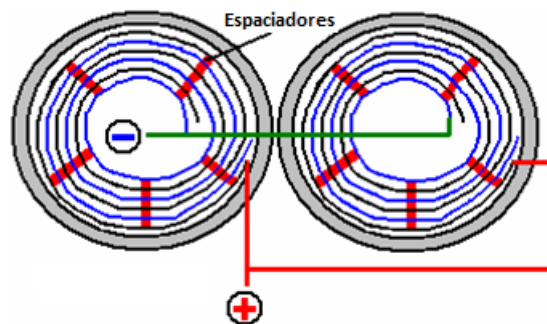
Para hacer la conexión eléctrica a los electrodos se deberán abrir agujeros en las esquinas para poder amarrar el alambre y soldarlo, como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 3.45 Procedimiento para conexión correcta de los electrodos**



Como el juego total consiste en ocho celdas, estos electrodos se ponen en el contenedor conectado juntos en pares como se muestra en la figura 3.46.

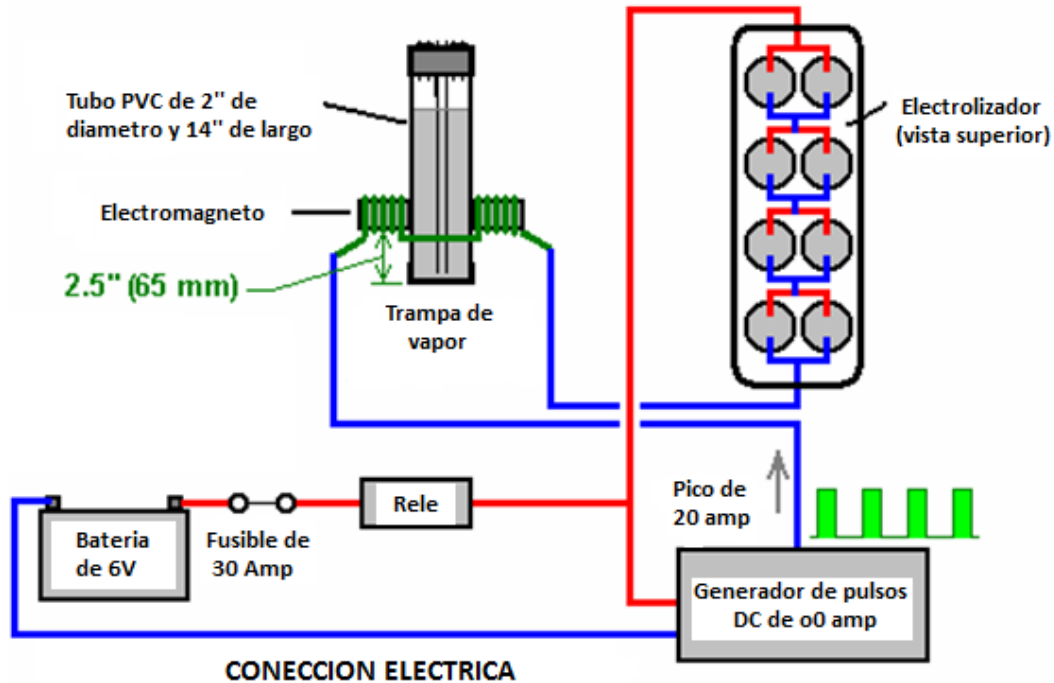
**Figura 3.46 Detalle de la conexión eléctrica en las celdas**





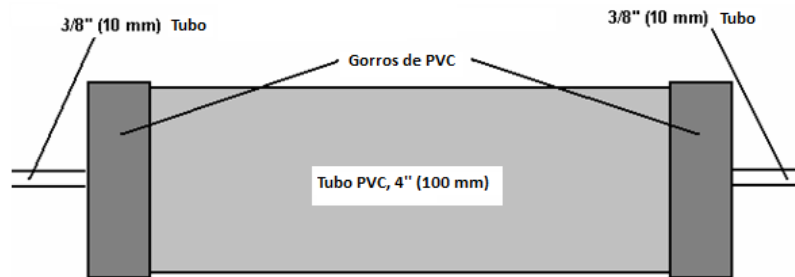
El juego completo de las ocho celdas conectadas en serie se muestra a continuación.

Figura 3.47 Circuito eléctrico



El depósito primario es de una tubería de 2" de diámetro de PVC y un segundo es localizado inmediatamente después del primario, Este depósito extra o tanque de almacenamiento es para dos cosas, la más importante, previene que el gas en el tanque de almacenamiento se inflame a causa de una llama de retroceso mediante una válvula instalada en el y segundo, que remueva todos los rastros de hidróxido de potasio húmedo que puedan dañar el equipo al que se esté suministrando el gas. El tanque de almacenamiento del gas también es hecho de tubería de PVC de 4" de diámetro y 14" de longitud con tapaderas normales para tubería de PVC, como se muestra a continuación:

**Figura 3. 48 Detalles del depósito a presión**



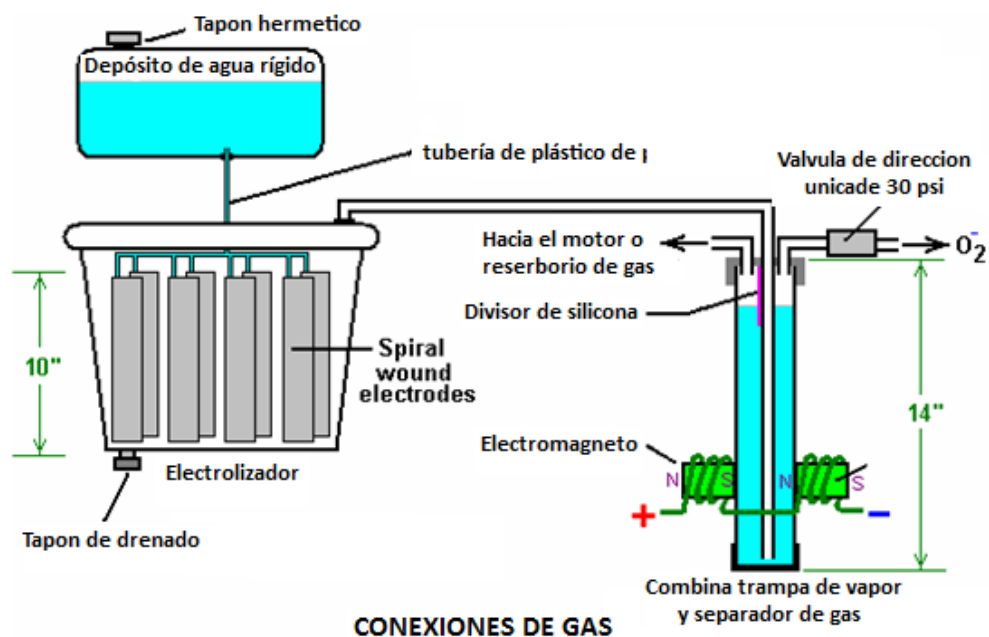
La corriente eléctrica que se maneja en el electrolizador viene de un Modulador de Pulso Ancho (Control de Velocidad DC)

Cuando el rango de esta unidad esta a 15 amp máximo, se agregan otros 15 Amperio con el transistor FET en paralelo para levantar la capacidad actual de salida a una capacidad de corriente de 30 amp. Un fusible debe proteger contra los cortos circuitos accidentales y un relay controlara cuando el electrolizador debe estar produciendo gas. El alambre que se usa para la conexión tiene una capacidad de corriente continua máxima de sólo 10 amp, aunque las corrientes de pico pueden ser de 20 amp, la corriente media es mucho más baja que eso.

Dos electroimanes fuera de la trampa de condensado, posicionados 2.5 pulgadas sobre la base se conectan al suministro eléctrico del generador, y esto causa que mas burbujas de oxigeno e hidrogeno se separen y salgan del depósito primario a través de diferentes tuberías. Esta división a través del depósito primario ayuda a mantener los gases sin que se vuelvan a mezclar de nuevo en la superficie del agua. El depósito primario además quita muy bien la humedad de dióxido de potasio saliendo de las burbujas de gas que suben a la superficie.

El ensamble completo se muestra en la figura 3.49

Figura 3. 49 Detalle de la conexión del gas



Debe comprenderse que el tanque de agua, el generador, el depósito primario y el depósito de hidrogeno, todos operan a  $30 \text{ lb/in}^2$ . Esto significa que cada uno de estos recipientes debe ser bastante robusto para resistir esa presión con facilidad y que la válvula unidireccional de 30 psi en la tubería de venteo del oxigeno es una parte esencial del diseño como medida de seguridad.

Como las burbujas de gas del generador se escapa al tanque de agua cada vez que se alimenta un poco de agua al electroizador, el contenido sobre la superficie del tanque se vuelve una mezcla más y más fuerte de aire e hidróxido. Por consiguiente, se vuelve rápidamente una mezcla explosiva además es bastante probable que almacene electricidad estática por eso es muy importante la conexión a tierra de ambos depósitos.

El hidróxido de potasio que se utiliza en el electrolito es un verdadero catalizador y mientras promueve el proceso de la electrólisis, no se consume durante la electrólisis, la única pérdida es en el depósito primario. Por lo tanto se debe poner el contenido de este depósito dentro del generador de vez en cuando, llenándolo de nuevo con agua fresca.

✓ Condiciones de preparación del electrolito

El hidróxido de potasio (KOH) también es conocido como Potasio Caustico y es muy cáustico. Por consiguiente, es necesario manejarlo con cuidado y mantenerlo fuera del contacto con la piel, y más aun de los ojos.

Este diseño requiere una frágil solución de hidróxido de potasio. Esto se hace agregando pequeñas cantidades de hidróxido de potasio al agua destilada puesta en el recipiente.

Cuando se prepare la mezcla del electrolito y si se utiliza KOH solido este se debe agregar al agua y no viceversa además debe hacerse en un recipiente plástico resistente y que sobrepase la capacidad de la mezcla como mínimo el doble. El mezclado debe hacerse en un área bien ventilada y las protecciones personales tomadas muy en cuenta para evitar riesgos.

Cuando se mezcle el electrólito no debe usarse agua tibia, pues la mezcla por si sola genera calor y hacer esto lo incrementara mas volviéndose peligroso. Si es posible se debe poner el recipiente dentro de otro contenedor más grande para ayudar a mantener la temperatura baja y si ocurre un derrame se hará sobre el recipiente externo. Se deben agregar solo pequeñas cantidades de KOH en un momento y revolverse continuamente.

### **3.5.1 CONDICIONES DE PREPARACIÓN DE LAS PLATINAS**

Se les debe dar el mismo tratamiento que a los diseños anteriores. Es importante que cualquier partícula creada por el proceso de marcado deba ser limpiada de las platinas y esto puede hacerse con agua de garrafón debido a que esta no contiene cloro y otros químicos que el agua normal pero siempre el ultimo enjuague debe hacerse con agua destilada.

Una vez creado el marcado prepare de 5% a 10% de NaOH (50 gr de NaOH a 100 gr de NaOH en 900 cc de agua) y déjelo reposar.

Enrolle las platinas en su forma de espiral con dos capas de 1/8" (3 mm) espaciando el material con cuero entre las platinas y dejando que salga un pedazo extra de la longitud de las platinas y deslícelas dentro de la longitud de tubería plástica cortada. Hale el material espaciador deslizándolo hacia afuera y comience a insertar cinco espaciadores de 1/8" x 1/8" entre las platinas. Siga tirando de la capa espaciadora y ponga los espaciadores en la parte desnuda hasta insertarlos en toda la longitud de las platinas.

Llene el electrolizador con solución de NaOH hasta que las platinas se cubran. Ahora aplique un voltaje en todo el juego de platinas a través de las líneas puestas en las dos platinas del extremo. Este voltaje debe ser por lo menos de 2 voltios por celda, pero no debe exceder 2.5 voltios por celda, para cuatro pares de espirales, éste es de 8 a 10 voltios. Se debe mantener este voltaje a través del juego de platinas durante varias horas continuas.

Es probable que la corriente sea de 4 amperios o más. Cuando este proceso continúa, la acción de hervir soltará partículas de los poros y de la superficie del metal. Este proceso producirá gas oxihidrogeno y es muy importante que no se permita que este se acumule en cualquier parte.

Después de varias horas se debe desconectar el suministro eléctrico y poner la solución de electrolito dentro de un contenedor. En este punto se tienen que enjuagar las celdas completamente con agua destilada. Luego se saca la solución y se filtra y se repite el procedimiento anterior hasta que las platinas o electrodos dejen de sacar partículas dentro de la solución. Lo más recomendable es utilizar una nueva solución de NaOH cada vez que se hace el proceso de limpieza pero puede tener que usar muchas soluciones ya que este dura aproximadamente 3 días.

Para el proceso de acondicionamiento final puede utilizar la misma concentración de solución como en la limpieza. Llene el electrolizador con esta solución diluida y aplique aproximadamente 2 voltios por celda y deje que la unidad arranque. Si la corriente suministrada es bastante estable, se debe continuar con esta fase durante dos a tres días, agregando agua destilada para reemplazar la que se consume. Si la solución cambia de

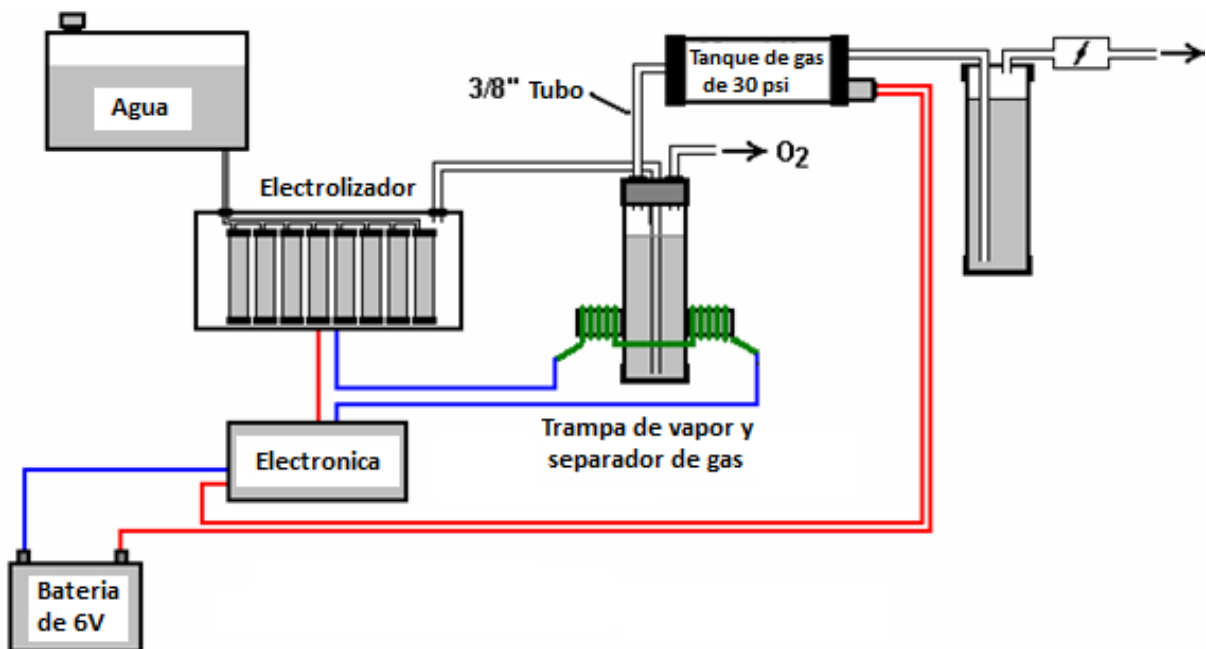
color o desarrolla una capa en la superficie del electrolito, entonces el juego de celdas necesita mas proceso de limpieza.

Después de dos o tres días de estar funcionando, saque la solución de NaOH y enjuague el electrolizador completamente con agua destilada.

También como medida adicional de seguridad se puede instalar otro depósito más allá del tanque para garantizar extraer todos los residuos de vapor de hidroxido de potasio que aun vayan en el gas.

El arreglo final quedaría como la siguiente figura.

**Figura 3. 50 Conjunto con deposito adicional y conexión eléctrica**



### 3.6 SEXTO PROTOTIPO<sup>6</sup>

Llegamos ahora a un importante paso adelante en la tecnología del gas oxihidrogeno. Los sistemas anteriores han operado la electrólisis con corriente directa. El prototipo 5 es un caso límite, en el que se hace uso de un simple modulador por ancho de pulso o "DC Motor Speed Control", en lugar de sólo pasar la corriente directamente a través de la célula.

En la operación del electrolizador con corriente directa la corriente que fluye a través de la célula es un factor absolutamente clave en la producción de gas, y uno de los más difíciles de controlar con precisión y economía.

Cuanto mayor es la corriente, mayor es la tasa de producción de gas y dicha corriente puede ser controlada por la concentración de hidróxido de potasio en el electrolito (agua más KOH) y el voltaje a través del electrolito en la célula, pero es más eficaz utilizar la concentración máxima de KOH (280 g de KOH para 730 cc de agua) y luego controlar la corriente con un modulador de ancho de pulso ("DC Motor Speed Control").

La tensión en el electrolito posee un efecto limitado, ya que alcanza un máximo a tan sólo 1.24 voltios. Hasta ese momento, un aumento de la tensión causa un aumento en la tasa de producción de gas. Una vez que el voltaje recibe más de 1.24 voltios, aumentando aún más no se produce ningún aumento de la tasa de producción de gas.

Si la tensión se incrementa por encima de 1.24 voltios, la tensión adicional va a calentar el electrolito. Suponga que la corriente a través de la célula es de 10 amperios. En ese caso, la energía utilizada para producir el gas es de  $10 \text{ amperios} \times 1.24 \text{ voltios} = 12.4 \text{ vatios}$ .

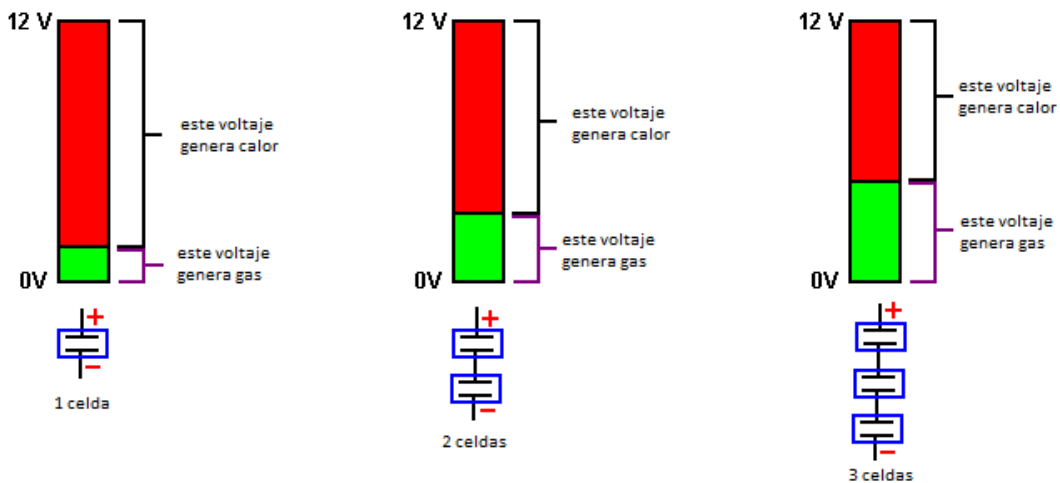
Cuando el motor está en marcha, la tensión en los bornes de la batería será de unos 13.8 voltios debido a que el alternador proporciona la tensión adicional a la transmisión de corriente en la batería. El exceso de voltaje aplicado a la celda es de 1.24 menos las pérdidas, entonces el voltaje disponible debe ser alrededor de 12.5 voltios. El poder que

---

<sup>6</sup> Referencia de "The Bob Boyce Electrolyser", <http://www.free-energy-info.com>

calienta el electrolito es alrededor de 12.5 voltios x 10 amperios = 125 vatios. Que es diez veces el poder que se usa para producir el gas. Esto es muy, muy ineficiente. El diagrama de la figura 3.51 ilustra esta situación con mayor claridad.

**Figura 3.51 Optimizando la corriente de alimentación con el numero de celdas**



El mejor material utilizado para los electrodos son placas de acero inoxidable 317L, pero por razones de costo se utilizan normalmente el 316L. Debido a que se da una caída de tensión en la placa se hace necesario aplicar cerca de 2 voltios a cada lado de la celda. Así que, si suministramos 12 voltios, entonces es posible alimentar una fila de 6 celdas a través de la batería del vehículo. Con el motor en marcha y la disposición de casi 14 voltios, siete células dan la mayor eficacia posible para la producción de gas.

El calentamiento del electrolito es una cosa totalmente mala ya que estas son unidades generadoras de una buena cantidad de vapor de agua fuera del electrolito y esta mezcla con el gas se podría ir directamente al motor.

La inyección de agua, que es un fino rocío de gotas de agua, en un motor aumenta su rendimiento debido a la conversión de agua instantáneamente en vapor en el momento de la combustión. Esto mejora tanto la potencia del motor y los kilómetros por galón, y hace que la temperatura de la recámara disminuya ligeramente y mejora la vida del motor. Pero en



nuestro caso este vapor de agua podría arrastrar otros gases que no sean solamente hidrogeno y oxigeno y causar daño severo al motor.

A medida que el voltaje aplicado a la célula es más o menos fijo, el flujo de corriente puede ser controlada por la concentración de hidróxido de potasio en el electrolito y la superficie de la placa, pero el mejor método es utilizar la concentración máxima de KOH (280 g de KOH para 720 cc de agua destilada). La práctica general es muy simple, como el prototipo 1 la idea era tener una concentración muy baja de KOH para limitar el flujo de corriente.

Esta concentración se encuentra por prueba y error, mientras que es menos eficiente, debido a la resistencia del electrolito al flujo de corriente y la generación de calor en el electrolito en sí. Para compensar parte de esto, el prototipo 1 utiliza 3.45 voltios por celda y no el 2.0 voltios utilizada para un dispositivo de células aisladas.

Es recomendable usar el hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH). Cuando se utiliza bicarbonato de sodio, se estará produciendo 66% de gas oxihidrogeno, 30% de monóxido de carbono y 4% de dióxido de carbono. El carbono también envenena la capacidad catalizadora de acero inoxidable. La sal es también más inadecuada así como lo es el ácido de batería.

Un paso importante en este prototipo es el abandono de los sistemas de electrolizador simple descrito anteriormente para cambiar a un arreglo diferente, donde un gran número de células están conectadas en serie, y en lugar de aplicar un voltaje de DC al electrolizador, se usa, una forma de onda pulsátil compleja que se utiliza para alimentar la célula.

En este prototipo se logra un masivo aumento de la tasa de producción de gas utilizando un electrolizador, con un gran número de células en el. Se utilizan cien células (101 placas), en el electrolizador. Las unidades con sólo 6 células se inclinaban más hacia la fuerza bruta de la electrólisis DC, que tiende a enmascarar las ganancias producidas por pulsación. Como hay una caída de tensión en cada una de las placas de los electrodos, es habitual que se

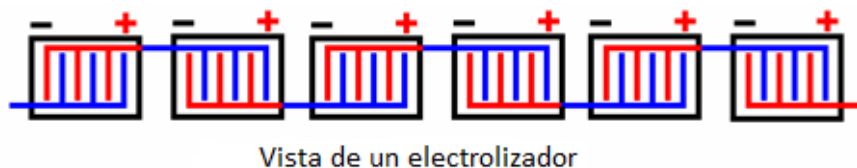
alimenten unos 2 voltios a través de cada celda para el funcionamiento de corriente continua. Sin embargo, en este prototipo se considera que, a impulsos de alta eficiencia, la tensión óptima para cada celda es de aproximadamente 1.5 voltios. Esto significa que un voltaje de aproximadamente  $1.5 \times 100 = 150$  voltios es necesaria para alimentar a su salida de pulso máximo.

Para conseguir este mayor voltaje, se utiliza un inversor de 110 voltios. Un inversor es un circuito electrónico que tiene una entrada de 12 voltios DC, y genera una salida de 110 voltios AC. Estos son fácilmente disponibles. La salida del inversor se convierte de corriente alterna a corriente continua pulsante, pasando la salida a través de cuatro diodos en lo que se llama un "puente de diodos".

Obviamente, no sería práctico utilizar un centenar de células conectadas en cadena en el electrolizador. No habría suficiente espacio físico en el compartimento del motor, por lo que se necesita un estilo diferente de la construcción de la célula.

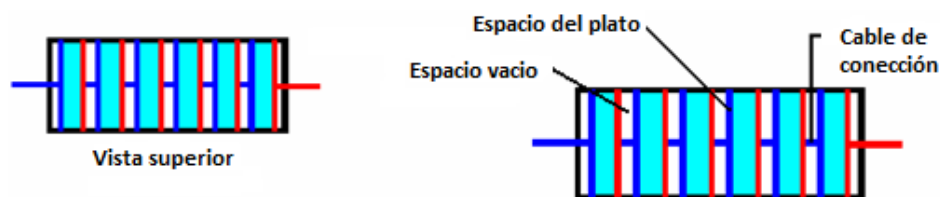
La vista de varias células por separado podría ser representada por algo como esto:

**Figura 3. 52 Conexión de seis celdas en serie**



Aquí el lado positivo de cada celda se conecta al lado negativo de la celda de al lado para proporcionar un conjunto de seis celdas interconectadas que actúan en serie. La corriente que fluye a través del electrolizador pasa a través de cada celda de manera que cada una recibe exactamente la misma corriente que las demás. Este es el mismo tipo de arreglo como el de seis celdas en una conexión en cadena. Para reducir el tamaño físico de la unidad, sería posible construir el electrolizador como se muestra en la figura 3.53

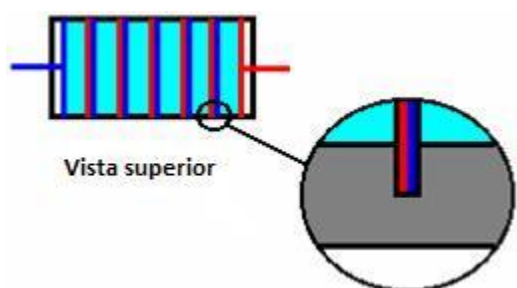
**Figura 3. 53** Ensamble de las celdas aisladas entre si

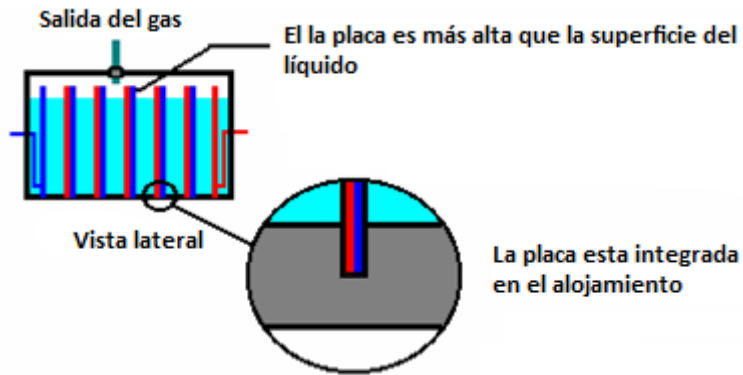


En este arreglo, las celdas individuales tienen sólo una placa positiva y una placa negativa. Entre cada arreglo hay un espacio de aire que se forma entre la placa del lado positivo y la del lado negativo de la siguiente celda.

Estos espacios de aire son espacios desperdiciados que no contribuyen en nada al funcionamiento del electrolizador. Cada uno consta de una placa de metal, un hueco, y una conexión de cable a la placa de metal que sigue. Desde el punto de vista eléctrico, las dos placas de metal en los extremos opuestos de este arreglo conectado por un cable de enlace, funcionan correctamente, pero estos espacios de aire también podrían ser eliminados, lo que ahorraría una placa de metal y el alambre que conecta cada celda. Esto puede ser difícil de visualizar, pero produce un arreglo, como se muestra en la figura 3.54

**Figura 3. 54** Detalle del ensamble de las platinas en la base





Un electrolizador con un centenar de células, construido en este estilo tendrá 101 placas de metal y 100 cuerpos separados de electrolito. Esta disposición de las placas, cuando se construye con precisión, tiene un beneficio adicional por el campo magnético de funcionamiento. A pesar de estos grandes números de placas, el tamaño total de la unidad no tiene que ser excesivo.

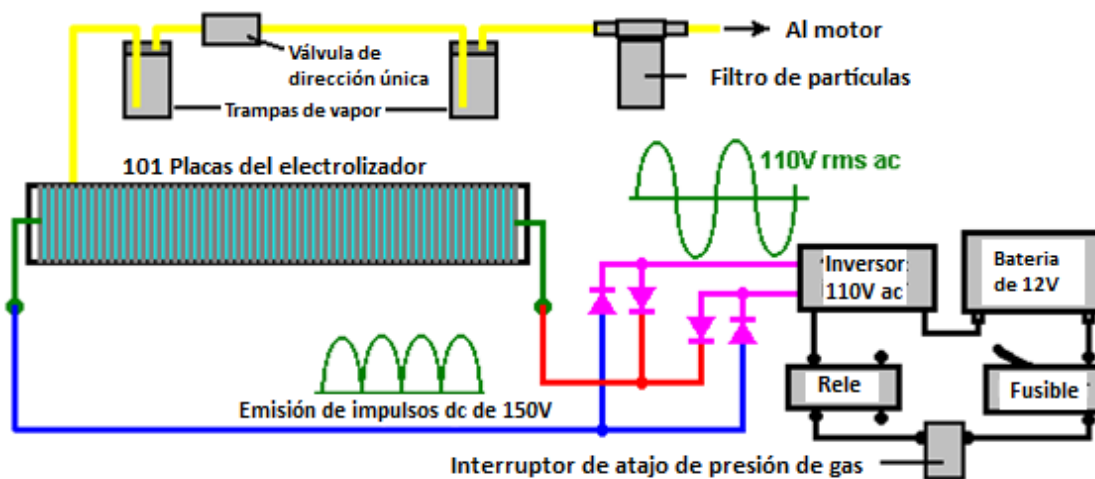
La separación entre las placas se establece, por ejemplo, 3 mm (1 / 8 de pulgada) y el espesor de la placa podría ser de calibre 16 (1 / 16 de pulgada o 1,5 mm), por lo que la anchura de un electrolizador 100-célula es de aproximadamente 20 pulgadas.

El tamaño de las placas puede ser determinada por el espacio disponible en el compartimiento del motor. Si hay una gran cantidad de espacio libre, entonces el tamaño de la placa puede ser seleccionada para poder pasar de dos a cuatro pulgadas cuadradas de área en ambos lados de cada placa, por amperio de corriente. Cada lado de cada placa se encuentra en una celda de electrólisis diferente por lo que una de 6 pulgadas por 6 pulgadas tendrá 36 pulgadas cuadrados en cada cara. La elección de la corriente del electrolizador será influenciada por el tamaño y el costo del inversor elegido para alimentar el electrolizador y el consumo de corriente admisibles de la batería.

El nivel de electrolito debe mantenerse hasta tres pulgadas de la parte superior de la placa de seis pulgadas porque la tasa de producción de gas es tan alta que el electrolito tiende a salpicar.

Para el funcionamiento correcto de un electrolizador de este tipo, el circuito es muy sencillo. El inversor debe ser montado de forma segura, preferentemente en la corriente de aire que entra para refrigerar el radiador. El uso de un puente de cuatro diodos convierte la producción de CA del inversor en pulso DC y produce el esquema eléctrico se muestra aquí:

**Figura 3. 55 Diagrama del puente de cuatro diodos**

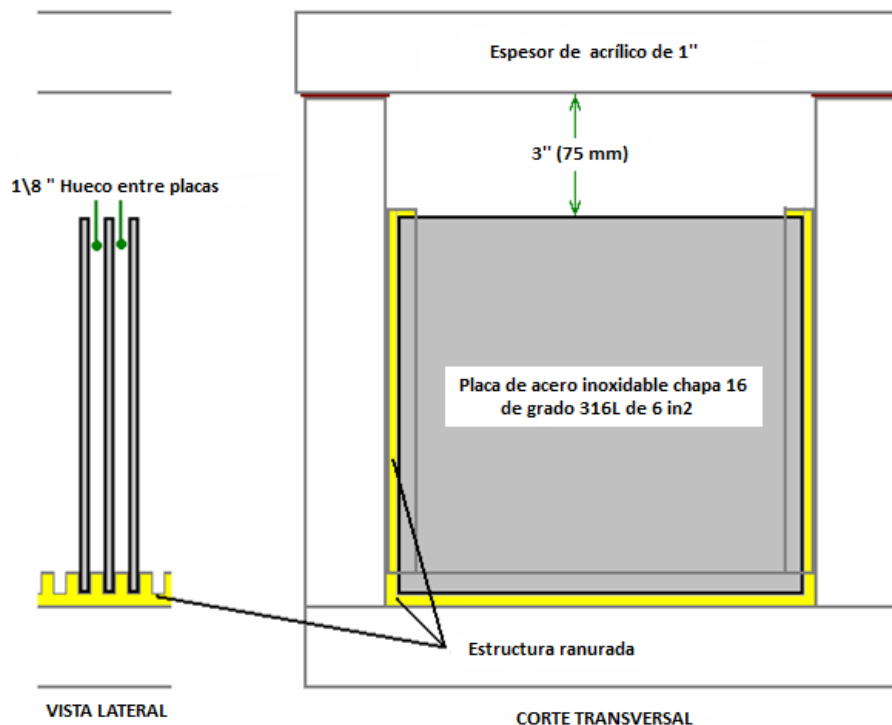


Como la tensión de red es citada como un valor medio ( raíz media cuadrática) que tiene un pico de tensión del 41% más que eso, significa que la DC pulsante tiene un pico de tensión de poco más de 150 voltios para la potencia nominal de salida de 110 voltios de corriente alterna del inversor.

### 3.6.1 LA CONSTRUCCIÓN DE LA CAJA

La caja tiene dos extremos, dos caras, una base y una tapa. De éstos, los dos lados y la base necesitan 101 ranuras precisas. Las ranuras están ahí para mantener las placas de los electrodos en su posición de forma segura y sin embargo que den suficiente holgura para permitir que los niveles de electrolito se mantengan dentro de la celda.

Figura 3. 56 Detalle de la caja para alojar los electrodos



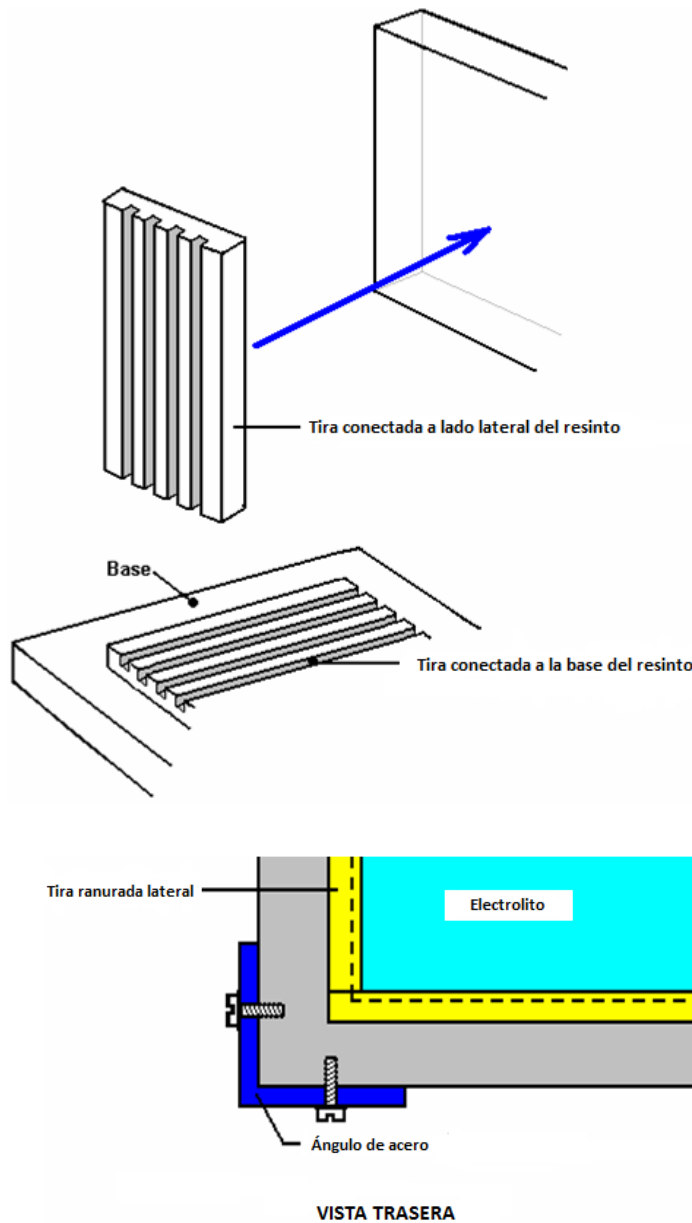
La base y los dos lados de la celda deben tener ranuras cortadas en ellos para tomar las placas. Hay que recordar que las planchas de acero se expanden cuando se calientan, por lo tanto las ranuras deben ser lo suficientemente profundas para contrarrestar este efecto, además de esto se debe elegir un acrílico lo suficientemente resistente para evitar posibles rupturas del material en el momento de realizar los cortes de las ranuras.

El uso de Polietileno o Polietileno de Alta Densidad podría ser una buena alternativa ya que no tiene el mismo problema del calor y también puede adoptar la expansión de las placas mucho mejor, además de ser un material más barato.

Los surcos que se cortan para las placas deben ser de tres diez milésimas de una pulgada más ancho que el espesor de las placas. El espesor de la chapa es de calibre 16 que es un dieciseisavo de pulgada de espesor o 0.0625 pulgadas (o 1.5 mm), de modo que el ancho de ranura recomienda para que se 0.0628

Los componentes de acrílico se pueden construir a partir de la hoja que es 3 / 4 " a 1" de espesor (18 mm a 25 mm) y las esquinas se pueden reforzar con ángulo de hierro fijándolas con tornillos.

**Figura 3. 57** Ensamble de la base ranurada



Se tiene que tomar muy en cuenta que se deben aislar todas las posibles fisuras o juntas de las diferentes piezas para impedir cualquier fuga entre el acrílico y las placas.

Las placas de acero inoxidable que tienen el conector que se utiliza para el alambrado del suministro eléctrico deben ser trabajadas con especial cuidado y se deben soldar todas las que sean posibles para evitar cualquier posible conexión floja y que está a su vez cause una chispa.

### **3.6.2 OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS PLACAS**

Un conjunto de 101 placas se necesitan para el electrolizador. El material de las placas es muy importante. Y debe de ser acero inoxidable calibre 16, tipo-316L, ya que contiene una mezcla de níquel y molibdeno en las proporciones correctas para que sea un catalizador muy bueno para la técnica de pulsación.

Es de tener un especial cuidado a la hora de cortar las placas, y no utilizar ningún tipo de corte que requiera flama, ya que el calentamiento puede cambiar las propiedades del acero que se pretende utilizar.

Los platos son cuadrados: 6-pulgadas por 6-pulgadas, pero en realidad no representan las 36 pulgadas cuadradas de superficie activa ya que parte de la superficie de la placa está dentro de los surcos y la parte superior del plato está por encima de la superficie del electrolito. Otro punto a recordar es que las 101 planchas de acero tienen un peso considerable y el electrolizador completo con el electrolito en el, tendrá un peso aún mayor.

La preparación de los platos es uno de los puntos más importantes en la producción del gas. Aunque el acero mencionado anteriormente es especialmente adecuado para su uso en un electrolizador, pero necesita recibir un tratamiento cuidadoso y preparación antes de que se produzca el nivel esperado de producción de gas.

Este tratamiento debe ser el mismo que se le dio a los diseños antes mencionados ya que se ha demostrado que es el más eficaz y da ventajas en cuanto al desprendimiento de la

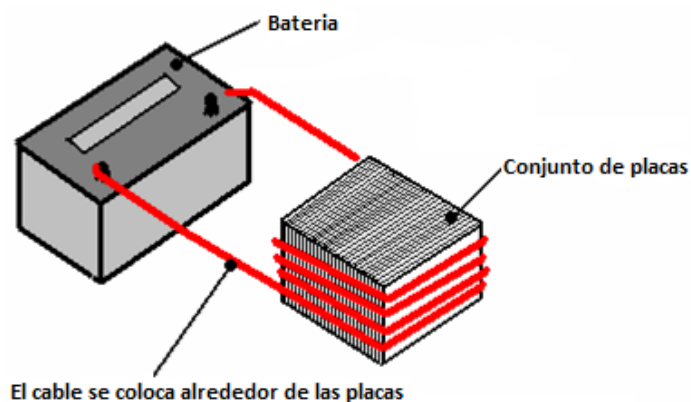


burbuja, aumento de área efectiva, entre otras que ya se mencionaron.

Es indispensable mantener una superficie muy limpia en las placas, y mantenerlas libres de grasa o cualquier tipo de aceite ya que esto será un problema cuando se estén formando las burbujas de gas.

Se debe tener en cuenta que la electrólisis no es sólo un proceso eléctrico, sino también es un proceso magnético. Es importante que las placas se alineen magnéticamente para que la eficiencia del funcionamiento sea máxima. En teoría, el acero inoxidable no es magnético pero en la práctica estamos expuestos a estar trabajando con materiales que no cumplan con las especificaciones que teóricamente deberían tener. La forma más fácil para hacer frente a esta situación es dar a las cajas una orientación magnética leve. Esto puede hacerse simplemente con unas cuantas vueltas de alambre alrededor de las placas y pasar algunos breves impulsos de corriente directa a través del alambre. Si las placas son perfectas y no magnéticas, entonces este proceso no tendrá ningún efecto.

**Figura 3. 58 Forma de magnetización del conjunto de placas**



Obviamente, las placas deben mantenerse en la misma dirección cuando se encaja dentro de la caja contenedora.

El siguiente paso en el proceso de preparación es hacer una débil solución de hidróxido de sodio. Esto se hace mediante la adición de pequeñas cantidades de hidróxido de sodio al agua contenida en un recipiente.

El Hidróxido de sodio NaOH es también un buen catalizador, y siempre se usa para la limpieza de las placas mientras KOH es un 20% más eficiente y se usa para el electrolito de trabajo. Si se mezcla KOH sólido con el agua, siempre se debe añadir el KOH al agua, y no al revés. La mezcla debe hacerse en un área bien ventilada, sin corrientes de aire que puedan soplar el KOH alrededor. Cuando se mezcla el electrolito, nunca se debe utilizar agua tibia. El agua debe ser fresca, porque la reacción química entre el agua y el KOH genera una gran cantidad de calor.

#### ➤ **La limpieza de las placas**

Se prepara de un 5% a 10% (en peso) de solución de NaOH. Una solución al 5% en peso es de 50 gramos de NaOH por 950 cm<sup>3</sup> de agua. Una solución al 10% en peso es de 100 gramos de NaOH por 900 cm<sup>3</sup> de agua. Se colocan las placas en la caja del electrolizador, manteniéndolas magnéticamente emparejadas. Luego se llena el electrolizador con la solución de NaOH hasta que las placas son cubiertas.

Un voltaje se aplica ahora en todo el conjunto de placas, esta tensión debe ser al menos de 2 voltios por celda, pero no debe exceder de 2,5 voltios por celda. Se mantiene esta tensión en el juego de placas durante varias horas a la vez. La corriente deberá rondar 4 amperios o más. Como este proceso continúa, la acción de ebullición afloja las partículas de los poros y las superficies del metal.

### **3.6.3 LA OPERACIÓN DE LA CÉLULA**

Se mezcla una solución de hidróxido de potasio (280 g de KOH añadido a 720 cm<sup>3</sup> de agua). El llenado del electrolizador depende de si la electrólisis de corriente continua se va a utilizar, o la electrólisis de resonancia.

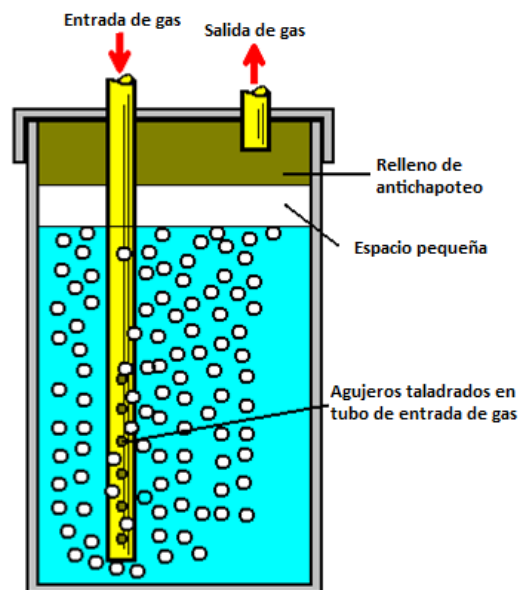
Para la electrólisis de corriente continua, se llena el electrolizador cerca de una pulgada por debajo de la parte superior de las placas. La tensión continua aplicada al electrolizador será de aproximadamente 2 voltios por célula o un poco menos, por lo que este electrolizador de 100 celdas tendrá alrededor de 180 voltios. Esta tensión se genera con un inversor.

Para el funcionamiento con resonancia, se llena el electrolizador a la mitad de la altura de plato, porque la producción de gas es tan rápida que debe quedar un espacio considerable que permita alojar temporalmente el gas que sale de las placas. Se utilizan cerca de 1.5 voltios por celda.

### ➤ Suministro de Agua

El electrolizador deja pasar una pequeña cantidad de hidróxido de potasio en forma de vapor, pero este es eliminado del gas en la primera trampa de condensado o depósito primario. Dos trampas son las utilizadas, la primera se encuentra al lado del electrolizador y está conectado a ella a través de una válvula unidireccional.

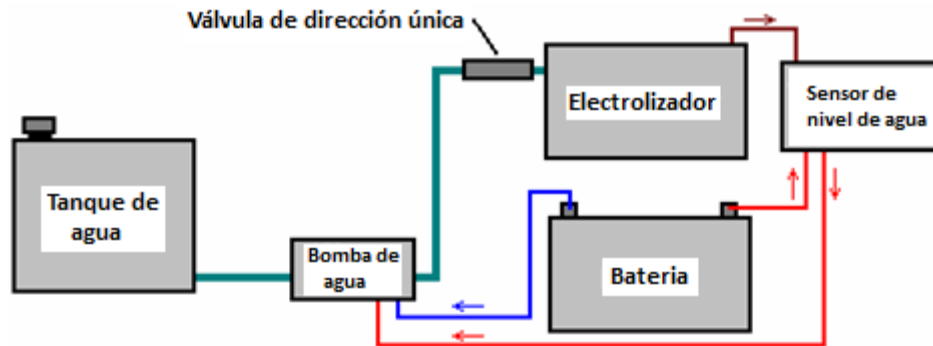
**Figura 3. 59** Tubería del depósito para optimizar el filtrado del gas



La segunda está situada cerca del motor. El agua de las trampas puede verterse de nuevo en el electrolizador ya que por su naturaleza de funcionamiento se estará concentrando cada

vez más con hidróxido de potasio y al verter su contenido en el electrolizador disminuiríamos las pérdidas de catalizador.

**Figura 3. 60 Diagrama de conexión del sistema de reabastecimiento de agua**



Una sonda en el interior del electrolizador podría medir el nivel del electrolito y detectar cuando ha disminuido para encender una bomba que suministre más agua al electrolizador.

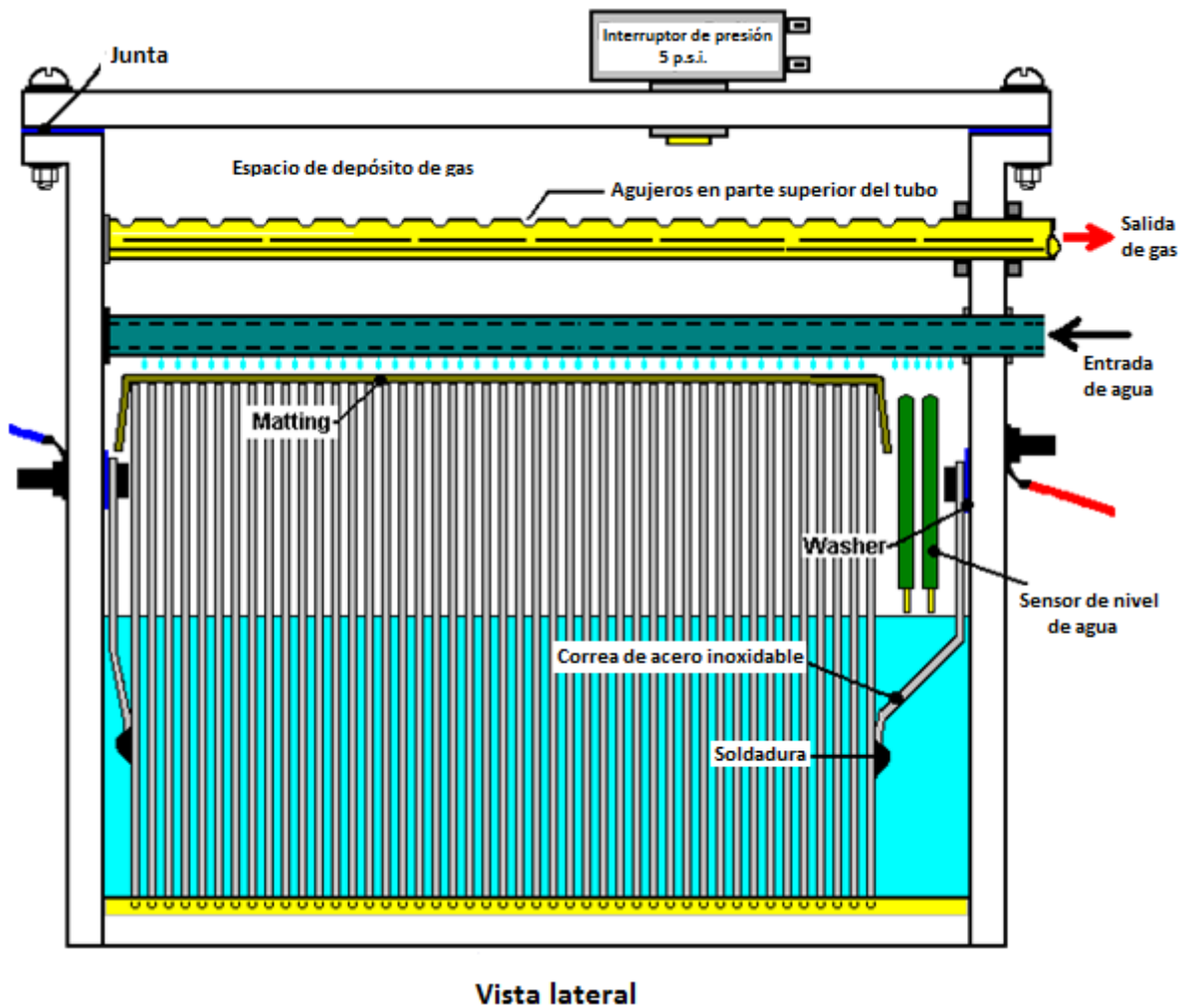
Un problema con este electrolizador es hacer frente a la pérdida de agua. Como las placas tienen que ser separadas con estrecha precisión y puesto que el electrolito entre cada célula tiene que ser aislado efectivamente de las otras, es de vital importancia mantener un suministro constante y uniforme de agua al electrolizador y uniforme a cada una de las células respectivamente.

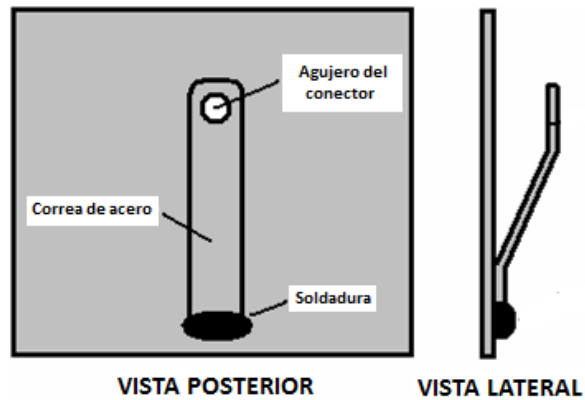
Si el nivel de agua de cualquier célula cae por debajo del nivel de las otras, entonces el gas producido en esa célula será ligeramente inferior a las otras, por lo que se vierte agua hasta que el nivel coincida de nuevo.

El sensor de nivel de agua puede ser simplemente un alambre de acero inoxidable rígido a cada lado de una célula. Estos cables deben ser aislados para asegurarse de que no hagan corto circuito con las placas que están a su lado. Deben establecerse de manera que sus puntas se encuentran en el nivel de la superficie prevista del electrolito.

Si el nivel del electrolito desciende por debajo de la punta de los sensores de alambre, esto indicara que se necesita más agua y un circuito se abrirá de inmediato para conmutar un relé que activara la bomba de suministro que elevará el nivel del agua hasta que el nivel del electrolito llegue a la punta del alambre de nuevo.

**Figura 3. 61** Ensamble del cuerpo del electrolizador



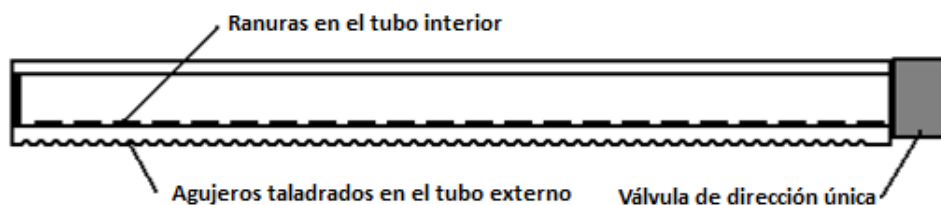


Las placas en cada extremo tiene una lamina de acero inoxidable soldada a ellas a fin de permitir las conexiones eléctricas.

El suministro de agua se dispone para alimentar a una cantidad igual de agua a cada célula.

El diseño tiene una pipa de abastecimiento de agua de gran precisión con cortes en forma de ranuras. Las longitudes de las ranuras están directamente relacionadas con la distancia a lo largo de la tubería en la que se colocan. El objetivo es tener la misma cantidad de agua saliente en cada ranura, incluso aunque la presión del agua disminuya a lo largo de la tubería.

**Figura 3. 62 Tubo de abastecimiento de agua**

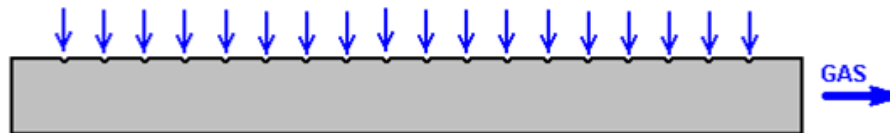


Otra alternativa de suministro de agua a cada una de la celdas del electrolizador es que podría utilizarse un suministro individual a cada una de ellas por medio de una serie de 100 tubería o mangueras de muy poco calibre que totalizarían el total de celulas existentes en el electrolizador; cada una de estas mangueras debería de estar conectada a un surtidor que dosificaría la misma cantidad de liquido a cada una de las salidas. Para esto es

recomendable realizar un análisis de caudales y presiones con las que se debería trabajar para realizar este suministro.

Para la evacuación de los gases del interior del electrolizador se puede utilizar una tubería de una pulgada de diámetro aproximadamente, la cual debe tener una serie de agujeros perforados; en la parte superior y a lo largo de ella, para evitar que cualquier salpicadura del electrolito se fugue por estos agujeros. Este sistema puede funcionar muy bien, ya que permite que un gran flujo de gas circule hacia afuera del electrolizador.

**Figura 3. 63 Tubo de salida de gas**



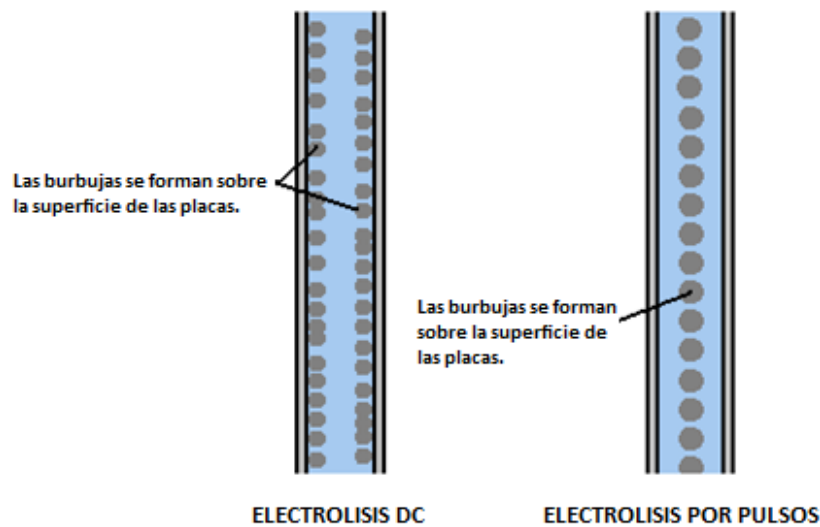
#### **3.6.4 LÍMITES DE POTENCIA**

Esta unidad de 101 placas, construida con precisión, acondicionada y sintonizada correctamente, puede generar 50 l / min de forma continua y ráfagas de hasta 100 l / min. Esto es alrededor de un litro por minuto de gas por celda lo cual debería ser suficiente para ejecutar un motor de combustión interna con una capacidad de un litro. Pero los motores pueden ser muy variados por lo que no puede haber una regla general para la tasa de producción de gas necesaria para un tamaño de motor en concreto a menos que este ya sea diseñado para trabajar con este tipo de combustible por el fabricante.

El voltaje de funcionamiento óptimo del electrolizador de 101 placas, se ha establecido como 1,5 voltios por celda. Sin embargo, la limitación del poder del generador de pulsos es un problema. Así que, se puede optar por utilizar un inversor de 220 voltios en lugar de los 110 voltios, ya descrito, entonces el número de células pueden ser del doble. Esto podría ser adecuado para su empleo con vehículos de hasta dos litros de cilindrada.

El aumento de la producción de gas se puede conseguir mediante el aumento de la anchura de las placas. Una posibilidad es hacer las placas de nueve pulgadas de ancho y mantener el electrolito en una profundidad de cuatro pulgadas, dando treinta y seis pulgadas cuadradas de superficie de placa. El tamaño de la placa entonces sería de 9 "x 6" o cualquier otra altura de hasta 9 "x 9". La manera en que las placas operan cuando se utiliza la electrólisis DC convencional es muy diferente de la manera en que actúan cuando se utiliza la electrólisis por pulsos:

**Figura 3. 64 Efecto del los pulsos eléctricos en la celda**



Con la electrólisis de corriente continua no pulsátil, las burbujas de gas que se forman en la cara de las placas se rompen, gracias a los miles de micro poros, que se han creado en la cara de cada placa a través de la preparación de la misma. Con la técnica de impulsos, se forman burbujas en el electrolito, entre las placas y da la impresión visual del electrolito en ebullición.

Debe tenerse en cuenta que con los grandes volúmenes de gas producidos; las burbujas que pasan a través del agua en la trampa de vapor no formen una columna continua de gas ya que ello podría llevar a una llama directamente a través del recipiente de la trampa. Una buena alternativa para combatir esta situación, es perforar un gran número de pequeños



agujeros en los lados del tubo que transporta el gas al agua de la trampa. Esto crea un gran número de pequeñas burbujas y es mucho más eficaz y seguro.

#### 4. ELECCIÓN DEL ELECTROLIZADOR

A continuación se muestra una tabla en donde se han comparado los distintos prototipos para tener una mejor panorámica de cuál es el más indicado para realizar su construcción y posterior ensayo en un motor de combustión interna. En dicha tabla solo se comparan datos comunes pero se debe de tener en cuenta que cada prototipo difiere mucho tanto en su construcción como en su dinámica de funcionamiento así que para una mejor comprensión se debe de revisar cuidadosamente el capítulo anterior.

**Tabla 4.1 Comparación de los diferentes prototipos**

Prototipo	Suministro de corriente	Tipo de construcción	Capacidad (litros/min)	Corriente de alimentación	Separación entre electrodos (m)	Voltaje de celda (Vol)	Tipo de materiales	Tipo de dispositivo	Electrodos	Electrolito	Ensamble	Tipo de montaje
1	Directamente de la batería	Facil	1.7	20	16	3.45	Baratos y de fácil acceso	Compacto	16 de acero inoxidable 302L	Agua destilada y KOH del 5 al 10% en peso	Housin (Ø101.6 mm X 325mm) Depósito primario (Ø25.4mm X 200mm)	Lo mas cerca de la succion.
2	Directamente de la batería	Facil	0.4	15	60	12	Baratos y de facil acceso	Compacto	Lamina de acero inoxidable 302L de 273.4mm X 152.4mm y varilla de 1/8"	Agua destilada y NaOH	Housin (Ø76.2mm X 177.8mm)	Lo mas cerca de la succion
3	Directamente de la batería	Facil	3	15	3	2	Caros pero de fácil acceso	Compacto	14 de acero inoxidable 316L (127mm X 101.6mm)	Agua destilada y KOH al 28% en peso.	Housin (154mm X 254mm X 152.4mm)	Lo mas cerca de la succion
4	Directamente de la batería	Facil	3	15	3	2.33	Caros pero de fácil acceso	Compacto	11 de acero inoxidable 316L (Ø170mm X 119mm)	Agua destilada y KOH al 28 % en peso.	Housin (228mm X 228mm X 150mm), tanque de agua/Deposito primario	Lejos de la succion.
5	Atraves de un	Complicada	17	30	3	2	Caros y difícil acceso	No compacto	16 de acero inoxidable 316L (250mm X 125mm)	Agua destilada y KOH	Housin (250mm X 550mm X 300mm), tanque de agua, separador de gases, deposito de gases y modulo	Lejos de la succion
6	Atraves de un	Complicada	50	30	3	2	Caros y difícil acceso	No compacto	101 de acero inoxidable 316L (152.4mm X 152.4mm)	Agua destilada y KOH en su máxima concentracion (280 g de KOH en 730 cc de	Housin (254mm X 300mm X 500mm), tanque de agua, bomba de agua, dos separadores de gases, filtro de particulas y	Lejos de la succion.

Como puede observarse en la tabla anterior el prototipo seis es el que nos da mejores posibilidades para su posible utilización como un generador acoplado a un motor de combustión interna. Uno de sus grandes beneficios es su alta tasa de producción de gas oxihidrogeno y la posibilidad de manejar este a una presión arriba de la atmosférica lo cual nos puede dar algunas ventajas a la hora de suministrarlo.

Pese a que su tamaño no es compacto, su construcción complicada implica la utilización de un modulo electrónico sigue teniendo ventajas sobre los demás pues estos obstáculos son con relativa facilidad superables.

Por lo tanto se elige al prototipo seis como el de mejores características y se toma como modelo para su estudio.

#### 4.1 ANALISIS DE PARAMETROS

Para que ocurra la electrolisis es necesario imponer un potencial ( $E$ ) superior al potencial termodinámico o de equilibrio ( $E_t$ ), es decir, existe una barrera energética que es necesario superar para que el proceso ocurra y su valor puede calcularse perfectamente a partir de consideraciones termodinámicas en condiciones reversibles. En resumen, la condición de irreversibilidad de la electrolisis obliga a utilizar una energía adicional.

En la electrolisis, el potencial aplicado da la medida de la energía eléctrica suministrada al proceso, que será mayor que  $E_t$  por la condición de irreversibilidad señalada anteriormente y que se manifiesta en la resistencia que ofrece el sistema al paso de la corriente eléctrica. Así, los electrodos y la solución contribuirán con su resistencia al proceso, a que aumente el valor del potencial aplicado. Así, la barrera energética será tanto mayor cuanto mayor sea la resistencia que presenten las diferentes partes de la celda al paso de la corriente eléctrica. En general podemos plantear que:

$$E = E_t + \varepsilon_c + \varepsilon_a + \varepsilon_{soln} + \varepsilon_{sist} \quad \text{Ecuación 2. 46}$$

Donde  $E_t$  es el voltaje termodinámico o reversible de la celda y depende de la reacción que ocurre en el electrodo.  $\varepsilon_c$  y  $\varepsilon_a$  son los sobre potenciales catódico y anódico y son proporcionales a la energía eléctrica adicional, necesaria para que ocurra el proceso de transferencia a una velocidad dada, donde puede estar incluida la resistencia a la transferencia de masa. En resumen, es el gasto de energía adicional por ser un proceso irreversible.  $\varepsilon_{soln}$  es la caída óhmica entre los electrodos, o sea, la resistencia eléctrica del

electrolito o solución, que depende además de la geometría de los electrodos. También hay que considerar la caída óhmica de la conexión del circuito contemplada en  $\varepsilon_{sist}$ . Para obtener un 100% de eficiencia, el  $\varepsilon$  total no debe ser mayor que 0.25 V

Analizando la ecuación 2.45, se puede inferir que disminuyendo el sobrepotencial (que depende fundamentalmente de la naturaleza del material del electrodo), se puede lograr una variación en la velocidad de la reacción. Otra manera sería modificando la celda de tal manera que la caída óhmica sea mínima.

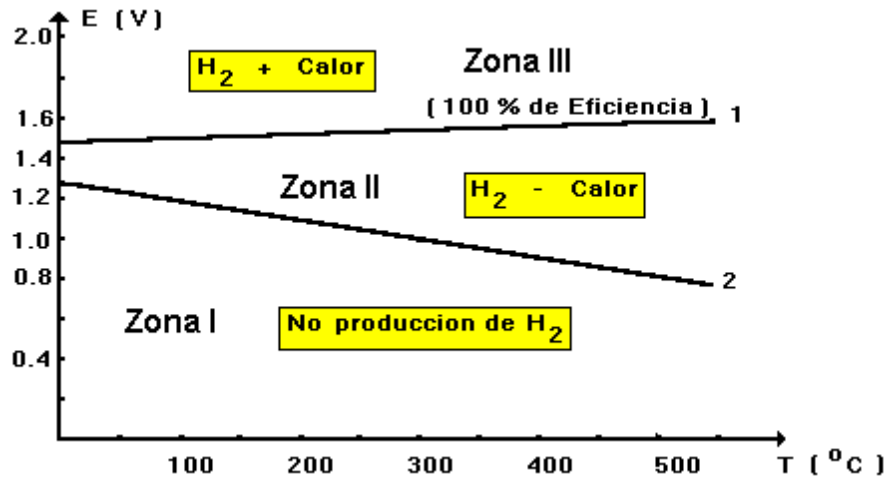
En la Fig. 4.1 se representa un gráfico del valor de E en función de la temperatura, donde se señalan 3 zonas delimitadas por las líneas 1 y 2.

En la zona I, por debajo de la línea 2, no ocurre la electrolisis, o sea, no se puede producir hidrógeno porque la línea 2 define los valores de  $E_t$  para diferentes temperaturas y por debajo de este valor, según la Termodinámica, el proceso no puede ocurrir.

En la zona II, limitada por las líneas 1 y 2, sí ocurre la electrolisis, pero este proceso es endotérmico, o sea, absorbe calor, por esta razón la producción de hidrógeno ocurre a expensas de la energía eléctrica suministrada y de la energía térmica (calor) que toma el sistema del medio ambiente.

En la zona III, formada desde la línea 1 hacia arriba, también ocurrirá la electrolisis, pero el sistema se comporta de forma que desprende calor, o sea, tiene un comportamiento exotérmico. En este caso la energía eléctrica suministrada se emplea en producir hidrógeno, pero parte también se transforma en energía térmica, lo que origina que la solución se caliente, es decir, aumenta su temperatura durante el proceso. Así podemos definir que la línea 1 representa los valores de E donde no ocurre intercambio calórico, o sea, el sistema ni absorbe ni desprende calor, por lo que se conoce por Potencial Termoneutral( $E_{tn}$ ).

Figura 4.1 Grafico de Potencial versus Temperatura en la electrolisis



1. -Línea que define el 100% de eficiencia en la electrolisis (potencial termoneutral). A medida que el valor de  $E$  es mayor, la eficiencia disminuye del 100%. A medida que el valor del  $E$  disminuye, la eficiencia aumenta sobre el 100%.

2. -Línea que representa la frontera del potencial aplicado ( $E$ ) donde ocurre (hacia arriba) o no (hacia abajo) la electrolisis del agua (potencial termodinámico). En esta línea la eficiencia es máxima (120%).

Zona I: No hay producción de hidrógeno.

Zona II: Zona de máxima eficiencia, superior al 100%. Se produce hidrógeno a partir de la energía eléctrica y térmica (se absorbe calor).

Zona III: Zona de baja eficiencia (menor al 100%) mientras mayor es el  $E$ , menor es la eficiencia. La energía eléctrica se emplea en producir hidrógeno y desprender calor.

Este comportamiento del sistema permite llegar a una definición clara de la eficiencia del proceso. Si la energía eléctrica solo se utiliza en producir hidrógeno, la eficiencia del proceso será del 100% (valores representados por la línea 1). Por el contrario, si la energía eléctrica se utiliza en producir hidrógeno y transformarse en calor (proceso exotérmico) la

eficiencia del proceso será menor al 100% (zona III) y a medida que nos movamos hacia arriba de la línea 1 (aumento de E), el valor de la eficiencia será cada vez menor. En el caso de la zona II, la cantidad de hidrógeno producido depende no sólo de la energía eléctrica suministrada sino de la energía térmica que toma del medio, por lo tanto, comparando la cantidad de hidrógeno producido con la energía eléctrica suministrada, se obtendrá un valor de la eficiencia mayor que el 100%. A medida que nos movamos hacia abajo de la línea 1 (E disminuye) el valor de la eficiencia aumenta por arriba del 100%. Al llegar a la línea 2 se obtiene la máxima eficiencia que es del 120% (valor ideal, ya que solo se alcanza en condiciones reversibles).

El principal objetivo de la investigación del proceso de obtención de hidrógeno por electrolisis es lograr materiales de electrodo que posean un gran poder electrocatalítico para la reacción de desprendimiento de hidrógeno (RDH). Por tanto, la función de la electrocatalisis como aplicación industrial es contribuir a reducir el voltaje aplicado a través de la celda electrolítica, para así disminuir los costos de energía. En sentido general, se obtiene una reducción en el voltaje aplicado por el incremento del área superficial real, o aumentando el poder electrocatalítico del material de electrodo, lo que se traduce en ambos casos en una reducción del sobrepotencial.

Es decir, la evaluación de los diferentes materiales de electrodos se realiza comparando la densidad de corriente aparente a un potencial dado, o más comúnmente, por comparación del sobrepotencial a una densidad de corriente dada. Un electrodo será más activo o electrocatalítico, cuando un aumento en su área superficial real implique una mayor reducción del sobrepotencial. De hecho, uno de los procedimientos adoptados en la práctica para disminuir el sobrepotencial en el cátodo es precisamente el incremento de su área superficial

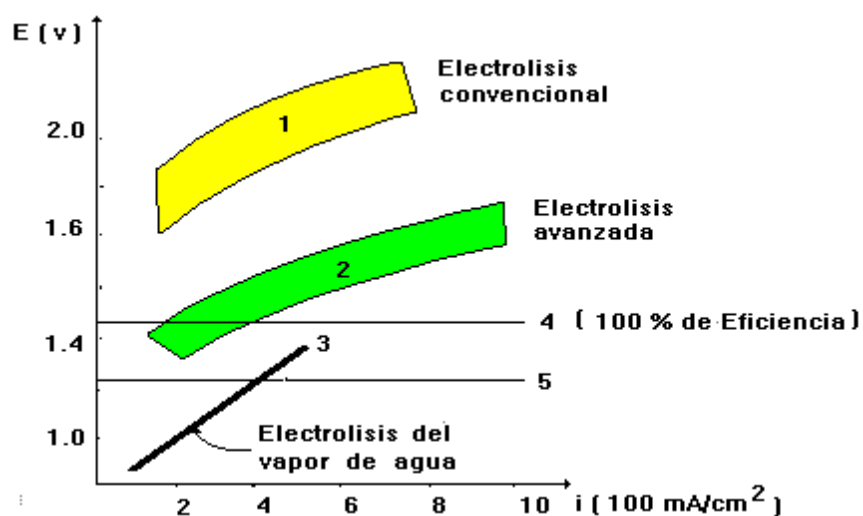
La reducción del voltaje aplicado relacionado a un incremento del área superficial tiene una importancia significativa, pero esto no puede ser estrictamente considerado como un efecto electrocatalítico, aunque la variación del área superficial del electrodo puede modificar la naturaleza de los sitios activos en la superficie. Por esto, para evaluar un material a utilizar

como electrodo es necesario tener en cuenta tanto los factores geométricos como los factores debidos a la naturaleza del material.

La Fig 4.2 permite describir el estado actual de la producción de hidrógeno por electrolisis. En ella se representa el valor de E en función de la densidad de corriente (i) que circula por la disolución.

La zona 1 representa aquellos procesos de electrolisis llamados convencionales, es decir, los tradicionales que se han desarrollado a escala industrial. Un valor de potencial para electrolizadores corrientes en esta zona es de 2,08 V por lo que la eficiencia de estos está alrededor del 70%. La zona 2 representa los procesos electrolíticos de avanzada que están en desarrollo con vistas a su aplicación industrial. La línea 4 representa el potencial termoneutral, es decir, el 100% de eficiencia y la línea 5 representa el potencial termodinámico. La línea 3 representa el proceso de electrolisis a partir del vapor de agua y se observa que este proceso tendrá siempre una eficiencia mayor al 100%, porque en este caso también se aprovecha la energía térmica del vapor de agua.

**Figura 4.2 Grafico de Potencial versus Densidad de corriente en la electrolisis.**



1.- Celdas económicas comerciales; 2.-Celdas de avanzada, no comerciales hasta el momento. 3.- Electrolisis del vapor de agua. 4 y 5 tienen el mismo significado que 1 y 2 en la Fig. 4.1

A partir de esta figura se pueden hacer las siguientes consideraciones: Todos los procesos comerciales están en la zona de baja eficiencia con un valor alrededor del 70%, y que los procesos de avanzada que han llegado a escala industrial han alcanzado hasta el 87% de eficiencia.

Uno de los aspectos tratados en los últimos años, que influye en el gasto energético en el proceso de electrolisis, es la caída óhmica adicional que se origina con la formación de burbujas en el electrodo. Se ha estudiado la influencia del valor de la densidad de corriente catódica ( $i_c$ ), la altura del electrodo, la forma del electrodo, el tiempo de electrolisis, la temperatura, la concentración del catalisador, etc.

Los métodos más usados para determinar los parámetros cinéticos de la RDH son la Caída de Potencial a Circuito Abierto, Espectroscopia de Impedancia Faradica, y el Método de Descarga Rápida Galvanostática.

## 4.2 PARAMETROS A CONSIDERAR EN UNA CELDA ELECTROLITICA

### 4.2.1 VOLTAJE

El voltaje de una celda electrolítica es la diferencia de potencial (en voltios) entre los dos electrodos extremos. Dicho potencial unitario de celda (E) debe alcanzar un valor mínimo para producir la reacción, que resulta de la suma de varias contribuciones.

$$E = E_t + \varepsilon$$

**Ecuación 2. 47**

Donde  $\varepsilon = \varepsilon_c + \varepsilon_a + \varepsilon_{soln} + \varepsilon_{sist}$

- ✓  $E_t$  : El potencial de equilibrio termodinámico de la reacción y se calcula a partir de los potenciales de equilibrio del ánodo y del cátodo. En el caso de la electrolisis del agua este parámetro en condiciones estándar es  $E_t = 0.83 \text{ V} + 0.40 \text{ V} = 1.23 \text{ V}$
- ✓  $\varepsilon$  (Sobrevoltaje): El sobrevoltaje se define como la diferencia entre el potencial al que transcurre una reacción electroquímica y el potencial de equilibrio de la misma. Este voltaje adicional que es necesario aplicar a la celda electrolítica para que se produzca la reacción resulta de la suma de las distintas resistencias eléctricas que oponen los componentes del sistema:

$\varepsilon_c$  : Sobretensión catódica. Es la sobretensión que existe en el cátodo a la reacción catódica de formación de gas hidrógeno.

$\varepsilon_a$  : Sobretensión anódica. Es la sobretensión que existe en el ánodo a la reacción de formación de gas oxígeno.

$\varepsilon_{\text{soln}}$  : Es la caída de tensión en el electrolito por efecto de la resistividad que presenta la disolución.

$\varepsilon_{\text{sist}}$  : Representa la caída de potencial a través del resto de sistema, tales como los cables conductores de la electricidad, etc.

En el caso de la electrolisis convencional del agua valores típicos de sobrevoltaje de celda de electrolizadores darían una estimación del voltaje unitario de la celda de

$$E = E_t + \varepsilon_c + \varepsilon_a + \varepsilon_{\text{soln}} + \varepsilon_{\text{sist}} = 1.23 + 0.30 + 0.30 + 0.25 + 0.11 = 2.19 \text{ V}$$

Por otra parte, la magnitud de estos sobrevoltajes va a depender de diversos factores que determinarán el funcionamiento del equipo: naturaleza química de sus componentes (electrodos, electrolito, etc.), dimensiones y geometría de los mismos, condiciones de



operación (temperatura y presión), presencia de impurezas o depósitos y, fundamentalmente, de la intensidad de corriente eléctrica suministrada.

#### 4.2.2 EFICIENCIA DE POTENCIAL

La eficiencia de potencial  $\eta_E$  se define como el cociente entre el potencial de equilibrio termodinámico y el potencial de celda unitario necesario para la electrolisis:

El cálculo de la eficiencia ( $\eta_E$ ) es muy sencillo y se puede realizar a partir de la siguiente ecuación

$$\eta_E = \frac{E_t}{E} \quad \text{Ecuación 2. 48}$$

y para las temperaturas normales de trabajo (70-80 °C)  $E_t = 1.23 \text{ V}$ , entonces

$$\eta_E = \frac{1.23 \text{ V}}{E} \quad \text{Ecuación 2. 49}$$

Este parámetro proporciona información sobre la proporción del potencial que debe ser aplicado para vencer el conjunto de resistencias eléctricas del sistema electrolítico que no son rigurosamente el potencial de equilibrio de la reacción. La eficacia de potencial es, por tanto, un parámetro de diseño útil en ingeniería para la optimización de los equipos de electrolisis: la eficacia del potencial puede incrementarse minimizando las resistencias eléctricas de cada uno de los componentes de la celda (electrodos, electrolito, condiciones de T y P, etc.) para la optimización de los equipos de electrolisis.

#### 4.2.3 INTENSIDAD

La intensidad de corriente (I) es el flujo de electrones que circulan por el circuito eléctrico de la celda electrolítica por unidad de tiempo (se mide en amperios, A). Alternativamente

puede definirse la densidad de corriente como la intensidad de corriente por unidad de área efectiva del electrodo ( $A/m^2$ ).

La densidad de corriente empleada durante la operación es un parámetro crítico de operación, ya que determina directamente la cantidad de producto obtenido, y por tanto, el rendimiento de la celda electrolítica. Así, la relación entre el número de moles de producto ( $n_{prod}$ ) y la intensidad de corriente asociada al proceso electroquímico viene dada por la ley de Faraday, que a valores de intensidad constante se expresa mediante la ecuación:

$$n_{prod} = \frac{I(t)}{n_e \cdot (F)} \quad \text{Ecuación 2. 50}$$

Donde  $t$  es el tiempo que se aplica la corriente, en segundos (s),  $n_e$  el número de electrones involucrados en la transferencia y  $F$  la constante de Faraday equivalente a 96,500 C. Esta ecuación implica que por cada mol de producto generado en la electrolisis circulan 96,500 culombios de carga por el circuito electrolítico.

Es de esperar, por tanto, que un aumento de la intensidad de corriente implique un aumento de la velocidad del proceso electroquímico. Sin embargo, como se mostraba anteriormente, mayores intensidades en un equipo dado provocan un aumento de sobrepotencial y, por tanto, del potencial unitario de celda, lo que implica un coste adicional de potencia eléctrica por unidad de producto, que perjudicara generando más costos en el proceso.

#### 4.2.4 EFICIENCIA DE CORRIENTE

La eficiencia de la corriente ( $\eta_I$ ) relaciona la cantidad de corriente que se ha empleado en producir la reacción,  $I_{consumida}$  (calculada aplicando la ley de Faraday) con la cantidad de corriente que circula por el circuito,  $I_{circuito}$ .

$$\eta_I = \frac{I_{consumida}}{I_{circuito}} \quad \text{Ecuación 2. 51}$$

Este parámetro proporciona información sobre la fracción de intensidad de corriente que circula por el sistema sin estar involucrada en el proceso electroquímico. En general, a

menor densidad de corriente mejora la distribución de la misma en el equipo, evitándose la formación de caminos preferenciales en los electrodos y mejorando el rendimiento de la reacción.

#### 4.2.5 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Como se ha mencionado, el suministro de energía necesario para la electrolisis se realiza mediante una fuente de alimentación de corriente continua. Generalmente dichas fuentes son capaces de regular únicamente la potencia eléctrica aplicada (W). Dicha potencia se define como:

$$W = V(I) \quad \text{Ecuación 2. 52}$$

Donde V es el potencial aplicado por la fuente e I la intensidad de corriente que circula por el circuito. Los valores máximos de potencia de la fuente estarán asociados también a unos valores máximos de intensidad y voltaje.

Por otra parte, para hacer circular una corriente de intensidad I a través de un circuito con una resistencia eléctrica R (resultado de la suma de resistencias de los componentes del sistema) es necesario aplicar un potencial eléctrico con valor igual a:

$$V = I(R) \quad \text{Ecuación 2. 53}$$

Por tanto se deduce que, para un valor de potencia suministrado por la fuente de alimentación, la intensidad de corriente que circule por el proceso, su producción y rendimiento vendrá determinada por la magnitud del voltaje unitario de la celda electrolítica (voltaje de equilibrio + sobrevoltaje).

El consumo energético es de crucial importancia en los procesos de electrolisis, pues puede constituir una fracción importante de cuanto nos está costando obtener el gas.

#### 4.2.6 CONSUMO ESPECIFICO DE ENERGIA

Un parámetro útil como dato de análisis es el consumo específico de energía ( $W_{\text{especifico}}$ ), que se obtendría de dividir la potencia eléctrica consumida por la fuente ( $W_{\text{eléct}}$ ) entre el caudal de moles producido ( $n_{\text{prod}} / t$ ):

$$W_{\text{especifico}} = \frac{W_{\text{elect}}}{n_{\text{prod}}/t} = \frac{E_{\text{celda}} I_{\text{circuito}}}{I_{\text{consumida}} / n_e F} \quad (\text{J/mol}) \quad \text{Ecuación 2. 54}$$
$$= E_{\text{equilibrio}} \frac{n_e F}{\eta_I \eta_E}$$

Este parámetro permite cuantificar el coste en energía que supone producir un mol de producto en un electrolizador operando en unas condiciones determinadas. Significativamente, el consumo específico está determinado por los parámetros de eficiencia de corriente y eficiencia de potencial descritos anteriormente.

Así, es claro que un aumento en la eficiencia de corriente o en la eficiencia del potencial significa un ahorro de energía eléctrica por unidad de producto.

#### 4.3 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

Con un adecuado diseño podemos conseguir un motor con un rendimiento energético mayor que el equivalente en gasolina. El alto número de octanos permite elevar la relación de compresión que redundará en un aumento del rendimiento energético, mientras que la alta velocidad de llama en flujo laminar contribuye a la reducción de las emisiones de NOx, pues es posible emplear dosados muy bajos, tan bajos que han llegado al 0,2. Gracias a esta posibilidad se puede aumentar también el rendimiento. Con todo esto se han conseguido aumentos del rendimiento del 25-30% con respecto a los motores equivalentes en gasolina.

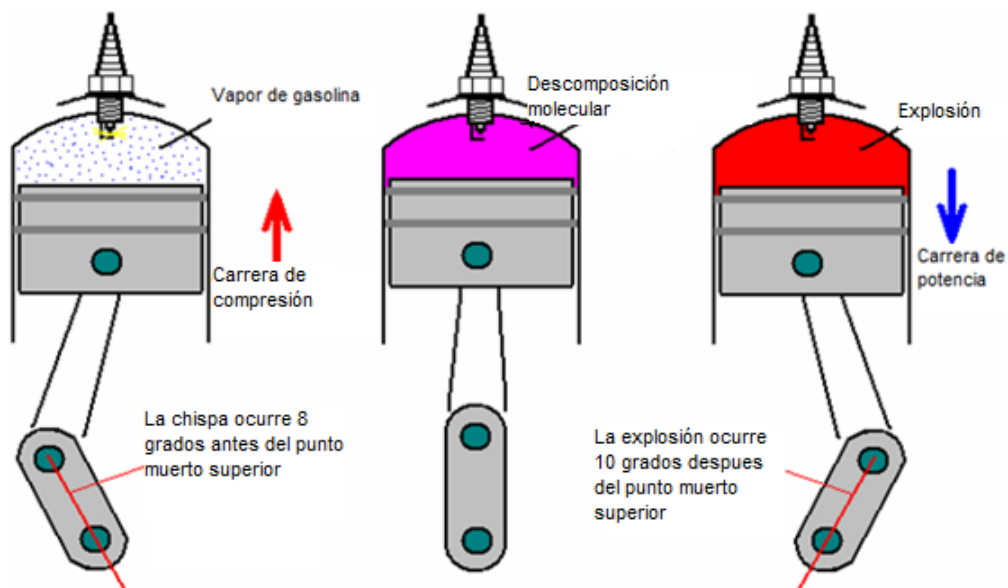
### 4.3.1 CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO

Hay una diferencia considerable entre una mezcla de hidrógeno y oxígeno, y gasolina. Mientras tienen diferencias considerables. Una diferencia importante es que el gas oxihidrogeno se quema mucho más rápido que los vapores de gasolina. Eso no sería un problema si el motor fue diseñado originalmente para quemar oxihidrogeno pero la mayoría de los motores existentes están diseñados para operar con los combustibles fósiles.

Si se utiliza oxihidrogeno para mejorar la calidad de la combustión y mejorar el kilometraje por galón de un vehículo, son necesarios los ajustes en el controlador electrónico de la mezcla.

Si un motor se arranca con otro tipo de combustibles que no sea fósil, entonces será necesario realizar ajustes. Los combustibles de hidrocarburos tienen moléculas de gran tamaño que no se queman lo suficientemente rápido para hacer eficaz la combustión en el interior del cilindro de un motor.

**Figura 4. 3 Momento de la chispa en un motor convencional**

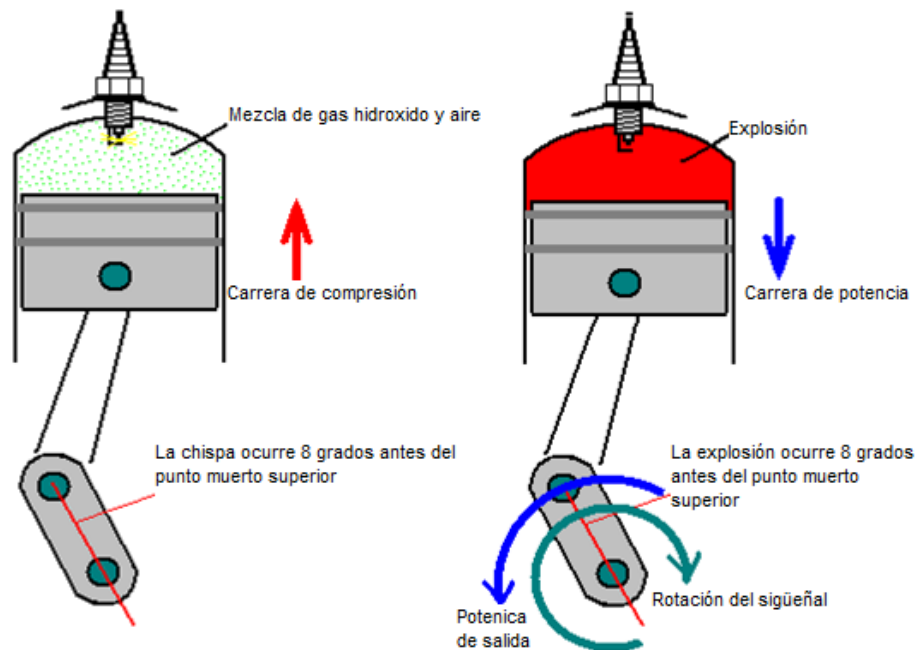


Debido a la demora necesaria para la conversión de las moléculas de hidrocarburos en partículas más pequeñas, la chispa se dispone que se produzca antes del punto muerto superior del cilindro. Mientras que las moléculas están separándose, el pistón pasa a su punto más alto y el cigüeñal es pasado algunos grados después del punto muerto superior antes de la presión máxima sobre la cabeza del pistón. Esto refuerza el giro a la derecha del cigüeñal.

Lo anterior no ocurrirá si el oxihidrogeno se mezcla al aire y es sustituido por un porcentaje de los vapores de gasolina. Debido a que el tamaño de las moléculas de este gas son muy pequeñas y no necesitan ningún tipo de ruptura y se queman al instante con fuerza explosiva.

El resultado sería como se muestra en la figura 4.4.

**Figura 4. 4 Problema del momento de la chispa con combustible oxihidrogeno**



Aquí, la explosión es casi instantánea y puede forzar el movimiento del pistón en sentido contrario.

Lamentablemente, el cigüeñal está tratando de impulsar el pistón hacia arriba pasado el punto muerto superior, en este caso la explosión no ayudará al funcionamiento del motor. En su lugar, la explosión detiene la rotación del cigüeñal sobrecargándolo también actuando sobre la biela y produciendo una presión excesiva sobre la pared del cilindro.

No queremos que eso suceda. La solución es retrasar la chispa hasta que el pistón ha alcanzado una posición de rotación próxima al punto muerto superior de la carrera de compresión, donde se desea que la explosión tenga lugar.

La chispa se podría retrasar 8 grados porque tiene que ocurrir más tarde en la rotación del cigüeñal. La cantidad de retraso puede variar de un motor a motor, pero con el gas oxihidrogeno, la chispa nunca debe ocurrir antes del punto muerto superior y es preferible que el cigüeñal haya girado unos grados de manera que la mayor parte del empuje del pistón haga girar el cigüeñal y producir la menor cantidad posible de compresión sobre él.

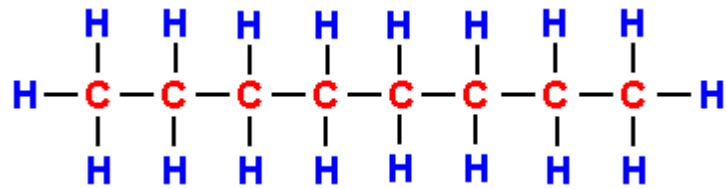
Hay dos formas principales para ajustar el salto de la chispa. El primero es mecánico, donde se realiza un ajuste al mecanismo que provoca la chispa. Algunos motores pequeños puede que no tienen una manera conveniente para ajustar el tiempo tanto como se necesita para esta aplicación.

La segunda manera es retrasar la chispa por un circuito electrónico ajustable (por ejemplo, un NE555 monoestable la conducción de un FET), uno muy bueno es un panel de montaje manual de control construido con retraso a la ignición que se puede encontrar en <http://www.msdition.com/1timingcontrols.htm>.

### **4.3.2 METALOGRAFÍA Y OXIDACIÓN**

Los combustibles de hidrocarburos o fósiles utilizados en motores de vehículos se componen de átomos de hidrógeno y carbono en la disposición general que se muestra a continuación.

Figura 4.5 Representación del enlace para un hidrocarburo



La razón de que estos motores tienen la sincronización de la chispa de ocho grados antes del punto muerto superior es para dar tiempo a que la cadena de átomos pueda romperse antes de combinarse con el oxígeno del aire para impulsar el motor. El motor del vehículo ya está funcionando principalmente con hidrógeno, así que la adición de hidrógeno no daña el motor o el escape de cualquier manera.

La combustión de hidrocarburos produce agua de todos modos y es en forma de vapor de agua muy caliente y esta se evapora dentro del motor cuando se apaga después de estar en marcha. El sistema de escape tendrá exactamente la misma vida útil, y la mayoría están hechos de materiales baratos que se oxidan de igual manera.

### 4.3.3 CHISPA DE RESIDUOS

Hay una consideración muy importante con motores pequeños y es la forma en la que se genera la chispa. Con un motor de cuatro tiempos, el cigüeñal gira dos veces por cada carrera de fuerza del pistón. La bujía sólo necesita chispa cada segunda vez que el pistón se acerca a su posición más alto en el cilindro. Esto no es particularmente conveniente para los fabricantes de motores, por lo que algunos simplifican las cosas, mediante la generación de una chispa en cada revolución. La chispa extra no es necesaria, no contribuye en nada al funcionamiento del motor así que se llama "chispa de residuos".

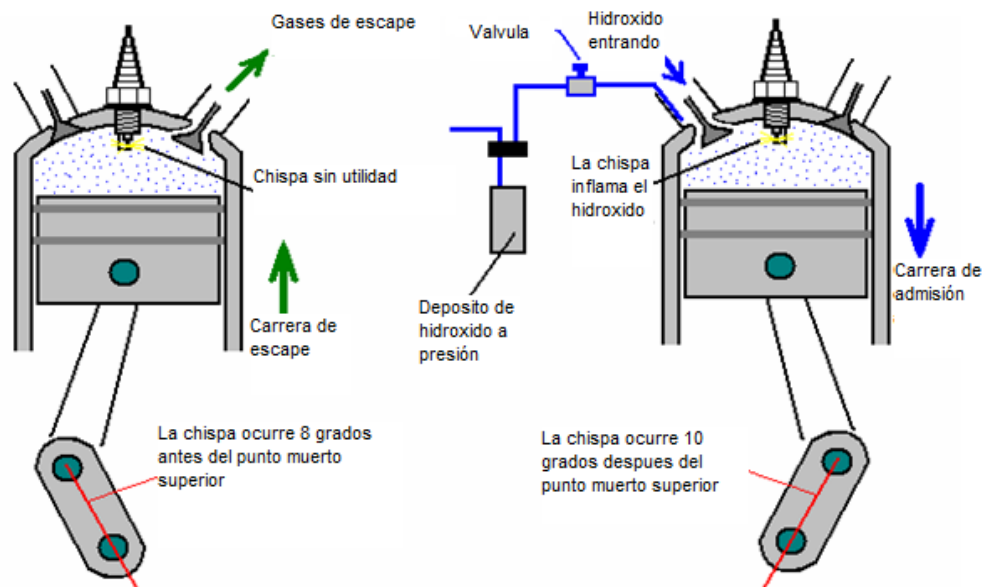
La chispa de residuos no importa para un motor de vapor de combustible fósil, pero si importa mucho si el combustible se cambia a oxihidrogeno.



Por lo que se explico anteriormente es necesario retrasar la chispa algunos dieciocho grados o menos, cuando se utiliza oxihidrogeno, debido a su elevada rapidez de encendido. Sin embargo, si el motor genera una chispa de residuos causa un problema grave.

En el caso de los combustibles fósiles, cualquier chispa de residuos se produce hacia el final de la carrera de escape y no tendrá ningún efecto real (aparte de malgastar la energía eléctrica). En el caso del combustible oxihidrogeno, el motor ha completado el ciclo de encendido y la valvula de escape, se ha cerrado completamente, mientras que la válvula de admisión se ha abierto y el oxihidrogeno está entrando a través de la válvula de admisión en la carrera de admisión. Si en ese momento se genera una chispa de residuos producto del retraso de chispa, es probable que se genere un retroceso de llama a través de la válvula de admisión hasta la tubería que está alimentando el oxihidrogeno:

**Figura 4. 6 Esquema para superar la chispa mediante inyección directa del oxihidrogeno**



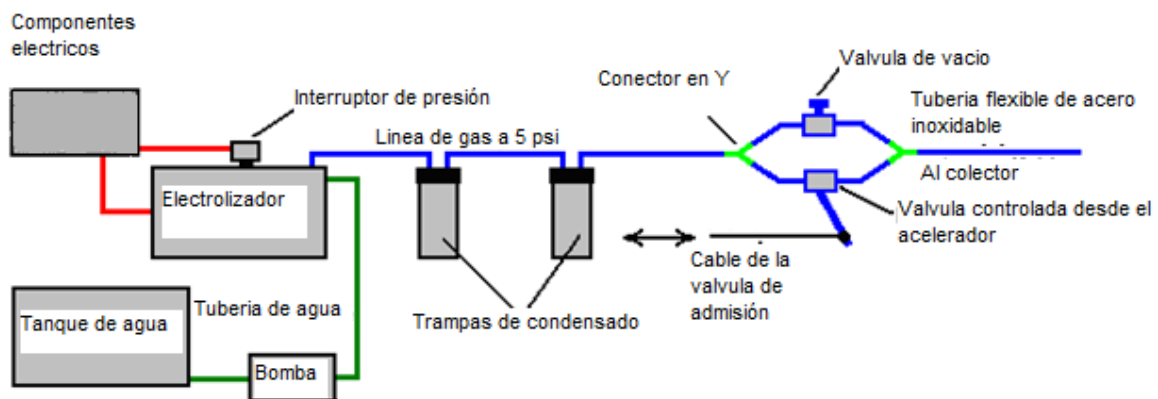
Una manera de eliminar la chispa de residuos sería dividir los circuitos a través de un contador electrónico, aunque esto no garantiza el buen funcionamiento.

La mejor manera de superar una chispa de residuos, es utilizar un eje más lento para provocar la chispa.

Motores de varios cilindros no suelen tener una chispa de residuos. También es posible operar un contacto, ya sea del árbol de levas o directamente de uno de los vástagos de las válvulas. También se ha sugerido que el uso de un interruptor de presión de accionamiento en el sistema de escape sería eficaz, y otra sugerencia es retrasar el tiempo de apertura de la válvula de admisión hasta después que la chispa de residuos se ha producido, aunque esto puede crear una baja considerable en la eficiencia del motor.

Para la conexión física del generador de gas en motores de varios cilindros es conveniente utilizar el colector de admisión que existe en el motor, en lugar de utilizar un pequeño tubo de admisión para cada carburador en el caso de que sea carburado. Una sección de la tubería flexible de acero inoxidable se debe utilizar para absorber la vibración del motor en relación con el electrolizador. Es recomendable el uso de un mando de accionamiento de válvula de aguja para ajustar la velocidad de ralentí a unas 1.000 rpm y colocar una válvula reguladora de accionamiento en paralelo para la aplicación de más potencia al motor:

**Figura 4. 7 Diagrama para la conexión en el manifold de admisión del vehículo**



#### 4.4 CONSIDERACIONES CON EL SENSOR DE OXIGENO

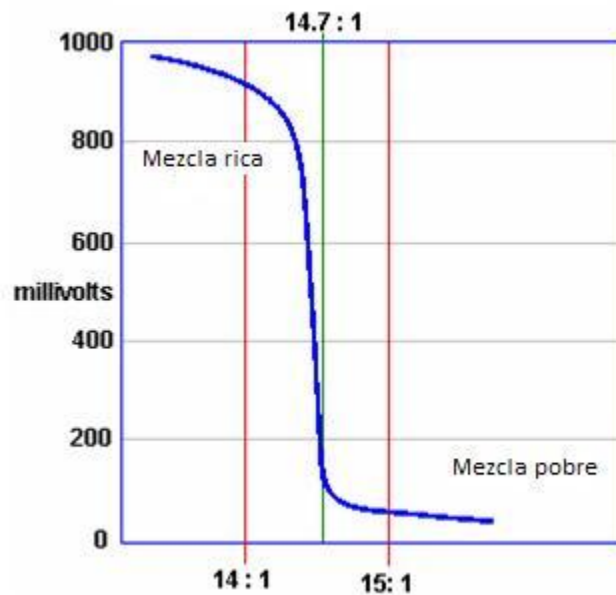
Cuando un generador de oxihidrogeno es usado en un vehículo, este tiene una proporción óptima de consumo de gas. Esta proporción genera la mayor cantidad de kilómetros por galón de combustible fósil para dicho vehículo.

Si el motor es controlado electrónicamente, el primer problema es que la Unidad de Control Electrónica del vehículo que maneja la inyección de combustible, descubre una calidad de gases de combustión diferente y lo interpreta como la indicación de una mezcla aire/combustible que es demasiado pobre. Para compensar esto, la unidad de control electrónica del motor comienza a inyectar el combustible en exceso al motor, y la cantidad de kilómetros por galón en realidad pueden ser ligeramente inferior que antes de que el generador fuera montado al vehículo. El mejor modo de tratar con esto es reducir la tasa de producción de gas bajando la corriente que pasa por el generador. Como todos los motores reaccionan de manera diferente, puede hacerse trabajar al motor con diferentes caudales de gas, y censar cual caudal produce la mayor cantidad de kilómetros por galón.

Hay un método alternativo para los motores carburados, y es que estos verán una mejora inmediata, sobre todo cuando se sustituyen los surtidores de combustible por otros más pequeños en el carburador. Pero los vehículos más recientes que vienen con control electrónico del suministro combustible generan una serie de problemas. Cuando un generador de oxihidrogeno es conectado al motor, el gas es quemado dentro de los cilindros junto con el combustible fósil, entonces la combustión mejora enormemente, gracias a las propiedades del hidrogeno. Lamentablemente, la unidad de control espera la misma cantidad de combustible no quemado en los gases que escapan del motor; pero como la cantidad de combustible no quemado disminuye, la unidad de control aumenta el caudal de combustible inyectado al motor. Esta acción puede disminuir enormemente la mejora de kilometros por galón de combustible producida por el electrolizador a no ser que algo sea hecho para ajustar la operación del control electrónico del motor.

En las condiciones más simples, la mayor parte de vehículos que tienen una Unidad de Control Electrónica para controlar el flujo de combustible son instalados con uno de dos tipos de sensor de gases de combustión. La mayoría tiene un sensor de banda estrecha mientras el resto tiene un sensor de banda ancha. La mezcla ideal de aire/combustible, que se considera es 14.7:1. Un sensor de banda estrecha sólo responde a mezclas de aproximadamente 14.2:1 a 14.9:1. El sensor funciona por comparación de la cantidad de oxígeno en los gases de escape y el oxígeno en el aire fuera del vehículo; esto genera un voltaje de salida que se mueve rápidamente entre 0.2 voltios cuando la mezcla es demasiado pobre, y 0.8 voltios cuando la mezcla pasa debajo de 14.7:1, en este punto la mezcla es demasiado rica (como se indica en el gráfico 4.8). El ECU aumenta el suministro de combustible cuando el nivel de señal es 0.2 voltios y lo disminuye cuando el voltaje de señal es 0.8 voltios.

**Figura 4. 8 Señal de salida del sensor de oxígeno**



Esto hace que el voltaje de señal cambie con regularidad ya que el ECU intenta emparejar la mezcla aire/combustible, ya sea enriqueciéndola o empobreciéndola.

Una tarjeta de circuitos impresos de control simple puede ser añadida para cambiar la señal del sensor y cambiar la cantidad de combustible que se inyecte al motor; de esta manera

podemos empobrecer o enriquecer la mezcla según sea necesario. Lamentablemente hay un inconveniente al realizar esta acción para cualquiera de las dos situaciones, ya sea de mezcla rica o pobre. Si la mezcla de combustible es puesta demasiado rica, durante un período amplio, entonces el exceso de combustible es quemado en el catalizador y esto puede levantar la temperatura lo suficiente para derretir los componentes internos del convertidor catalítico. Por otra parte, si se trabaja con una mezcla que es demasiado pobre, entonces la temperatura de motor puede elevarse demasiado y dañara las válvulas.

Para evitar daños al motor cuando trabaja con mezclas demasiado pobres, se puede sustituir el sensor de oxígeno de banda estrecha con un sensor de banda ancha y el regulador. Un sensor de oxígeno de banda ancha lee una muy amplia gama de proporciones de mezcla aire/combustible, de aproximadamente 9:1 a 28:1. Un motor normal puede cambiar de 10:1 (muy rico) a aproximadamente 17.5:1 (bastante pobre). La potencia máxima es desarrollada en una proporción de mezcla de aproximadamente 12.5:1 y la combustión completa de combustible ocurre con una mezcla de aproximadamente 14.7:1, mientras la mezcla que da emisiones de gases de combustión mínimas es ligeramente más pobre que esto.

A diferencia de los sensores de banda estrecha, los sensores de banda ancha necesitan su propio regulador para funcionar. Hay muchas de estas unidades que pueden adaptarse a los motores existentes que tienen sistemas de sensor de oxígeno de banda estrecha.

Este regulador de banda ancha puede ser programado. La mayor parte de reguladores tienen la capacidad de emitir dos señales, la señal de banda ancha es conveniente para trabajar con la medida que se necesita en la nueva unidad de control, más una señal sintetizada de banda estrecha que puede alimentar el ECU existente.

Por lo tanto se debe instalar un sensor de banda ancha, con el regulador LC-1 y luego el nuevo programa, todo esto para cambiar la salida de banda estrecha, para alcanzar una mezcla más pobre como se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 4. 2 Variables para ajustar la mezcla**

Mezcla actual Aire/combustible	Salida de banda ancha	Salida original de banda estrecha	Cambio de señal de salida de banda estrecha
9 a 1	9 a 1	Mezcla es muy rica	Mezcla es muy rica
10 a 1	10 a 1	Mezcla es muy rica	Mezcla es muy rica
11 a 1	11 a 1	Mezcla es muy rica	Mezcla es muy rica
12 a 1	12 a 1	Mezcla es muy rica	Mezcla es muy rica
13 a 1	13 a 1	Mezcla es muy rica	Mezcla es muy rica
14 a 1	14 a 1	Mezcla es muy rica	Mezcla es muy rica
14.6 a 1	14.6 a 1	Mezcla es muy rica	Mezcla es muy rica
14.8 a 1	14.8 a 1	Mezcla es muy pobre	Mezcla es muy rica
15 a 1	15 a 1	Mezcla es muy pobre	Mezcla es muy rica
15.5 a 1	15.5 a 1	Mezcla es muy pobre	Mezcla es muy pobre
16 a 1	16 a 1	Mezcla es muy pobre	Mezcla es muy pobre
18 a 1	18 a 1	Mezcla es muy pobre	Mezcla es muy pobre

Este sistema permite poner a trabajar el sensor de banda estrecha según la proporción aire/combustible que se desee. Esto es algo que es casi imposible de hacer con exactitud con una tarjeta de circuitos impresos que solamente cambia una señal de oxígeno de banda estrecha.

#### **4.4.1 CONEXIÓN FÍSICA DEL SENSOR**

Se puede añadir una tarjeta de circuitos impresos para cambiar la señal del sensor de banda estrecha para producir una mezcla más pobre sobre un vehículo, una muy buena se puede encontrar en la siguiente dirección: <http://www.eagle-research.com/products/pfuels.html>

Esta unidad genera un pequeño voltaje, usando chip de temporizador como un oscilador, rectificando la salida para dar un pequeño voltaje ajustable que entonces es sustituido por el

voltaje que está siendo generado por el sensor de oxígeno. Este voltaje es ajustado en el tiempo de instalación y entonces es dejado permanentemente con estos parámetros.

Si se desea usar una tarjeta de circuitos impresos con un sensor de oxígeno de banda estrecha, se debe tener en cuenta que hay varias versiones de este tipo de sensor. La versión está indicada por el número de cables que tiene este sensor:

- De un cable: donde el cable lleva la señal y el cuerpo del sensor es el tierra.
- De dos cables: donde uno lleva la señal y el otro es el tierra.
- De tres cables: donde unos son ligeramente de mayor calibre, para el calentador del sensor y el otro para la señal mientras el cuerpo del sensor es la tierra.
- De cuatro cables: donde hay dos de mayor calibre para el calentador de sensor, uno para la señal y uno para la tierra.
- De cinco cables: son dispositivos normalmente de banda ancha. Este sensor mide tanto el contenido de oxígeno como la cantidad de combustible sin quemar se debe identificar el cable del sensor que lleva la señal de control a la parte de la computadora de control de combustible.

Para sensores de 3 y 4 cable se desconecta el sensor de oxígeno y se coloca un multímetro a un rango medio de voltaje de corriente continua de al menos 15 voltios, luego se conecta la ignición y se sondea el enchufe y se buscan los dos cables que proporcionan 12 voltios.

Estos son los cables de calentador, entonces se desconecta la ignición, y se conecta de nuevo el sensor de oxígeno.

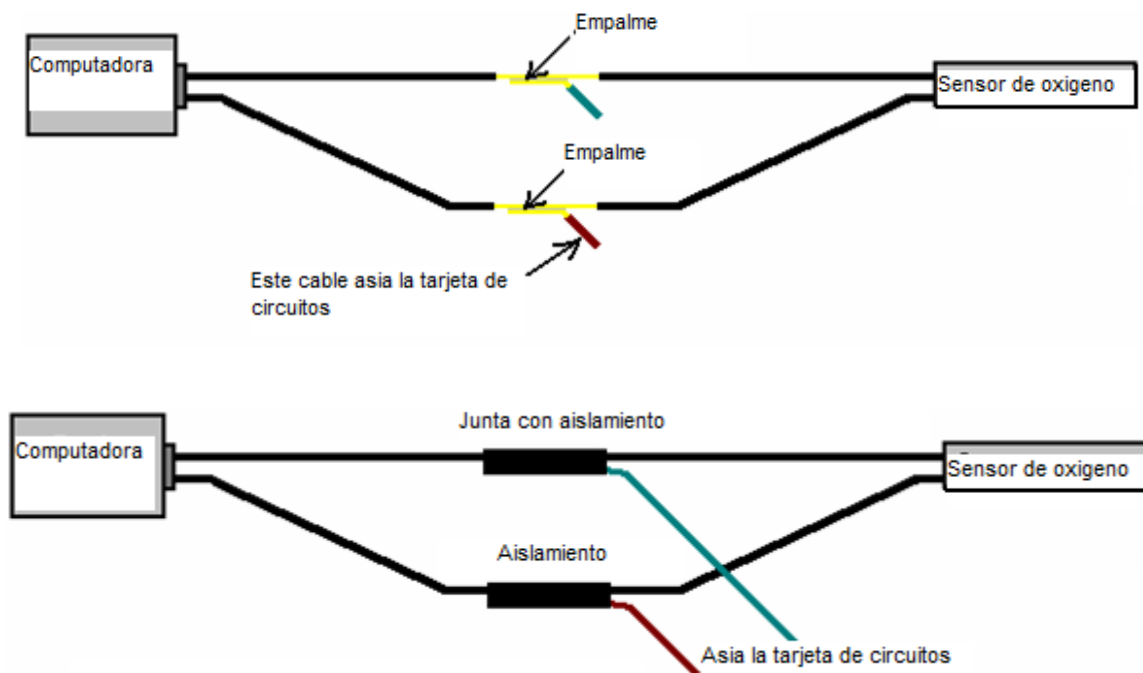
Los dos cables restantes ahora pueden ser tratados como los cables de un sensor de dos cables, uno lleva la señal del sensor y el otro será el tierra. Si el sensor es de tres cables, el cable restante es la señal del sensor y la señal de tierra está en el cuerpo del sensor.

Algunos motores tienen dos sensores de oxígeno; uno antes del convertidor catalítico y uno después. En un arreglo de este tipo, la tarjeta de circuitos impresos antes descrita debe ser conectada al sensor más cercano al motor.

Se debe desnudar una pequeña cantidad del aislamiento sobre cada cable, luego se conecta el voltímetro de corriente continua a los cables, para identificar el cable de señal y el cable de tierra. Se arranca el motor y se observan las lecturas. Cuando el motor se calienta, el voltaje de uno de los dos cables debería comenzar a oscilar entre un valor bajo, cerca de cero voltios y un valor alto de aproximadamente 1 voltio. Si la lectura es negativa, entonces se deben invertir los cables y tomar de nuevo las lecturas.

Luego se une un pedazo de cable aislado al cable de señal del sensor y se conecta a la tarjeta de circuitos impresos del regulador de mezcla. Posteriormente se conecta el segundo cable que contiene la señal de tierra, o en el caso de un sensor de tres cables el bloque del motor es conectado a la tarjeta de circuitos impresos.

**Figura 4. 9 Conexión del sensor de oxigeno con la tarjeta de circuitos impresos**





#### 4.4.2 DETALLE MÁS ESPECÍFICO

Muchos ECU aprenden a adaptarse a las nuevas condiciones de trabajo y retornan a la condición de inyección de exceso de combustible que es sumamente ineficaz. Esta vuelta a la inyección original de combustible es diferente para cada diseño de ECU y hay muchos diseños diferentes.

De esta manera se consiguen buenos resultados por una temporada, y luego el funcionamiento se deteriora otra vez. Esto es porque el ECU aprende a tratar con la nueva situación de trabajo ya que la regeneración de la mayor parte de los sensores no es lineal. Toda la electrónica usada para los métodos de ajuste para la demanda de hidrogeno no son lineales y esto da mucha dificultad para tratar el problema.

Por ejemplo, se puede añadir un par de cientos de mili voltios a la sonda lambda para devolver una señal excesivamente rica al ECU, y hacerlo responder con un nivel inferior de inyección de combustible. Esto hace pensar al ECU que la proporción aire/combustible es de, 15:1 o 20:1. Ahora los mapas de masas de aire se equivocan, ya que se tiene que mostrar menos aire, de modo que el ECU agregue menos combustible para emparejar la mezcla. Ahora se debe ajustar el engranaje de distribución de la ignición para aprovechar este cambio de combustión.

Entonces en primer lugar una solución de control seria; cambiar las lecturas de corriente de aire, señal lambda, y el engranaje de distribución de ignición y en segundo lugar, responder a cambios del régimen del motor y la carga de motor. En este caso se tiene que elaborar un diagnostico muy especifico para configurar el ECU.

A continuación se presenta una solución más práctica, aunque esto requiere siempre de algunos equipos electrónicos.

El artículo principal es un Ajustador Digital de Combustible o el equipo "DFA" de la electrónica JayCar. Su sitio web es [http:// www.jaycar.com](http://www.jaycar.com). El número de equipo de

ajustador es KC5385, y se debe tener el regulador KC5386. Se necesita un regulador y dos ajustadores.

Una vez que el Ajustador y el regulador se han ensamblado el primero es alambrado en la señal de sensor MAP/MAF. Después el segundo DFA es usado sobre la señal de sensor de oxígeno. Si hay dos sensores de oxígeno, entonces el DFA es alambrado por los puntos en común. Esto coloca las compensaciones de voltaje en tándem que hace innecesario usar dos DFAS (O EFIES en realidad) para el control de la señal lambda. Ahora el control ha sido establecido sobre los mapas de combustible y un control de la señal lambda que es sensible a la carga del motor. También estos equipos tienen la opción para hacerlos sensibles a las revoluciones por minuto.

Para el engranaje de distribución de ignición, las compensaciones de temperaturas probablemente todavía serán necesarias, pero ahora se tiene un control de combustible que de ser programado correctamente, el ECU no se reconfigura con las condiciones de trabajo establecidas.

Los equipos Jaycar no son tan sofisticados. El dispositivo es muy versátil y podría ser usado para muchos usos diferentes. Se puede usar para controlar la anchura de pulso y al conectarse el modulador al generador es posible proporcionar una tarifa variable de gas que responde a cambios de la carga de motor.

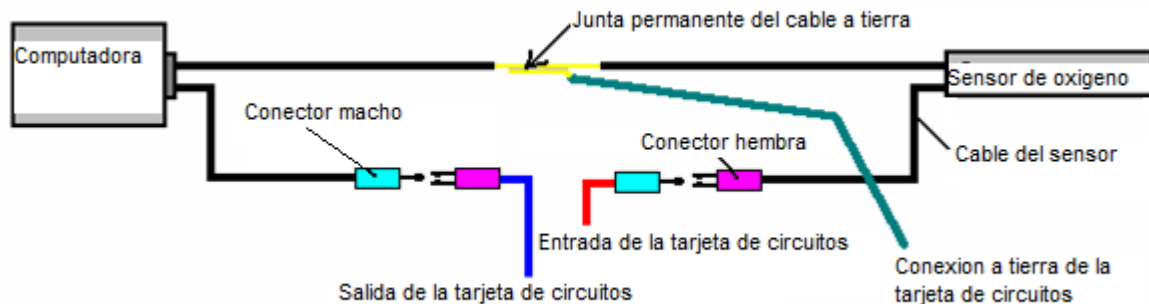
#### **4.4.3 ENSAYO EN EL MOTOR**

Se debe arrancar el motor y permitir que el sensor de oxígeno caliente, durante un par de minutos. Hay un retraso integrado en el circuito, así que después de unos minutos se debería ver la señal del LED. Al soltar el acelerador, el LED se apagará durante un tiempo.

La tasa de parpadeo se situará entre 1 y 10 veces por segundo, lo más probable es que alrededor de 2 por segundo.

Hay que confirmar que el LED se apaga cuando se apaga la placa del circuito interruptor montado en el tablero de instrumentos. Luego se debe cortar el cable del sensor de oxígeno e insertar el controlador.

**Figura 4.10 Conexión de DFA con el sensor de oxígeno**



Se debe de asegurar de aislar el sensor y la conexión para el ordenador de combustible y las conexiones de socket para hacer seguro que ninguno de ellos pueda causar un cortocircuito en cualquier parte del cuerpo. No hay necesidad de aislar la conexión a tierra, ya que está conectado a la carrocería del vehículo. Si el sensor tiene un solo cable, entonces la mejor conexión a tierra es mediante soldadura en un perno del motor.

#### **4.4.4 INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR**

Para el suministro de 12 voltios, es necesaria una conexión que active el circuito por medio del interruptor de encendido del vehículo.

Con el interruptor del panel frontal en su posición de apagado, se arranca el motor y se comprueba que funcione normalmente. Ahora se ajusta el interruptor giratorio del panel frontal para modificar la relación aire/combustible. El motor ahora está funcionando con una modificación de la señal del sensor de oxígeno. El rendimiento del vehículo debe ser completamente normal.

Conducir el vehículo con esta configuración por un tiempo podrá demostrar que el sistema está funcionando de manera confiable antes de cambiar a cualquiera de los ajustes más bajos.

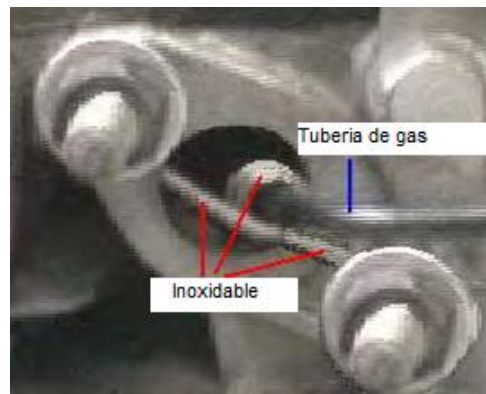
Es importante para el rendimiento del motor evitar la detonación ya que es una indicación de que la mezcla es demasiado pobre y el motor puede recalentarse. El electrolizador tendera a hacer que el motor funcione más frío y contrarrestar cualquier tendencia hacia el recalentamiento.

#### 4.4.5 CONEXIÓN FÍSICA

La conexión física con el motor se puede hacer a través de tuberías de un cuarto de pulgada de acero inoxidable, equipados con válvula de aguja. Si el motor es carburado se pueden cambiar las espreas surtidoras de gasolina, por unas de calibre menor, de manera que ahora que se utilizara oxihidrogeno se reducirá de gran manera el consumo del hidrocarburo.

El tubo de gas de acero inoxidable tiene su diámetro reducido y en su extremo se reduce aun mas por el uso de una boquilla con una diámetro interior de 1 mm o menos (1 / 16 de pulgada o menos), aproximadamente. El oxihidrogeno tiene moléculas muy pequeñas y fluirá libremente a través de pequeñas aberturas. La punta de la boquilla se inserta cerca de la válvula de admisión y el tubo de alimentación de gas está asegurado para impedir que haya movimiento:

**Figura 4. 11 Conexión física de la tubería de alimentación de oxihidrogeno al motor**



Cuando el motor está a punto de arrancar, la válvula de aguja se puede ajustar a mano para dar un nivel adecuado de flujo de gas para mantener la marcha del motor, pero antes de que esto suceda, debe ser ajustado el salto de la chispa del motor.

El prototipo propuesto tiene una producción de gas muy alta de oxihidrogeno y se debe utilizar una tubería de por lo menos de 25mm de diámetro para llevar el gas desde el electrolizador a motor.

Debido a la velocidad de la onda de presión causada por el gas es necesario mantener un control constante del gas, y prevenir cualquier inflamación espontanea en el sistema de conducción del gas.

Para hacer frente a esta situación, generada por la alta tasa de flujo de gas, hay que manejar dos trampas de condensado muy robustas, y un filtro de partículas que serán necesarios utilizar en la salida del electrolizador como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 4. 12 Filtro de partículas**



Estas unidades vienen con una tapa abovedada que debe ser perforada con un gran número de agujeros de 1 / 16 ", quedando como se muestra en la figura 4.13.

**Figura 4. 13 Detalles del filtro**

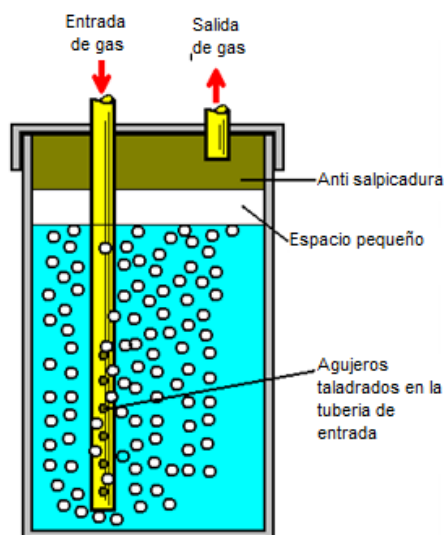


#### **4.5 CUESTIONES PRÁCTICAS EN LAS TRAMPAS DE CONDENSADO**

No importa qué tipo de electrolizador se utilice, es esencial colocar una trampa de condensado entre él y la admisión del motor. Esto es para evitar cualquier encendido accidental de los gases en el cuerpo del electrolizador. El gas hidrógeno tiende a escaparse muy fácilmente; de hecho, como sus átomos son muy pequeños, puede llegar a escaparse a

través de cualquier grieta pequeña e incluso directamente a través de muchos materiales aparentemente sólidos. Por lo tanto, cualquier prueba piloto debe realizarse al aire libre o, al menos, en lugares muy bien ventilados, mientras se decide el lugar en el cual se colocara el generador. Colocar al menos una trampa de condensado, es una medida de vital importancia.

**Figura 4. 14 Detalles de la trampa de condensado**



La construcción es muy sencilla. Puede ser de cualquier tamaño o forma, siempre que la salida de la tubería este sumergida en la trampa al menos cinco pulgadas sobre el nivel del agua.

El plástico es una opción común para el material de uso y los accesorios son fáciles de encontrar. Es muy importante que las juntas estén bien selladas en todas las tuberías.

También es una buena idea perforar agujeros adicionales en el tubo que descarga el gas en la trampa, a fin de crear un mayor número de pequeñas burbujas.

#### 4.6 LÍMITES DE TAMAÑO DE MOTOR

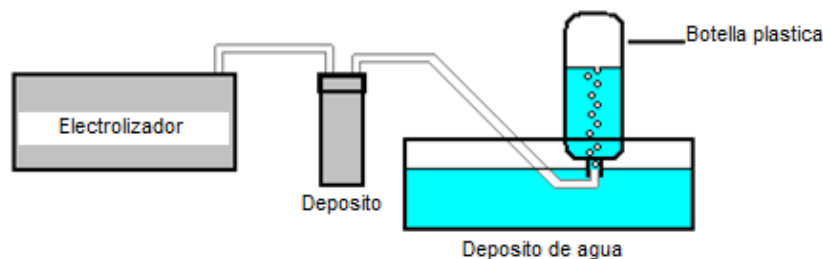
Con el prototipo escogido precisamente construido, adecuadamente limpio y acondicionado, se puede producir alrededor de 50 litros por minuto de gas continuamente, cuando se sintoniza correctamente puede sostener breves ráfagas de 100 l/min. Realmente sería engorroso calcular cuánto gas se necesita para operar un motor en particular, como el requisito de energía varía mucho de motor a motor, incluso aunque tengan la misma cilindrada. Sin embargo, no sería raro que un motor de 2 litros de capacidad funcione satisfactoriamente con un flujo de 100 l / min de gas oxihidrogeno.

Cuando las tasas de flujo de gas son tan grandes como 100 l/m es fundamental el uso de tuberías de gran diámetro (por ejemplo, de una pulgada de diámetro) en el electrolizador. Es de vital importancia recordar que es necesario evitar la producción de grandes burbujas de gas dentro del las trampas de condensado para evitar cualquier posibilidad de retroceso de llama, que es una de las funciones que tiene la trampa de condensado, así que no se debe escatimar el tamaño de las trampas, especialmente en las que el caudal de gas es muy alto.

#### 4.7 TASA DE MEDICIÓN DE GAS DE SALIDA

Aquí se describe una forma práctica, aunque no muy precisa, para calcular la medida de producción de oxihidrogeno por un electrolizador en particular. El método común es tomar una botella de plástico de capacidad conocida y llenarlo con agua.

**Figura 4. 15 Esquema de conexión para la medida de producción de oxihidrogeno**





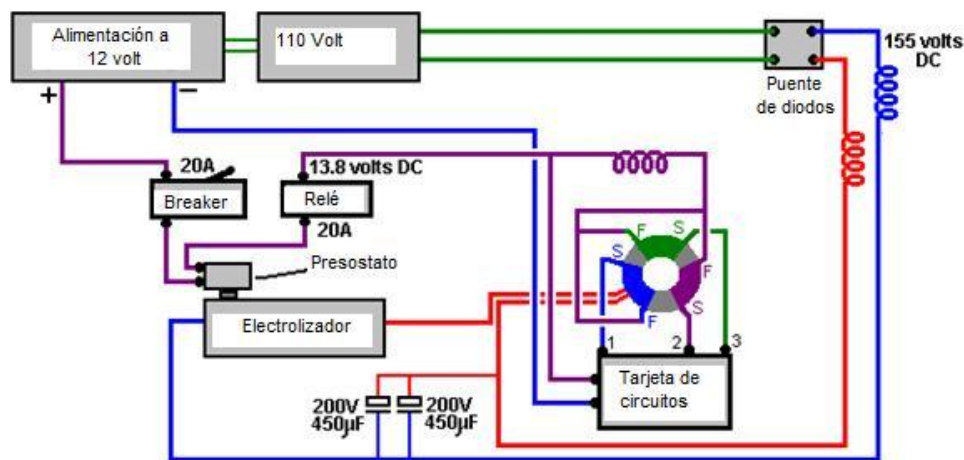
El cuello de la botella llena se coloca debajo de la superficie del agua en una cuenca común, como se muestra en la figura 4.15. El electrolizador entonces se conecta a la red y la duración del tiempo que tarda el gas para impulsar el agua de la botella indica la tasa de producción de gas. Si se tarda tres minutos para vaciar dos botellas de un litro, entonces se hubiera tomado un minuto y medio para impulsar el agua de una botella de un litro. Sería razonable, entonces, para describir la tasa de producción de gas como dos tercios de un litro por minuto o 0,67 l / min. Este método de medición es sólo aproximado ya que no permite variaciones de volumen causado por la temperatura, presión y vapor de agua, pero es lo suficientemente bueno para fines prácticos.

#### 4.8 APLICACIONES FIJAS

Ahora si se quiere hacer funcionar una unidad directamente de la red eléctrica comercial en lugar del sistema eléctrico del vehículo, a continuación se presenta las variantes que se le deben implementar al prototipo antes propuesto.

Esta es una propuesta práctica y tiene la ventaja de que el tamaño y el peso ya no son de gran importancia. El circuito se modifica ligeramente para esta aplicación, como se muestra en la siguiente figura.

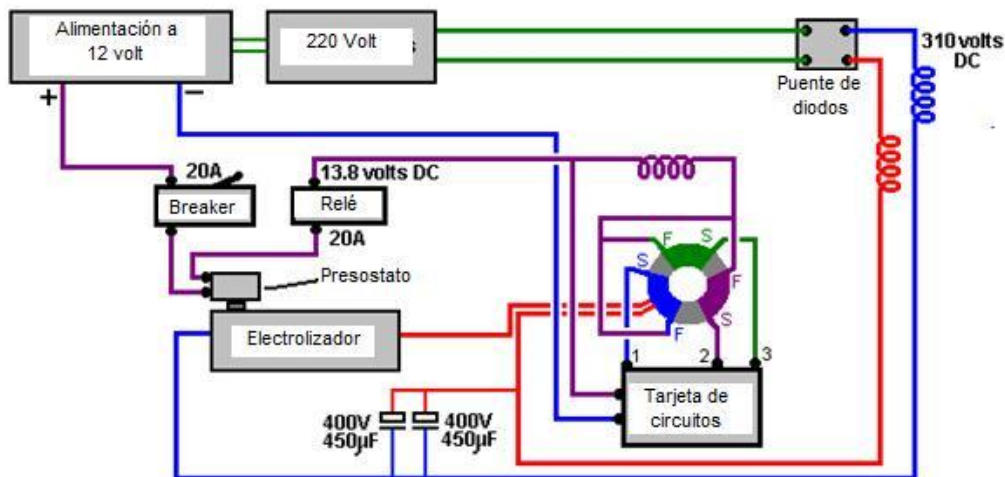
**Figura 4. 16 Esquema de conexión para alimentación a 110 Voltios AC**



Aquí, en lugar de un inversor para crear 110 voltios AC se utiliza un cargador de batería de automóvil que conectado a la red, de la alimentación necesaria para garantizar el mismo voltaje que el sistema eléctrico del vehículo habría proporcionado. Probablemente sería necesario poner un condensador de un valor muy alto en la salida del cargador de batería de automóvil para ayudar a suavizar el rizado de la tensión que se va a producir. No se debe olvidar que se va a suministrar una corriente considerable.

Si se va a utilizar un suministro de red de 220 voltios, un transformador con relación de 2:1 en la alimentación sería necesario para una unidad de 100 células, pero no para una unidad de 200 células. El circuito sería entonces el de la siguiente figura.

**Figura 4. 17 Esquema de conexión para alimentación a 220 Voltios AC**



#### 4.9 MANEJOS SEGURO DEL OXIHIROGENO

La seguridad de los sistemas de hidrógeno es un asunto altamente prioritario y un factor clave para la aceptación de los nuevos sistemas energéticos del hidrógeno. Debido a que es una tecnología no muy difundida, en nuestro país se carece de información específica para producción, manejo y almacenamiento. Con esto en mente y pensando en un futuro en la utilización del hidrogeno como combustible se incluye en este tema alguna

normalización internacional existente respecto del tema, así como también experiencias recabadas de consultas bibliográficas.

Hay algunos datos que avalan la seguridad asociada al hidrógeno, siendo el principal el hecho de que su producción y uso industrial es una tecnología relativamente madura, que puede presumir de un pequeño índice de accidentes y siniestros. No ha habido casi accidentes en casi 100 años de producción industrial, a la que se dedica un 1,8% del consumo energético mundial para producir 50.000 millones de metros cúbicos al año (que fundamentalmente se usa en refinerías para la mejora de gasolinas y gasóleos), y que se transporta por carretera y barcos y por más de 1.500 km de hidrogenoductos.

#### 4.9.1 NORMALIZACION ISO TC 197

El trabajo de estandarización en tecnologías del hidrogeno se lleva fundamentalmente a cabo a nivel internacional. La Organización Internacional de Estándares (ISO), la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC) y La National Fire Protection Association (NFPA) están implicadas.

La IEC está especializada en las aplicaciones eléctricas y electrónicas, y por lo tanto regula las celdas de combustibles, incluida la seguridad. El Comité Técnico (TC) 105 se encarga de las celdas de combustible específicamente. Pero la mayoría de los temas relacionados con el Hidrogeno; almacenamiento, distribución, suministro, se llevan a cabo por la ISO, y más concretamente por la ISO /TC 197.

**Tabla 4. 3 MIEMBROS DE LA ISO/ TC 197**

Miembros plenarios	Miembros observadores
Argentina (IRAM)	Australia (SAI)
Alemania (DIN)	Austria (ON)
Bélgica (IBN)	China (SAC)
Canadá (SCC)	España (AENOR)

Corea del Sur (KATS)	Hungría (MSZT)
Egipto (EOS)	India (BIS)
Estados Unidos (ANSI)	Jamaica (JBS)
Rusia (GOST R)	República Checa (CSNI)
Francia (AFNOR)	Reino Unido (BSI)
Holanda (NEN)	Servia y Montenegro (ISSM)
Italia (UNI)	Tailandia (TISI)
Japón (JISC)	Turquía (TSE)
Libia (LNCSM)	
Noruega (NSF)	
Suecia (SIS)	
Suiza (SNV)	

#### 4.9.2 GENERALIDADES DE LA NORMATIVA ISO/ TC 197

Normalización en el campo de los sistemas y dispositivos para la producción, almacenamiento, transporte, medición y uso del hidrógeno.

##### Objetivos

- ✓ Elaboración de Normas sobre las especificaciones del Combustible Hidrógeno, así como sobre las últimas tecnologías de uso, la necesidad de definir las características del combustible Hidrógeno según sus aplicaciones actuales y futuras.
- ✓ Elaboración de normas que provean lineamientos para el desarrollo de una infraestructura de transporte y almacenamiento del hidrógeno. Tecnologías de almacenamiento para aplicaciones móviles y fijas (contenedores, tanques de combustible para vehículos de carretera), estaciones de re-abastecimiento, conectores de abastecimiento, cañerías para hidrógeno, etc.
- ✓ Elaboración de Normas o colaboración en el desarrollo de normas sobre las últimas tecnologías (celdas de combustible, motores de combustión interna, quemadores de hidrógeno).

- ✓ Colaboración con el desarrollo de Normas sobre dispositivos de hidrógeno para el uso en vehículos de carretera (tanques y conectores de combustible).
- ✓ Elaboración de Normas sobre propiedades relevantes del hidrógeno y condiciones de seguridad que deben ser tomadas en cuenta en presencia de hidrógeno.
- ✓ Elaboración de Normas sobre las tecnologías de producción de hidrógeno desde fuentes renovables primarias, como energía solar, energía eólica, energía hidráulica, y tecnologías de producción de hidrógeno a pequeña escala mediante combustibles fósiles.
- ✓ Elaboración de Normas sobre dispositivos de detección (detectores electrónicos) y dispositivos relativos a la seguridad (válvulas de alivio, válvulas de cierre, reguladores de presión, etc.) para ser usados en sistemas de hidrógeno.

#### Beneficios esperados del trabajo del ISO/TC 197

- ✓ La Normalización Internacional se está llevando a cabo en forma simultánea con el desarrollo de la tecnología, esto facilitará la rápida demostración e implementación de las tecnologías del hidrógeno.
- ✓ La pronta instauración de las normas es probable que sirva de guía a los desarrollos tecnológicos y ayude a acelerar la aceptación del público del hidrógeno como una fuente eficiente y segura de energía.
- ✓ En un contexto de comercio incrementado, las normas desarrolladas por ISO/TC 197 asegurarán la armonización de los requisitos, principalmente en términos de rendimiento y seguridad.

En el campo de las aplicaciones industriales y energéticas, el trabajo del ISO/TC 197 intenta satisfacer las siguientes necesidades:

- ✓ Garantizar seguridad al implementar normas consensuadas para minimizar riesgos evitables a las personas y bienes a un nivel aceptable.

- ✓ Eliminar barreras al comercio internacional y simplificar el arduo proceso regulatorio al proveer normas específicas de hidrógeno, en orden de permitir una pronta implementación de las tecnologías emergentes.
- ✓ Controlar la variedad al permitir la selección del número y tipos óptimos de productos, procesos y servicios para cumplir con las necesidades preponderantes.
- ✓ Armonizar métodos de ensayo y criterios de calidad para el uso del hidrógeno en todas sus formas.
- ✓ Asegurar la protección del medio ambiente de un daño inaceptable debido a la operación y efectos de los productos, procesos y servicios ligados al hidrógeno.

## Grupos de Trabajo

- ✓ WG 1  
Hidrógeno líquido.  
Tanques de combustible para vehículos de carretera (SCC).
- ✓ WG 5  
Mezclas de hidrógeno gaseoso y combustible hidrógeno.  
Estaciones de servicio y conectores de abastecimiento (ANSI).
- ✓ WG 6  
Hidrógeno gaseoso y mezclas de hidrógeno.  
Tanques de combustibles para vehículos de carretera (SCC).
- ✓ WG 8  
Generadores de hidrógeno usando el proceso de electrólisis del agua (SCC).
- ✓ WG 9  
Generadores de hidrógeno usando tecnologías de procesamiento de combustible (NEN).
- ✓ WG 10  
Dispositivos de almacenamiento de gas transportable. Hidrógeno absorbido en hidruros metálicos (ANSI).
- ✓ WG 11  
Hidrógeno Gaseoso.  
Estaciones de Servicio (SCC).
- ✓ WG 12  
Enmienda a la ISO 14687. Combustible Hidrógeno.  
Especificación de producto (JISC).

### 4.9.3 CARACTERISTICAS A TOMAR EN CUENTA PARA EL MANEJO DE HIDROGENO

Atendiendo a las propiedades físicas del hidrógeno, se pueden ver algunas particularidades frente a otros combustibles desde el punto de vista de la seguridad.

Entre sus ventajas, cabe destacar:

- ✓ Debido a su baja densidad, el hidrógeno es extremadamente volátil, por lo que tiende a difundirse (hacia arriba) a gran velocidad, impidiendo que se formen grandes concentraciones. Esto lo convierte en un combustible especialmente seguro cuando se trabaja en espacios abiertos.
- ✓ El hidrógeno no es tóxico, por lo que en caso de que no haya combustión su riesgo para la salud humana se limita al desplazamiento del oxígeno en ciertas condiciones, frente a la toxicidad del resto de los combustibles.
- ✓ El hidrógeno tiene una baja densidad energética por unidad de volumen, por lo que la energía liberada por la combustión de un cierto volumen de hidrógeno a una cierta presión es menor que la de otros combustibles (esta propiedad que dificulta el almacenamiento de hidrógeno, es una ventaja desde el punto de vista de la seguridad).
- ✓ Como el hidrógeno tiene altos límites inferiores de inflamabilidad y detonación, es más difícil que se produzca la combustión con concentraciones pobres.
- ✓ Su combustión solo produce calor en bajos niveles y agua, solo la flama está caliente no su alrededor, por lo que el riesgo de producir fuegos secundarios es menor.
- ✓ La alta temperatura de combustión espontánea del hidrógeno es otra ventaja adicional.

Entre los inconvenientes se debe mencionar:

- ✓ La alta densidad energética por unidad de masa, que lo convierte en buen combustible, es una desventaja en cuanto a seguridad.



- ✓ El hidrógeno tiene una muy baja energía de activación comparado con otros combustibles, es decir hay que añadir muy poca energía a una mezcla potencialmente inflamable para que se inicie la combustión. Esto es una gran ventaja en procesos de combustión y sobre todo en procesos electroquímicos, pero es una gran desventaja desde el punto de vista de seguridad, ya que cualquier chispa puede activar la reacción no deseada.
- ✓ Su baja temperatura de licuefacción complica no sólo funcionalmente el almacenamiento y uso del hidrógeno líquido, sino también la seguridad asociada.
- ✓ Debido al pequeño tamaño de su molécula, el hidrógeno es altamente fugable, se disipa rápidamente (3.8 veces más rápido que el gas natural) aproximadamente a 20 m/s, por lo que las instalaciones deben estar especialmente bien selladas y correctamente inspeccionadas para detectar las fugas.
- ✓ El hecho de que hidrógeno es invisible e inodoro hace que los escapes sean indetectables con los sentidos por lo que se requiere tener equipos de detección.
- ✓ Su llama es relativamente invisible a la luz del día, lo cual supone un peligro extra.
- ✓ Como el hidrógeno tiene altos rangos de inflamabilidad y detonación, es más peligroso que otros combustibles en mezclas ricas de combustible.
- ✓ En su estado de gas es muy seco lo que da problemas de transporte por tuberías debido a la erosión que podría provocar.
- ✓ Por algunas de las propiedades antes mencionadas, se puede concluir que el hidrógeno es un combustible menos seguro que otros cuando se trabaja en espacios confinados en los que se puede producir acumulaciones potencialmente peligrosas.

Algunas consideraciones importantes son:

- ✓ Explosión

Para que una explosión por hidrógeno se presente, se debe encontrar en presencia de un oxidante como el oxígeno puro en concentraciones de al menos 10 %, o 41% de aire. El hidrógeno es explosivo en concentraciones de 18.3-59% mientras que el riesgo de explosión de la gasolina se da en concentraciones mucho más pequeñas 1.1 - 3.3%. El H<sub>2</sub> requiere de una temperatura mayor que la requerida por combustibles comunes para su ignición.

✓ Toxicidad

El hidrógeno no es tóxico ni venenoso no contamina el agua, los mantos freáticos, ni el aire. Bajo condiciones atmosféricas estándar (20 °C y 1 atm), se presenta en estado gaseoso. (Sin embargo, las condiciones normales son llamadas NTP y se consideran a 0°C y 1 atmósfera).

✓ Limitación de oxígeno

Es la concentración mínima de oxígeno necesaria para la propagación de la llama en una mezcla con concentraciones desconocidas de combustible, aire y nitrógeno. Si esta mezcla contiene menos de un 5% en volumen de oxígeno la llama no podrá propagarse

A continuación se muestra y se describe una prueba de seguridad realizada para comparar las propiedades de ignición entre el hidrógeno y la gasolina convencional.

**Figura 4. 18 Comparación de incendio controlado entre el hidrogeno y la gasolina**



Sesenta segundos después de la ignición mostrada en la figura 4.18, la flama de hidrógeno comenzó a disminuir, mientras que el fuego debido a la gasolina se intensificó. Después de 100 segundos, la flama de hidrógeno desapareció sin dañar el interior del auto. La temperatura máxima en la parte interior del parabrisas posterior fue solo de 19.4 °C mientras que el auto de gasolina continuó incendiándose por varios minutos y fue completamente destruido.

## 5. CONCLUSIONES GENERALES

- La investigación antes expuesta da las herramientas necesarias para construir el sexto prototipo de electrolizador y obtener muestras de oxihidrogeno.
- Los acercamientos al funcionamiento y operación de un motor de combustión interna utilizando oxihidrogeno y gasolina como un sistema dual de alimentación expuesto en este trabajo permitirán a futuros investigadores construir y probar los dispositivos desde una perspectiva con mucha más visión del fenómeno.
- Económicamente y de acuerdo a la tecnología actual conocida, es más factible utilizar hidrocarburos como combustible en los motores de combustión interno.
- Tomando como parámetro de referencia la eficiencia de combustión es mucho mejor utilizar oxihidrogeno como combustible en los motores de combustión interna.
- El utilizar oxihidrogeno como combustible le da al motor ciertas ventajas de funcionamiento como; operación más fría, disminución de gases de escape dañinos y operación más estable.
- Utilizando como criterio principal la conservación del medio ambiente debe tomarse como imperativa la utilización del hidrogeno y en su defecto mezclas de este, para sustituir a los hidrocarburos en un corto plazo.

## 6. PROPUESTAS DE INVESTIGACION

En el presente trabajo se han dado a conocer seis prototipos de electrolizadores de los cuales el sexto resulta muy prometedor y debido a que aquí se han presentado suficientes elementos para considerar la construcción y un posible ensayo en un vehículo se propone a los estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica próximos a inscribir su trabajo de tesis que se continúe la línea de investigación en el campo de la obtención de oxihidrogeno mediante electrolisis para su posterior uso como combustible en un motor de combustión interna y la construcción y ensayos con el sexto prototipo nos parece la mejor opción.

### 6.1 OTRAS PROPUESTAS

- Ajustar uno de los prototipos para su utilización en motores estacionarios como plantas generadoras.
- Diseñar un quemador para utilizarlo con oxihidrogeno para producir vapor de agua.
- Ajustar uno de los prototipos para utilizarlo con vapor de agua para producir oxihidrogeno.
- Ajustar uno de los prototipos para producir hidrogeno monoatómico.

## BIBLIOGRAFIA

- FUNDAMENTOS DE FISICA, VERSION AMPLIADA.  
DAVID HALLIDAY,ROBERT RESNICK  
SEGUNDA EDICION, 1986  
COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL, SA DE CV
  
- TERMODINAMICA  
KENNETH WARK, JR.  
QUINTA EDICION, 1991  
McGraw-Hill
  
- MAQUINAS ELECTRICAS  
STEPHEN J. CHAPMAN  
SEGUNDA EDICION  
McGraw-Hill
  
- INTRODUCCION A LA METALURGIA FISICA  
SYDNEY H. AVNER  
SEGUNDA EDICION  
McGraw-Hill
  
- EL HIDROGENO Y LA ENERGIA  
COLECCIÓN: AVANCES DE LA INGENIERÍA  
Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas  
Editan: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI,Universidad Pontificias Comillas
  
- ACS, Química:  
UN PROYECTO DE LA AMERICAN CHEMICAL SOCIETY  
KIRA PADILLA Y ANDONI GARRITZ  
EDITORIAL REVERTÉ, S. A.  
BARCELONA, 2005

## REFERENCIAS

➤ HYDROGEN USE IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

College of the Desert

December 2001

➤ PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS DEL AGUA CON ENERGÍA EOLOELÉCTRICA

Jesús A. Serrano García & David Muciño

Torre de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior S/N Ciudad Universitaria.

➤ R. L. LeRoy,

Int, Hydrogen Energy, 1983

➤ PROYECTO CITMA

“NUEVOS MATERIALES PARA EL DESPRENDIMIENTO DE HIDRÓGENO”

Agencia CITMA, C. de la Habana, 2001.

Edición arreglada por E. Peláez.

➤ “Estudio Cinético y Mecanístico de la Reacción de Desprendimiento de Hidrogeno sobre Electrodepositos de Ni-Fe utilizando la Técnica de Impedancia Farádica”.

Relatorio Final del Proyecto CAPES/MES-CUBA, Brasil, 2000.

Edición arreglada por E. Peláez

➤ Daily use of hydrogen: “Safety, Codes and Regulations”

ISO/TC 197 Activities

Randy Dey, The CCS Global Group Inc.

Chairman of ISO/TC 197

September 2003, Grenoble, France.

➤ REVISTA HIDROGENO

Boletín oficial de la Asociación Argentina del Hidrogeno  
Diciembre de 2007

➤ Revista IRAM, Número 123

Jose Luis Aprea  
Secretario Técnico Comité IRAM de ISOITC 197  
Septiembre 2006

➤ A Practical Guide to 'Free-Energy' Devices

Patrick J. Kelly  
July 2009

### CONSULTAS WEB

<http://www.iram.org.ar/>

[www.fuelcellstandards.com](http://www.fuelcellstandards.com)

[www.solociencia.com](http://www.solociencia.com)

[www.motordehidrogeno.net/que-es-el-motor-de-hidrogeno/trackback](http://www.motordehidrogeno.net/que-es-el-motor-de-hidrogeno/trackback)

[www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/](http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/)

<http://www.free-energy-info.com>

<http://www.smacksboosters>

[http:// www.eagle-research.com](http://www.eagle-research.com)

<http:// www.jaycar.com>