



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN**

**SISTEMA HÍBRIDO DE HIDRÓGENO PARA  
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA A PARTIR  
DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO  
ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A:**

**ESPINOZA VILLALPANDO ALFREDO  
ROJAS ARREDONDO VICTOR HUGO**

**DIRECTOR DE TESIS:  
ING. DÁMASO VELÁZQUEZ VELÁZQUEZ  
2013**



**FES Aragón**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>ANTECEDENTES HISTÓRICOS, ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA</b> .....	<b>2</b>
1.1.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	2
1.2.- CONCEPTOS BÁSICOS .....	3
1.3.- MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA .....	7
1.4.- ESTRUCTURA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA (PARTES PRINCIPALES).....	10
1.5.- FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA (CICLO OTTO) .....	45
1.6.- EL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA Y SU IMPACTO AMBIENTAL ....	49
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>EL HIDRÓGENO: HISTORIA, CARACTERÍSTICAS, MÉTODOS DE OBTENCIÓN Y APLICACIONES</b> .....	<b>55</b>
2.1.- HISTORIA .....	55
2.2.- CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO .....	55
2.3.- METODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO .....	62
2.4.- APLICACIONES DEL HIDRÓGENO .....	77
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA DE HIDRÓGENO, MATERIALES, PRUEBAS Y FUNCIONAMIENTO</b> .....	<b>95</b>
3.1.- CELDA ELECTROLÍTICA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO .....	94
3.2.- ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	96
3.3.- CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA (CELDA SECA) .....	103
3.4.- MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA SECA .....	104
3.5.- PRUEBAS Y FUNCIONAMIENTO .....	117
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>122</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>123</b>

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo del presente trabajo está motivado por la progresiva insuficiencia energética, y el exceso de contaminación que producen los motores de combustión interna utilizados en vehículos automotores, además, del alto costo que tienen hoy en día.

La función imprescindible que el petróleo ha desempeñado a lo largo de la historia contemporánea, se ha visto entorpecida por la inevitable extinción de éste. Por ello, es primordial evaluar y desarrollar alternativas de fuentes energéticas cuya producción y uso eviten una repercusión nociva para el medio ambiente como lo hacen hoy en día, además de ser sustentables y renovables. Cálculos recientes, publicados por la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), indican que para el 2037 se registrarán las primeras fallas del suministro mundial del hidrocarburo (Friedman).

Una de las sustancias que presentan una mayor cantidad de aprovechamiento energético es el hidrógeno. Sin embargo, la alta volatilidad de éste ha limitado su uso comercial intenso. En general, el petróleo produce 42 gigajoules por cada tonelada, pero el hidrógeno produce 132 gigajoules por la misma cantidad (Gueveros). Por lo tanto, se postula como una de las energías alternas más viables y con mayor contenido energético.

Existen diversas maneras de obtener hidrógeno, pero una de las más utilizadas es la electrólisis. Las ventajas que otorga este método son su sencillo desarrollo y su alto rendimiento, consideramos que el uso del hidrógeno como combustible alternativo a través de una celda electrolítica puede reducir el consumo de combustible en motores de combustión interna (diesel o gasolina), y con esto tener un mayor ahorro de combustible.

Con base en conocimientos previos, se determinaron ciertas hipótesis que podrían optimizar el funcionamiento del dispositivo creado. Para la optimización en la obtención de hidrógeno establecimos que si los compuestos iónicos, cuando se encuentran disueltos, tienen la propiedad de aumentar la conductividad eléctrica de la disolución entera o transmitir una mayor cantidad de energía eléctrica entre las moléculas del disolvente, por ello, al aumentar la concentración del soluto en la mezcla, la electrólisis se dará de una manera más rápida y producirá una mayor cantidad de hidrógeno.

En cuanto a la cantidad que se puede esperar de la electrólisis, ya que es un proceso cuyo efecto (disociación), al no cambiar las condiciones, es constante, entonces la duración del fenómeno determinará la cantidad de producto final obtenido. Por lo tanto, el tiempo del proceso electrolítico es directamente proporcional a la cantidad de hidrógeno conseguido.

Las propiedades del hidrógeno pudieron determinar que su uso es una opción viable para alternativas energéticas

# **CAPÍTULO I**

## **ANTECEDENTES HISTÓRICOS, ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

### **1.1.- ANTECEDENTES HISTÓRICOS**

Desde su presencia en la Tierra, el hombre se ha movido por la superficie del planeta, primero como un nómada y después, ya establecido, para comunicarse con otros asentamientos humanos.

Los caminos y las rutas comerciales empezaron a surcar el mundo las caravanas con productos a la espalda de porteadores y a lomo de animal dejaron su huella durante muchos años. Después, con la invención de la rueda y el carro, aquellos caminos se ensancharon; grandes volúmenes de mercancías comenzaron a fluir a la velocidad permitida por la tracción animal y esta historia se prolongó también por muchos años... hasta la invención de la máquina de vapor y su aplicación a la locomotora. Como ya sabemos, la máquina de vapor consistía básicamente en una caldera con agua a la que se le aplicaba el calor producido por un fogón en la parte exterior. El vapor generado por la ebullición del agua se conducía a unos grandes émbolos y su fuerza expansiva movía las ruedas de la locomotora que arrastraba así grandes convoyes. La máquina de vapor era pues, un motor de combustión externa que rápidamente evolucionó y logró ser aplicado en los primeros intentos por sustituir al caballo en la tracción de carros. Sin embargo, no fue sino hasta el desarrollo del motor de combustión interna, que se logró integrar el concepto moderno de automóvil; un vehículo que se mueve por sí mismo, impulsado por la fuerza generada al quemar su combustible dentro del motor.

Los motores hidráulicos son los más antiguos conocidos (Herón de Alejandría, S. I a. J.C.), utilizaban como fuerza motriz la energía de una masa de agua que cae desde cierta altura, llamada salto. Esta energía se transforma en trabajo útil disponible en el eje de la máquina, que era la rueda hidráulica, actualmente la turbina. El motor nace por la necesidad de trabajos que, por duración, intensidad, manejabilidad o mantenimiento, no puede ser realizado por animales.

La invención se puede remontar a dos italianos: el padre Eugenio Barsanti, un sacerdote esculapio, y Felice Matteucci, ingeniero hidráulico y mecánico, que ya en 1853 detallaron documentos de operación y construcción y patentes pendientes en varios países europeos como Gran Bretaña, Francia, Italia y Alemania.

Los primeros prototipos carecían de la fase de compresión; es decir, la fase de succión terminaba prematuramente con el cierre de la válvula de admisión antes de que el pistón llegase a la mitad, lo que provocaba que la chispa que generaba la combustión que empuja la carrera del pistón fuese débil. Como consecuencia el funcionamiento de estos primeros motores era deficiente. Fue la fase de compresión la que dio una eficiencia significativa al motor de combustión interna, que lograría el reemplazo definitivo de los motores a vapor e impulsaría el desarrollo de los

automóviles, ya que lograba desarrollar una potencia igual o mayor en dimensiones considerablemente mucho más reducidas.

Las primeras aplicaciones prácticas de los motores de combustión interna fueron los motores fuera de borda. Debido a que el principal impedimento para la aplicación práctica del motor de combustión interna en vehículos terrestres era el hecho de que, a diferencia de la máquina de vapor, no podía comenzar desde parado. Los motores marinos no sufren este problema, ya que las hélices son libres de un significativo momento de inercia.

El motor tal como lo conocemos hoy fue desarrollado por el alemán Nikolaus Otto, quien en 1886 patentó el diseño de un motor de combustión interna a cuatro tiempos, basado en los estudios del inventor francés Alphonse Beau de Rochas de 1862, que a su vez se basó en el modelo de combustión interna de Barsanti y Matteucci.



**Figura 1.** Ejemplo de los primeros automóviles

## **1.2.- CONCEPTOS BÁSICOS**

### **A) MÁQUINA**

Una máquina es un conjunto de elementos móviles y fijos cuyo funcionamiento posibilita aprovechar, dirigir, regular o transformar energía o realizar un trabajo con un fin determinado. Las máquinas son aparatos que nos sirven para aplicar más ventajosamente las fuerzas. Las máquinas no crean trabajo solamente lo transmiten. Pero eso sí, de tal forma, que este trabajo resulta mucho más provechoso, o más sencillo.

Las máquinas inventadas por el hombre se pueden clasificar atendiendo a tres puntos de vista:

- Según su complejidad, que se verá afectada por el número de operadores (piezas) que la componen.
- Según el número de pasos o encadenamientos que necesitan para realizar su trabajo.
- Según el número de tecnologías que la integran.

Analizando nuestro entorno podemos encontrarnos con máquinas **sencillas** (como las pinzas de depilar, el balancín de un parque, un cuchillo, un cortaúñas o un motor de gomas), **complejas** (como el motor de un automóvil o una excavadora) o **muy complejas** (como un cohete espacial o un motor de reacción), todo ello dependiendo del número de piezas empleadas en su construcción. En la figura 2 se pueden apreciar algunos tipos de máquinas.

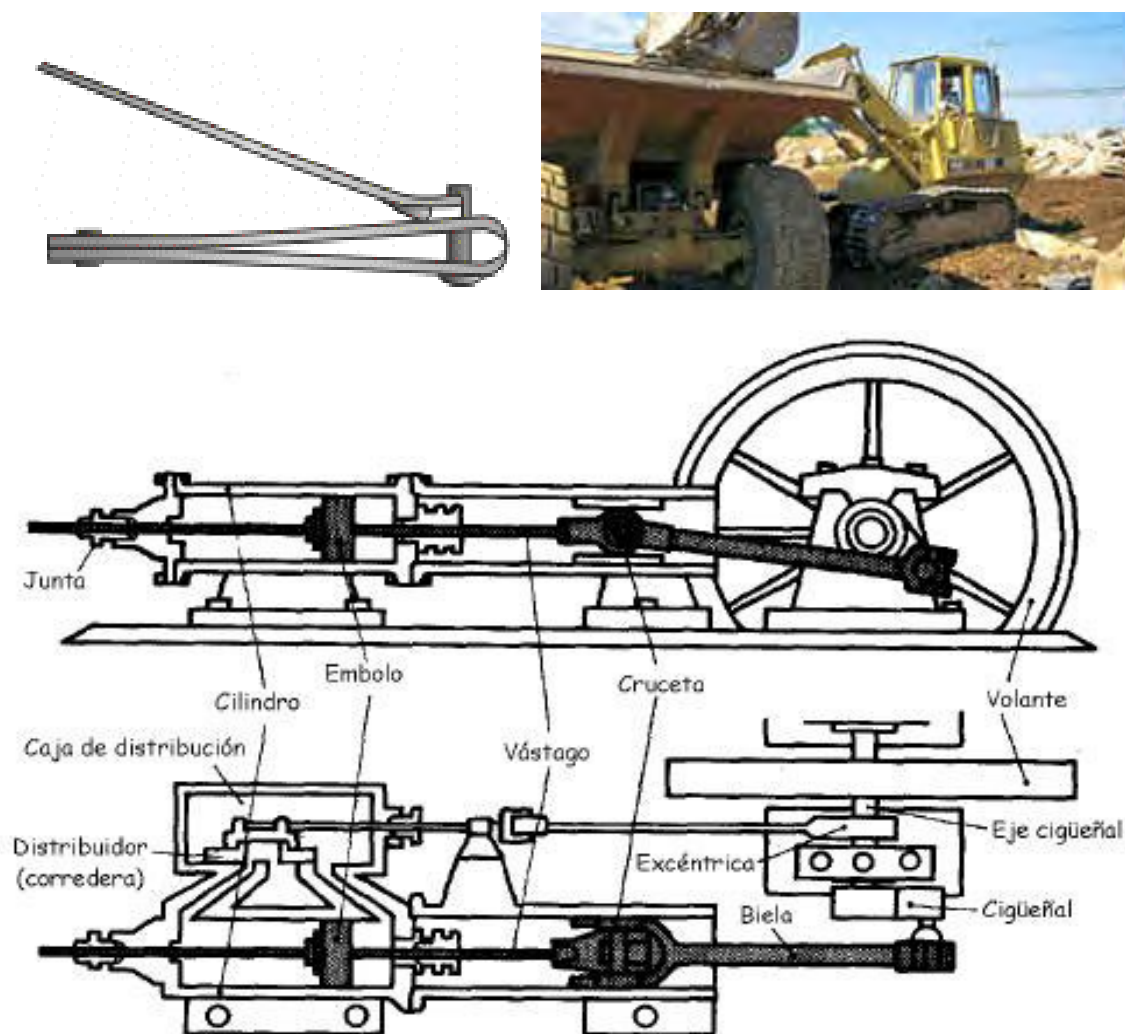


Figura 2. Tipos de Máquinas



## B) MECANISMO

El concepto de **mecanismo** tiene su origen en el término latino *mechanisma* y se refiere a la totalidad que forman los diversos componentes de una **maquinaria** y que se hallan en la disposición propicia para su adecuado funcionamiento.

En las maquinas se llama mecanismo a la agrupación de sus componentes que son móviles y se encuentran vinculados entre sí a través de diversas clases de uniones; esto hace que dicha estructura pueda transmitir fuerzas y movimientos. El mecanismo es el encargado de permitir dicha transmisión.

Para que un mecanismo sea considerado como tal es necesario que se encuentre formado por una **serie de componentes**, los cuales son: **eslabón** (elemento rígido que transmite el movimiento de un lugar a otro fundamental para que el mecanismo se active), **nodo** (unifica dos eslabones entre sí para que a través de él se comunique el movimiento) y **junta**, también conocida como **par cinemático**, (permite que eslabón y nodo funcionen correctamente, indicando la unión entre los diferentes eslabones como partes de un todo).

Los mecanismos pueden clasificarse de acuerdo a muchas variables:

- De acuerdo a la **cantidad de eslabones** pueden ser de tipo **binarios, ternarios o cuaternarios**
- De acuerdo a la función pueden ser **fijos, conductores, transductores o conducidos**
- De acuerdo al **movimiento** que ocasionan pueden ser **fijos, de manivela, de biela o de corredera**.

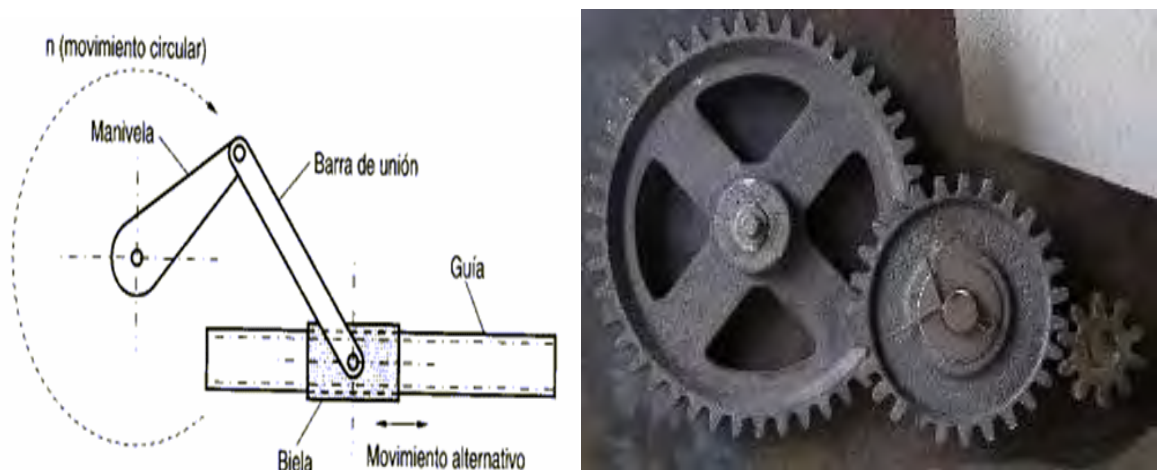


Figura 3. Mecanismos

## C) MOTOR

La definición formal de un motor es aquella máquina que está constituida para transformar algún tipo de energía en movimiento, dicho movimiento se entrega en forma rotacional. En los automóviles este efecto es una fuerza que produce el movimiento.

Existen diversos tipos, siendo de los más comunes los siguientes:

- **Motores térmicos**, cuando el trabajo se obtiene a partir de energía calórica.
- **Motores de combustión interna**, son motores térmicos en los cuales se produce una combustión del fluido del motor, transformando su energía química en energía térmica, a partir de la cual se obtiene energía mecánica. El fluido del motor antes de iniciar la combustión es una mezcla de un comburente (como el aire) y un combustible, como los derivados del petróleo y gasolina, los del gas natural o los biocombustibles.
- **Motores de combustión externa**, son motores térmicos en los cuales se produce una combustión en un fluido distinto al fluido del motor. El fluido del motor alcanza un estado térmico de mayor fuerza, mediante la transmisión de energía a través de una pared.
- **Motores eléctricos**, cuando el trabajo se obtiene a partir de una corriente eléctrica.

En los aerogeneradores, las centrales hidroeléctricas o los reactores nucleares también se transforma algún tipo de energía en otro. Sin embargo, la palabra *motor* se reserva para los casos en los cuales el resultado inmediato es energía mecánica.

Los motores eléctricos utilizan la inducción electromagnética que produce la electricidad para producir movimiento, según sea la constitución del motor: núcleo con cable arrollado, sin cable arrollado, monofásico, trifásico, con imanes permanentes o sin ellos; la potencia depende del calibre del alambre, las vueltas del alambre y la tensión eléctrica aplicada.

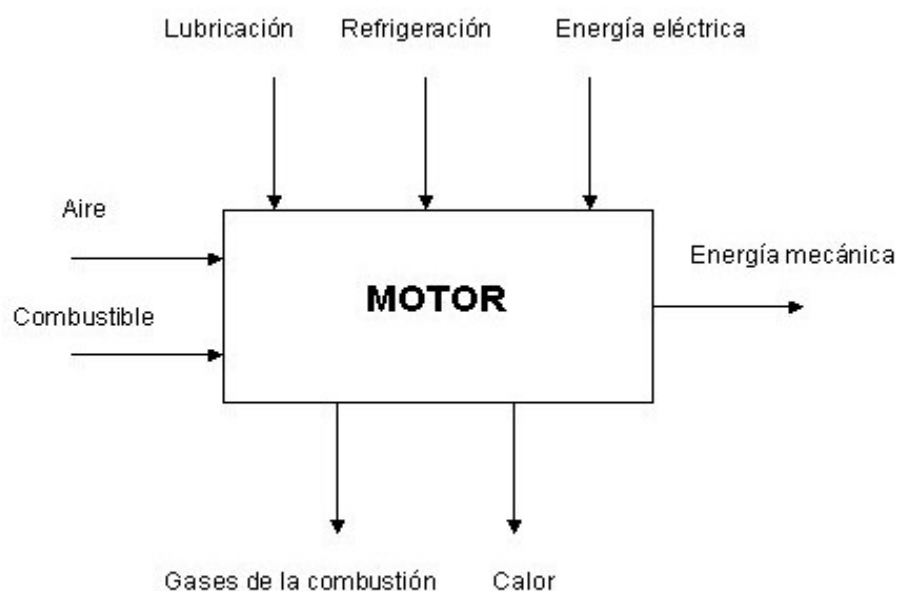
## CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UN MOTOR

- **Rendimiento**: es el cociente entre la potencia útil que generan y la potencia absorbida. Habitualmente se representa con la letra griega  $\eta$ .
- **Velocidad de poco giro** o **velocidad nominal**: es la velocidad angular del cigüeñal, es decir, el número de revoluciones por minuto (rpm) a las que gira. Se representa por la letra **n**.
- **Potencia**: es el trabajo que el motor es capaz de realizar por unidad de tiempo a una determinada velocidad de giro. Se mide normalmente en caballos de vapor (CV), siendo 1 CV igual a 736 vatios.
- **Par motor**: es el momento de rotación que actúa sobre el eje del motor y determina su giro. Se mide en  $\text{kg}\cdot\text{m}$  (kilogramos por metro) o en newton-metro (Nm), siendo 1  $\text{kgm}$  igual a 9,81 Nm. Hay varios tipos de pares, véanse por ejemplo el par de arranque, el par de aceleración y el par nominal.

### 1.3.- MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Un motor de combustión interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión, la parte principal de un motor.

En un diagrama de bloques de entradas y salidas, (Figura 4), tendríamos como entrada: aire y combustible y el aporte de sistemas auxiliares necesarios para el funcionamiento como son los sistemas de lubricación, refrigeración y energía eléctrica; y en el interior del motor, sistema de distribución, mecanismos pistón-biela-manivela y como producto de salida final tendríamos la energía mecánica utilizable, además tendríamos como residuos o productos de la ineficiencia los gases de la combustión y calor cedido al medio.



**Figura 4.** Diagrama de Bloques de Entradas y Salidas

Los motores se utilizan para realizar un trabajo mecánico, su utilización es muy variada y el rango de aplicaciones es muy amplio, se los puede ver accionando, bombas de superficie, generadores, vehículos, compresores, etc.

Consta de un sistema de suministro de combustible, un sistema de suministro de aire, un dispositivo para realizar la mezcla, cámaras de combustión, un sistema que transforma la energía calorífica en movimiento alternativo y este a su vez mediante un mecanismo biela-manivela se transforma en un movimiento de rotación. En los motores es muy importante la llamada relación de compresión que es el número de veces que el volumen de la cámara formada por el pistón cuando está en su punto muerto superior (P.M.S.), las paredes del cilindro y la tapa de cilindros, cabe en el volumen de la cámara que se produce con las paredes del cilindro, la tapa de

cilindros y el pistón cuando está en el punto muerto inferior (P.M.I.). Según el tipo de combustible utilizado en el motor es la relación de compresión que necesita para su funcionamiento.

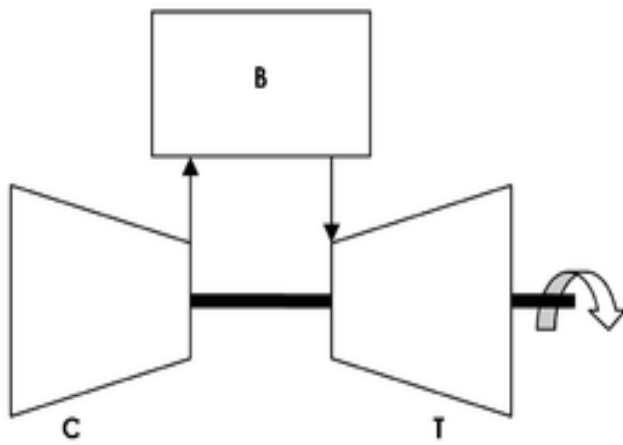
**Se utilizan motores de combustión interna de cuatro tipos:**

- **El motor cíclico Otto**, cuyo nombre proviene del técnico alemán que lo inventó, Nikolaus August Otto, es el motor convencional de gasolina que se emplea en automoción y aeronáutica.
- **El motor diésel**, llamado así en honor del ingeniero alemán Rudolf Diesel, funciona con un principio diferente y suele consumir gasóleo. Se emplea en instalaciones generadoras de energía eléctrica, en sistemas de propulsión naval, en camiones, autobuses y automóviles. Tanto los motores Otto como los diésel se fabrican en modelos de dos y cuatro tiempos.
- **El motor rotatorio**. Un motor rotativo o Wankel, en honor a su creador Félix Wankel, es un motor de combustión interna que funciona de una manera completamente diferente de los motores alternativos. En un motor alternativo, se efectúan sucesivamente 4 diferentes operaciones dentro de una cámara - admisión, compresión, combustión y escape-. En un motor Wankel se desarrollan los mismos 4 tiempos pero en zonas distintas del estator o bloque, con el pistón moviéndose sin detenciones de un tiempo a otro. Más concretamente, el envolvente es una cavidad con forma de 8, dentro de la cual se encuentra un rotor triangular o triángulo lobular que realiza un giro de centro variable. Este pistón transmite su movimiento rotatorio a un eje cigüeñal que se encuentra en su interior, y que gira ya con un centro único. Al igual que un motor de pistones, el rotativo utiliza la presión producida por la combustión de la mezcla aire-combustible. La diferencia radica en que esta presión está contenida en la cámara formada por una parte de la envolvente o estator y cerrada por uno de los lados del rotor triangular, que en este tipo de motor reemplaza a los pistones. El rotor sigue un recorrido en el que mantiene sus 3 vértices en contacto con el "estator" o "epitrocoide", delimitando así tres compartimentos separados de mezcla. A medida que el rotor gira dentro de la cámara, cada uno de los 3 volúmenes se expande y contrae alternativamente; es esta expansión-contracción la que aspira el aire y el combustible hacia el motor, comprime la mezcla, extrae su energía expansiva y luego expulsa los gases quemados hacia el escape.



**Figura 5.** Motor Wankel

- **La turbina de combustión.** Es una turbomáquina motora, cuyo fluido de trabajo es un gas. Como la compresibilidad de los gases no puede ser despreciada, las turbinas a gas son turbomáquinas térmicas. Comúnmente se habla de las turbinas a gas por separado de las turbinas ya que, aunque funcionan con sustancias en estado gaseoso, sus características de diseño son diferentes, y, cuando en estos términos se habla de gases, no se espera un posible cambio de fase, en cambio cuando se habla de vapores sí. Las turbinas de gas son usadas en los ciclos de potencia como el ciclo Brayton y en algunos ciclos de refrigeración. Es común en el lenguaje cotidiano referirse a los motores de los aviones como turbinas, pero esto es un error conceptual, ya que éstos son turbo reactores los cuales son máquinas que, entre otras cosas, contienen una turbina de gas. Los primeros motores de combustión interna no tenían compresión, sino funcionaron en la mezcla de aire y combustible aspirada o soplada adentro durante la primera parte del movimiento del producto. La distinción más significativa entre los motores de combustión interna modernos y los diseños antiguos es el uso de la compresión.



**Figura 6.** Esquema de un ciclo Brayton. C representa al compresor, B al quemador y T a la turbina

#### **1.4.- ESTRUCTURA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA (PARTES PRINCIPALES)**

Nuestro objetivo principal se centra en los motores de 4 tiempos o de ciclo Otto, ya que son los más utilizados en vehículos automotores y donde se busca emitir menos gases contaminantes debido a que su fuente de energía es la gasolina o diesel. A continuación veremos cuáles son las partes que lo conforman y de qué manera funcionan.

Los motores Otto y los diesel tienen los mismos elementos principales: (bloque, cigüeñal, biela, pistón, culata, válvulas) y otros específicos de cada uno, como la bomba inyectora de alta presión en los diesel, o antiguamente el carburador en los Otto.

En los 4T es muy frecuente designarlos mediante su tipo de distribución: SV (válvulas laterales), OHV (válvulas sobre la cabeza), SOHC (árbol de levas en cabeza simple), DOHC (doble árbol de levas en cabeza).

##### **1.4.1.- CÁMARA DE COMBUSTIÓN**

En la cámara de combustión de un motor se produce un proceso fundamental para el movimiento del coche, ya que es en ella donde la mezcla aire-combustible es comprimida por el recorrido ascendente de un pistón.

En este sitio es donde la bujía produce la chispa que generará la ignición de la mezcla, y por la presión de los gases se inicia un nuevo recorrido de los cilindros.



**Figura 7.** Cámara de Combustión

La cámara de combustión es un cilindro, por lo general fijo, cerrado en un extremo y dentro del cual se desliza un pistón muy ajustado al cilindro. La posición hacia dentro y hacia fuera del pistón modifica el volumen que existe entre la cara interior del pistón y las paredes de la cámara. La cara exterior del pistón está unida por una biela al cigüeñal, que convierte en movimiento rotatorio el movimiento lineal del pistón.

En los motores de varios cilindros, el cigüeñal tiene una posición de partida, llamada espiga de cigüeñal y conectada a cada eje, con lo que la energía producida por cada cilindro se aplica al cigüeñal en un punto determinado de la rotación.

Los cigüeñales cuentan con pesados volantes y contrapesos cuya inercia reduce la irregularidad del movimiento del eje. Un motor alternativo puede tener de 1 a 28 cilindros.

La forma de las cámaras influye notoriamente en la potencia y rendimiento del motor, por lo que existen cuatro tipos de cámaras con diseños variados.

En primer lugar, hallamos las cámaras en forma cilíndrica, más frecuentes por su bajo costo y buenas prestaciones, con las que la chispa de la bujía está en contacto directo con la totalidad de la mezcla.

Las cámaras en forma de bañera o en cuña presentan angulación en uno o dos de sus lados, en los cuales se alojará la bujía (dispuesta lateralmente), presentando válvulas en la culata y eliminando la turbulencia de la mezcla, dándole mayor durabilidad a las bielas.

Finalmente las hemisféricas, en forma de cúpula, presentan válvulas laterales y bujía dispuesta en la cúspide, generando un menor recorrido de la chispa y un mayor nivel de llama, por lo que conlleva a una muy alta potencia.



**Figura 8.** Tipos de Cámaras de Combustión

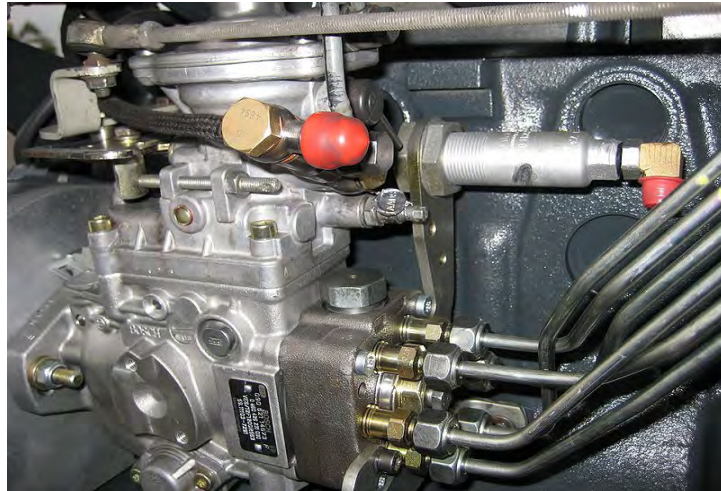
#### **1.4.2.- SISTEMA DE ALIMENTACIÓN**

El sistema de alimentación de combustible de un motor Otto consta de un depósito, una bomba de combustible y un dispositivo dosificador de combustible que vaporiza o atomiza el combustible desde el estado líquido, en las proporciones correctas para poder ser quemado.

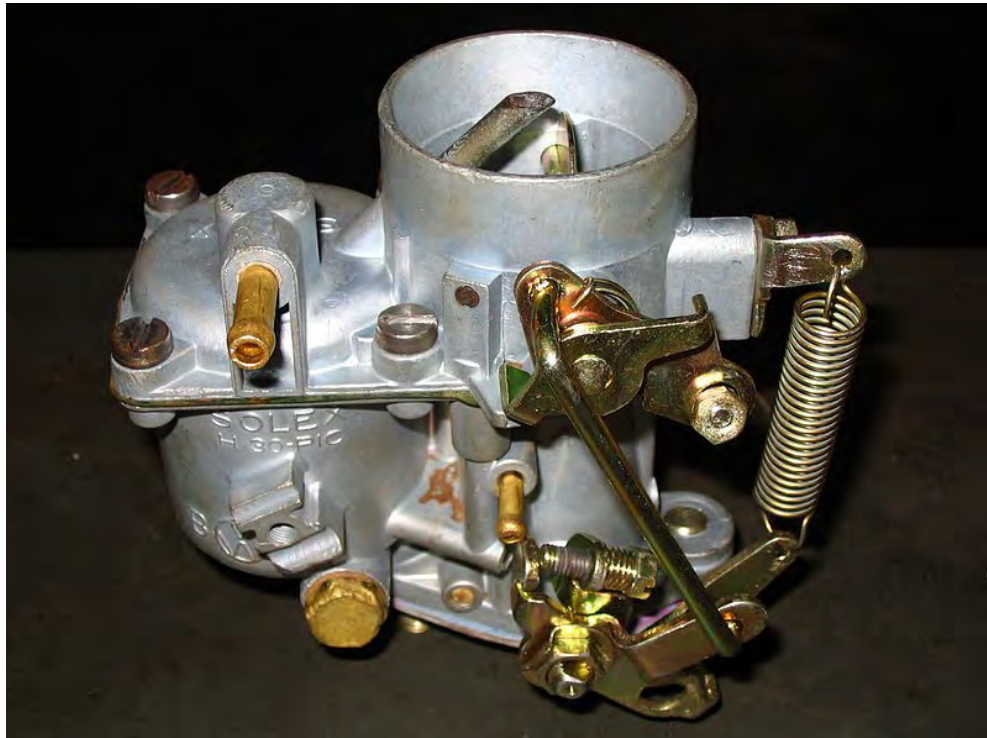
Se llama carburador al dispositivo que hasta ahora venía siendo utilizado con este fin en los motores Otto. Ahora los sistemas de inyección de combustible lo han sustituido por completo por motivos medioambientales. Su mayor precisión en la dosificación de combustible inyectado reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, y asegura una mezcla más estable. En los motores diesel se dosifica el combustible gasoil de manera no proporcional al aire que entra, sino en función del mando de aceleración y el régimen motor (mecanismo de regulación) mediante una bomba inyectora de combustible.

En los motores de varios cilindros el combustible vaporizado se lleva a los cilindros a través de un tubo ramificado llamado colector de admisión. La mayor parte de los motores cuentan con un colector de escape o de expulsión, que transporta fuera del vehículo y amortigua el ruido de los gases producidos en la combustión.





**Figura 9.** Bomba de inyección de combustible BOSCH para motor diesel



**Figura 10.** Carburador SOLEX monocuerpo

### **1.4.3.- INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE**

La inyección de combustible es un sistema de alimentación de motores de combustión interna, alternativo al carburador en los motores de explosión, que es el que usan prácticamente todos los automóviles europeos desde 1990, debido a la obligación de reducir las emisiones contaminantes y para que sea posible y duradero el uso del catalizador a través de un ajuste óptimo del factor lambda.

El sistema de alimentación de combustible y formación de la mezcla complementa en los motores Otto al sistema de Encendido del motor, que es el que se encarga de desencadenar la combustión de la mezcla aire/combustible.

Este sistema es utilizado, obligatoriamente, en el ciclo del diesel desde siempre, puesto que el combustible tiene que ser inyectado dentro de la cámara en el momento de la combustión (aunque no siempre la cámara está sobre la cabeza del pistón).

En los motores de gasolina actualmente está desterrado el carburador en favor de la inyección, ya que permite una mejor dosificación del combustible y sobre todo desde la aplicación del mando electrónico, por medio de un calculador que utiliza la información de diversos sensores colocados sobre el motor para manejar las distintas fases de funcionamiento, siempre obedeciendo las solicitudes del conductor en primer lugar y las normas de anticontaminación en un segundo lugar.

#### **1.4.4.- SISTEMAS DE INYECCIÓN**

En un principio se usaba inyección mecánica pero actualmente la inyección electrónica es común incluso en motores diesel.

Los sistemas de inyección se dividen en:

Inyector diesel (mando electrónico)

- Inyección multipunto y monopunto: Para ahorrar costos a veces se utilizaba un solo inyector para todos los cilindros, o sea, monopunto, en vez de uno por cada cilindro, o multipunto. Actualmente, y debido a las normas de anticontaminación existentes en la gran mayoría de los países, la inyección monopunto ha caído en desuso.
- Directa e indirecta. En los motores de gasolina es indirecta si se pulveriza el combustible en el colector o múltiple de admisión en vez de dentro de la cámara de combustión, o sea en el cilindro. En los diésel, en cambio, se denomina indirecta si se inyecta dentro de una precámara que se encuentra conectada a la cámara de combustión o cámara principal que usualmente en las inyecciones directas se encuentran dentro de las cabezas de los pistones.

Gracias a la electrónica de hoy en día, son indiscutibles las ventajas de la inyección electrónica. Es importante aclarar que en el presente todos los Calculadores Electrónicos de Inyección (mayormente conocidos como ECU "Engine Control Unit" o ECM "Engine Control Module") también manejan la parte del encendido del motor en el proceso de la combustión. Aparte de tener un mapa de inyección para todas las circunstancias de carga y régimen del motor, este sistema permite algunas técnicas como el corte del encendido en aceleración (para evitar que el motor se revolucione excesivamente), y el corte de la inyección al detener el vehículo con el motor, o desacelerar, para aumentar la retención, evitar el gasto innecesario de combustible y principalmente evitar la contaminación.

En los motores diesel el combustible debe estar más pulverizado porque se tiene que mezclar en un lapso menor y para que la combustión del mismo sea completa. En un motor de gasolina el combustible tiene toda la carrera de admisión y la de compresión para mezclarse; en cambio en un diesel, durante las carreras de admisión y compresión sólo hay aire en el cilindro. Cuando se llega al final de la compresión, el aire ha sido comprimido y por tanto tiene unas elevadas presión y temperatura, las que permiten que al inyectar el combustible éste pueda inflamarse. Debido a las altas presiones reinantes en la cámara de combustión se han diseñado entre otros sistemas, el Common-Rail y el elemento bomba-inyector a fin de obtener mejores resultados en términos de rendimiento, economía de combustible y anticontaminación.

Instalación del Sistema K-Jetronic en el motor

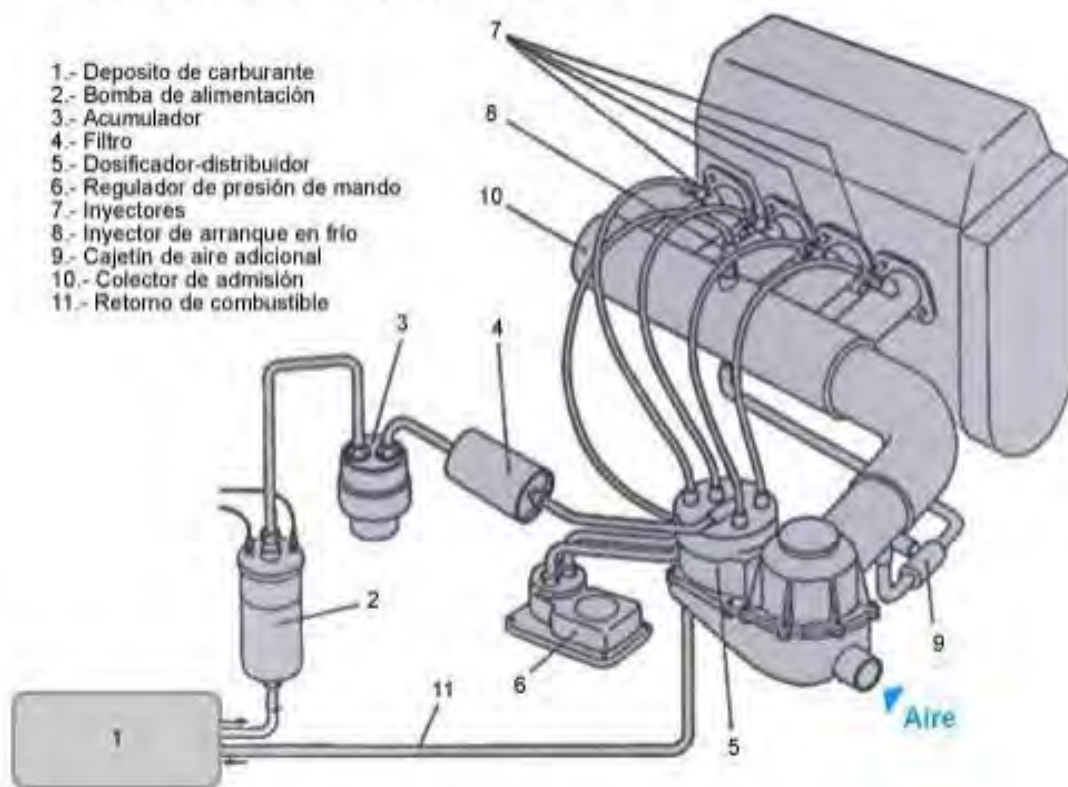


Figura 11. Sistema K-Jetronic

#### 1.4.5.- SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Es el sistema del motor que coordina los movimientos del conjunto móvil para permitir el llenado de los cilindros con la mezcla aire-combustible, su encendido y el vaciado de los cilindros, a fin de aprovechar al máximo la energía química del combustible. La función del sistema de distribución es la de permitir la apertura y cierre de las válvulas en forma sincronizada con los desplazamientos del pistón. Generalmente es el sistema de distribución el encargado de coordinar también la señal de encendido.

### Piñones de distribución

Son ruedas dentadas destinadas a transmitir el giro del eje cigüeñal al eje de la distribución (eje de levas), en forma coordinada, para lo cual cada piñón se montan en su eje en una sola posición determinada por diseño en fábrica. Un piñón, el menor se monta en el cigüeñal y otro el mayor se monta en el eje de distribución (eje de levas). La relación de giro entre ellos es de 2:1 (dos a uno), es decir por dos giros del eje cigüeñal el eje de distribución gira una vez. (Dos vueltas del cigüeñal por una del eje de levas).



Figura 12. Sistema de Distribución

La transmisión del movimiento entre los piñones es de dos formas:

- **Mando directo:** Se engranan ambos piñones entre sí y giran en sentidos contrarios.
- **Mando indirecto:** Se transmite el movimiento a través de una correa, una biela, una cadena o piñones intermediarios. El giro de ambos piñones de

distribución será ahora en el mismo sentido. Para transmisión de movimiento a través de cadena o correa se hace necesario la instalación de un elemento tensor a fin de mantener la debida tensión de los elementos de transmisión. Este tensor puede ser de tipo mecánico o hidráulico accionado por la presión de aceite del motor.

Para la correcta sincronización del eje cigüeñal con el eje de distribución, ya sea de mando directo o indirecto, se provisionan marcas especiales para los piñones e intermediarios, si es el caso. La acción de montar los piñones a los ejes y sincronizarlos se llama “Calaje de la Distribución”.

Los mandos de distribución son convenientemente cubiertos por la tapa de la distribución. Latón estampado debidamente sellado para todos los tipos de transmisores de movimiento excepto por correa dentada. Polímeros y plástico con guardapolvo para transmisión por correa dentada.

### **Eje de levas**

Es un eje construido en acero forjado de forma definida por sus componentes, que tiene por función accionar las válvulas, proporcionar movimiento a la bomba mecánica de combustible, proporcionar movimiento a la bomba de aceite y proporcionar señal sincronizada para el encendido.

Sus componentes son:

#### **a) Puños**

Son conformaciones circulares sobre su eje de simetría, destinados a proporcionar el apoyo necesario para la instalación del eje de levas en el túnel de levas del block o culata, según sea el caso. El eje de levas se instala sobre sus puños por la interposición entre puño y bancada de leva de un cojinete convenientemente lubricado por el aceite a presión proveniente de las galerías de lubricación del motor.

#### **b) Placa de sujeción**

Es una placa de acero que limita el movimiento axial del eje de levas.

#### **c) Levas o Camones**

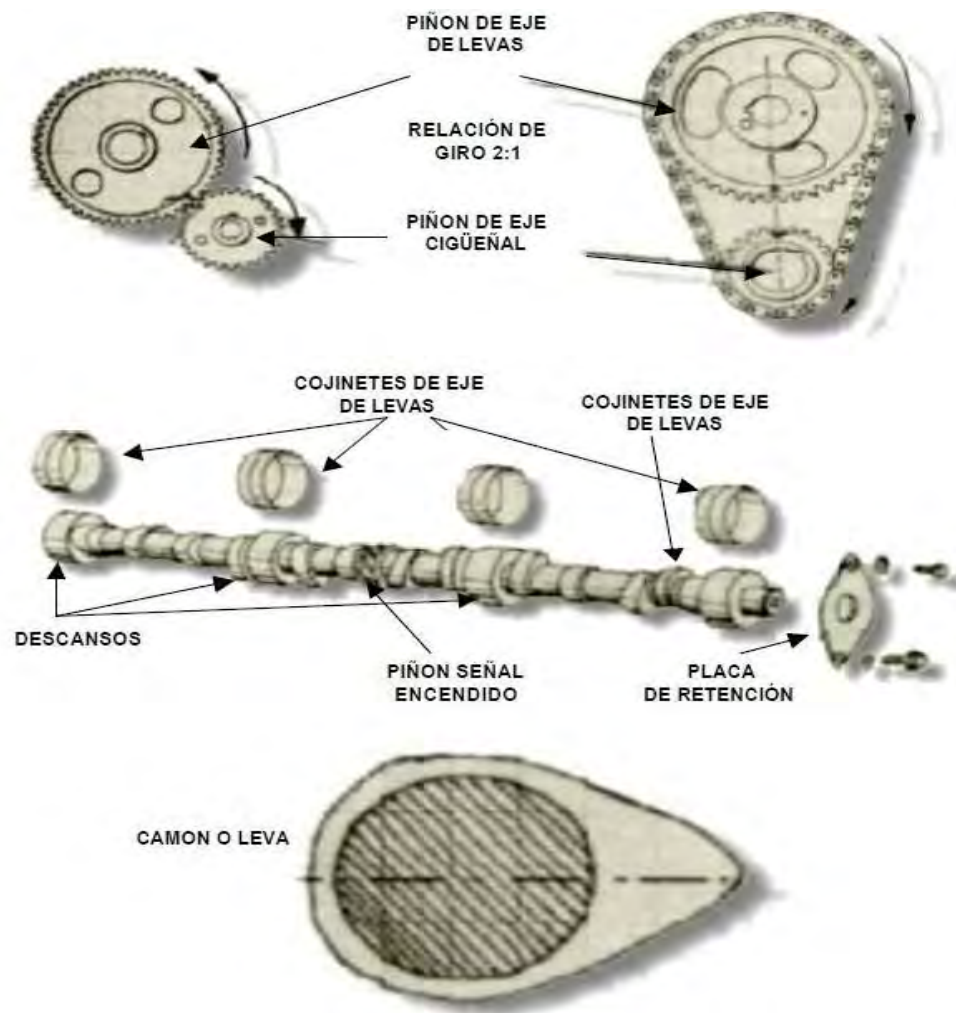
Son piezas especiales construidas en el eje (al que dan su nombre), estas piezas tienen por función transformar el movimiento continuo circular del eje de levas en un movimiento rectilíneo alternativo. Este movimiento alternativo es el que será entregado a la válvula para efectuar su apertura y cierre. Es el perfil de la leva el que determinará el movimiento a efectuar por la válvula y el tiempo durante el cual permanecerá la válvula en las distintas posiciones. Un perfil de leva se obtiene de un gráfico de distancia versus tiempo en grados de giro del eje.

Será la conformación de los camones o levas la que originará los movimientos de las válvulas. El movimiento de las válvulas dará origen a ciclos distintos en el cilindro en cada uno de los desplazamientos del pistón.



d) **Piñón de señal de encendido**

Es un piñón construido en el eje de levas que tiene por función accionar el piñón del distribuidor de encendido.



**Figura 13.** Posición del Eje de Levas

Según el lugar de instalación del eje de levas, los motores se clasifican en:

- **OHV** Eje de levas instalado en la porción inferior del block.
- **HV** Eje de levas instalado en la porción media superior del block.
- **OHC** Eje de levas instalado en la culata del motor.

Un motor puede llevar las levas para todas las válvulas en un sólo eje o árbol de levas o bien puede tener un árbol para las levas de las válvulas de admisión y otro árbol para las levas de las válvulas de escape.

En motores diesel existe una leva para el accionamiento de cada inyector.

## **Taques**

Son piezas metálicas construidas en aleación de acero. Son los componentes del sistema de distribución que está en contacto con el perfil de la leva. En su construcción se trata térmicamente (cementa) su cara de contacto con la leva.

La función de los taqués es la de transformar el movimiento rotatorio continuo del eje de levas y sus camones en un movimiento rectilíneo alternativo para conseguir la apertura y cierre de las válvulas, para tal efecto los taqués siguen el contorno o perfil de la leva, recibiendo el movimiento circular de ella desplazándose en forma rectilínea dentro de su alojamiento de acuerdo a los distintos radios de la leva. Este movimiento lo transmiten a la válvula produciendo aperturas, permanencia en una posición y cierre de la válvula.

Tipos de taques:

### **a) Mecánicos**

Piezas metálicas de forma cilíndrica, huecos por su interior a fin de reducir la inercia de su masa. Existe un tipo especial de taqué mecánico, usado para montajes con válvulas en el block, este taqué incorpora un elemento de reglaje de la holgura de válvulas.

### **b) Hidráulicos**

Son piezas metálicas compuestas de un cilindro hueco con una ranura exterior anular con perforaciones y en el interior aloja un juego de válvulas, un muelle, un pistón perforado, un asiento y un anillo de cierre. Todo este conjunto trabaja con la presión de aceite del motor que mantiene en forma constante una determinada presión dentro del taqué permitiendo diferentes posiciones del pistón a fin de mantener permanente la holgura de válvulas en su cota.

Los taques van situados en guías especiales para este efecto taladradas en el block del motor o de la culata, y su posición es descentrada con respecto a la línea de centro de la leva a fin de permitir su rotación y evitar el desgaste de leva y taque.

## **Varilla alza válvulas o de empuje**

Son varillas metálicas construidas de acero con alta resistencia a las cargas axiales. Su función es la de recibir el movimiento rectilíneo alternativo de los taqués y transmitirlo al balancín. Para taqués mecánicos son macizas y para taqués hidráulicos las varillas son perforadas por su interior para transportar el aceite que sale del taqué y llevarlo hacia el balancín a fin de lubricarlo.

## **Balancines**

Son piezas metálicas con forma de dos brazos de palanca unidos a un eje de giro común. Están constituidos por, Brazo de admisión, Eje de giro, Brazo de empuje. Su función es la recibir el movimiento rectilíneo desde la varilla alzaválvulas y cambiar su dirección a fin de accionar la válvula.

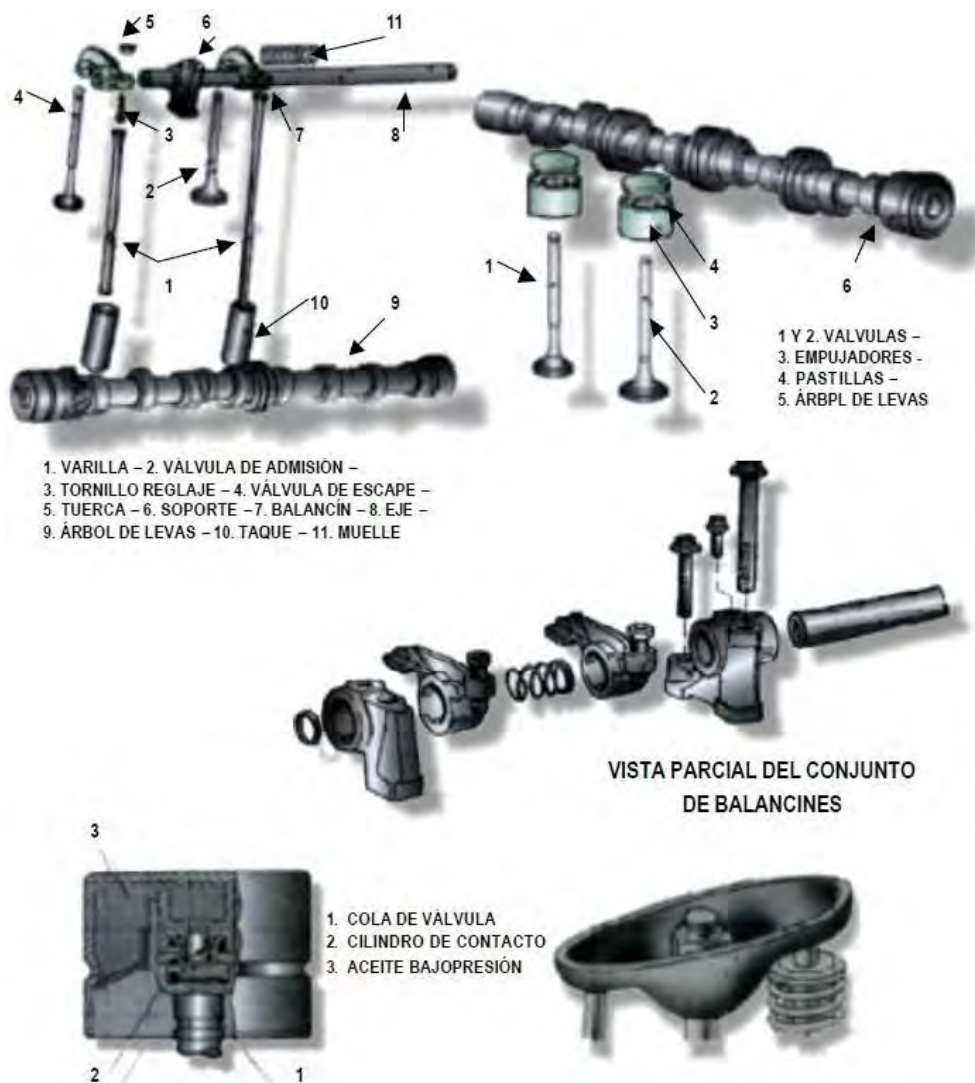
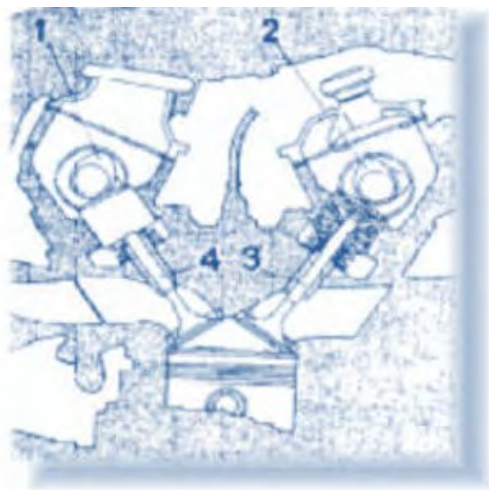


Figura 14. Balancines

### Válvulas

Componentes del sistema de distribución de sección cilíndrica fabricadas en acero de alta calidad y aleaciones especiales para soportar las altas temperaturas a la que están expuestas, sobre 700° a temperatura normal de trabajo del motor. Están montadas en el block o culata según sea el caso. Para su montaje y deslizamiento se usa un elemento llamado Guía de válvula, es esta guía la que se deja solidaria al block o culata desplazándose la válvula por su interior. La guía de válvula sobresale (en su extremo opuesto al cilindro) para permitir la instalación de un retén destinado a impedir que el aceite penetre por entre guía y válvula al interior de la cámara de combustión.





1 Y 2 ÁRBOL DE LEVAS - 3 Y 4 VÁLVULAS



1. ÁRBOL DE LEVAS  
2. TAQUÉ  
3. VARILLA  
4. BALENCÍN  
5. VÁLVULA

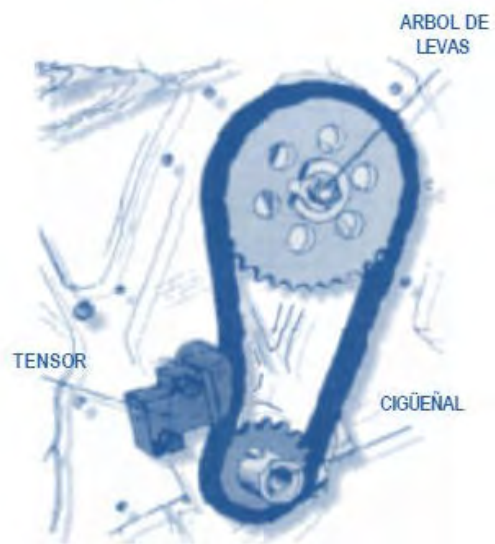
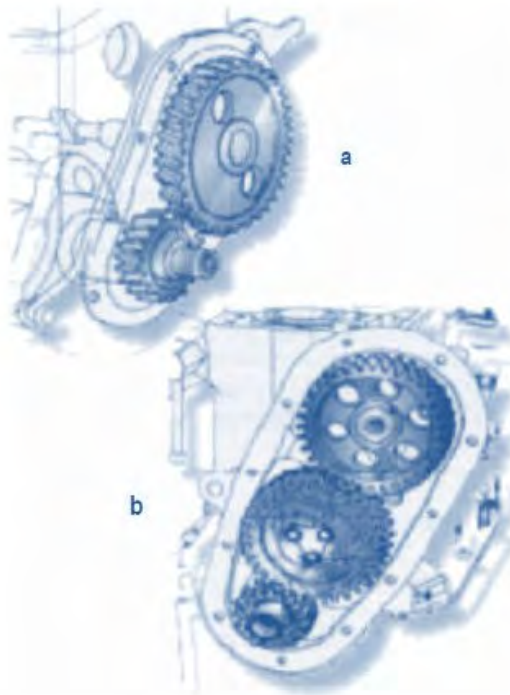


Figura 15. Vista de las válvulas dentro del motor

### Partes de la válvula

En la válvula se distinguen las siguientes partes:

- a) **Cabeza:** Parte inferior de la válvula mecanizado conveniente para ser alojada en la cámara de combustión.
- b) **Margen:** Espacio entre la parte plana de la cabeza de la válvula y el término de la cara, determina la vida útil de la válvula.

- c) **Cara:** Es la parte mecanizada de la cabeza destinada a producir el cierre hermético. Con forma de cono truncado, sus generatrices forman ángulos de 30° o 45°.
- d) **Vástago:** Es la prolongación de la válvula de diámetro radicalmente menor a la cabeza tiene por función sustentar y guiar la válvula en su alojamiento dentro de la guía, y disipar el calor de la válvula entregándolo a la guía.
- e) **Cola de la válvula:** Es la parte final del vástago, en esta sección se frezan las ranuras destinadas a contener a los seguros de válvula. Es sobre la cola de válvula donde se aplica la fuerza de empuje del balancín para producir la apertura de la válvula.

La válvula para su instalación y trabajo requiere de elementos auxiliares:

- a) **Retenedor:** Pieza metálica de apoyo sobre la superficie de instalación alrededor de la guía.
- b) **Resorte de retracción:** Muelle para devolver la válvula a su estado de reposo o cierre después de haber trabajado. En algunos modelos se instalan dos resortes, uno fuerte de trabajo y por su interior con hélice en sentido opuesto al principal otro más delgado, cuya función es la de eliminar las resonancias de la frecuencia al resorte principal y evitar rebotes.

### **Platillo portaseguros**

Es un platillo cilíndrico instalado en la cola de la válvula de forma cónica tiene por función contener por su base al o los muelles de retracción, por su interior retiene a los seguros que se montan sobre una ranura de la cola de la válvula, estos seguros son los que mantienen debidamente armado todo el conjunto de la válvula.

### **Función de la válvula**

La válvula tiene por función poner a los cilindros en contacto con el exterior por medio de los ductos de admisión para el ingreso de la mezcla aire-combustible, o por medio de los ductos de escape para la expulsión de los gases residuales o bien producir el cierre hermético de los cilindros para la compresión de la mezcla carburante.

### **Tipos de válvulas**

Según la función que desempeña cada válvula estas se clasifican en:

- a) **Válvulas de admisión:** Encargadas de la apertura y cierre de los ductos de admisión, normalmente el ángulo de su cara es de 30° ( al plano perpendicular al eje geométrico de la válvula) ya que por recibir el efecto modificador de la mezcla aire -combustible disipa mejor su calor.
- b) **Válvulas de escape:** Encargadas de la apertura y cierre de los ductos de escape, normalmente el ángulo de su cara es de 45° ya que por no recibir efecto modificador alguno y por el contrario está siempre expuesta a altas

temperaturas de la mezcla en combustión y de los gases calientes de escape se debe hacer su cara de mayor solidez.

### Asientos de válvulas

Son anillos de acero instalados en la llegada de los conductos de admisión y escape dentro de la cámara de combustión destinados a producir el cierre hermético del cilindro en conjunto con la cara de la válvula.

Al igual que la cara de válvula su forma es la de cono truncado y el ángulo de sus generatrices debe ser complementario al de la cara de la válvula respectiva con la que trabaja.

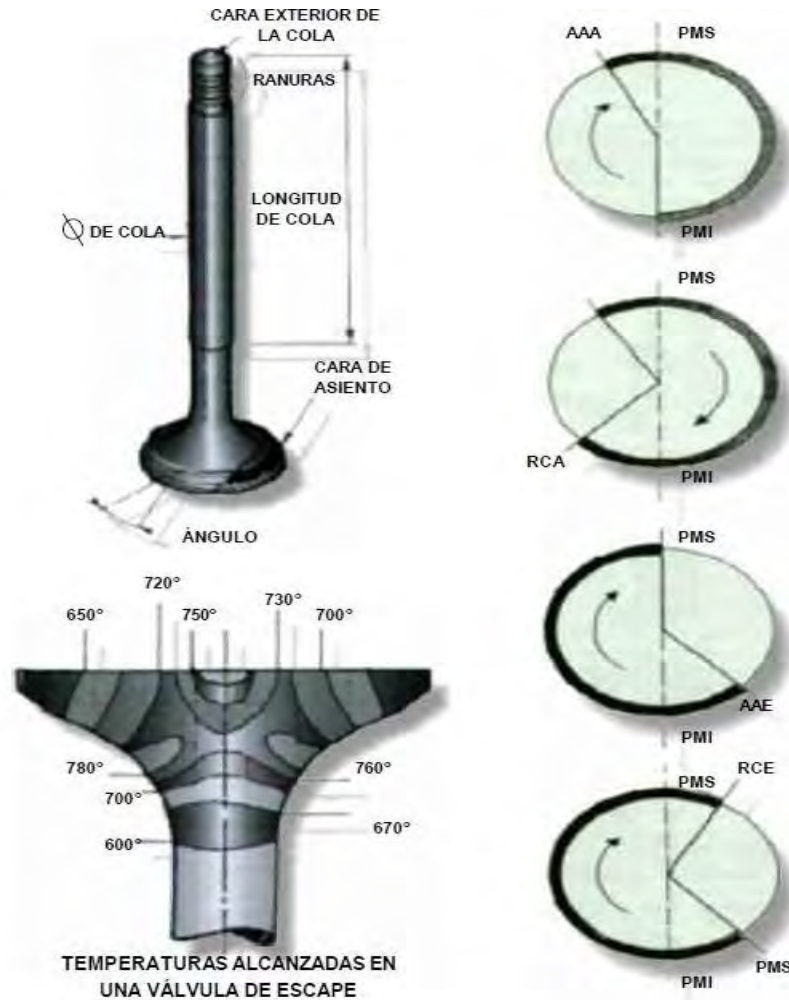


Figura 16. Vista de la cara de asiento de una válvula y temperaturas alcanzadas

### 1.4.6.- ENCENDIDO

El encendido del motor es un sistema de producción y distribución, en el caso de más de un cilindro, de la chispa de alta tensión necesaria en la bujía para producir el encendido provocado en los motores de gasolina (ciclo Otto) ya sean de 2 o de 4 tiempos (2T y 4T).

Los motores necesitan una forma de iniciar la ignición del combustible dentro del cilindro. En los motores Otto, el sistema de ignición consiste en un componente llamado bobina de encendido, que es un auto-transformador de alto voltaje al que está conectado un conmutador que interrumpe la corriente del primario para que se induzca un impulso eléctrico de alto voltaje en el secundario.

Dicho impulso está sincronizado con la etapa de compresión de cada uno de los cilindros; el impulso se lleva al cilindro correspondiente (aquel que está comprimido en ese momento) utilizando un distribuidor rotativo y unos cables de grafito que dirigen la descarga de alto voltaje a la bujía. El dispositivo que produce la ignición es la bujía, que, fijada en cada cilindro, dispone de dos electrodos separados unas décimas de milímetro, entre los cuales el impulso eléctrico produce una chispa, que inflama el combustible.

### **Generación de la chispa**

Es conocido el hecho de que la electricidad puede saltar el espacio entre dos electrodos aislados si el voltaje sube lo suficiente produciéndose lo que se conoce como arco eléctrico. Este fenómeno del salto de la electricidad entre dos electrodos depende de la naturaleza y temperatura de los electrodos y de la presión reinante en la zona del arco. Así tenemos que una chispa puede saltar con mucho menos voltaje en el vacío que cuando hay presión y que a su vez, el voltaje requerido será mayor a medida que aumente la presión reinante. De esto surge la primera condición que debe cumplir el sistema de encendido:

- **Condición 1:** El sistema de encendido debe elevar el voltaje del sistema eléctrico del automóvil hasta valores capaces de hacer saltar la electricidad entre dos electrodos separados colocados dentro del cilindro a la presión alta de la compresión.

### **Momento del encendido**

Durante la carrera de admisión la mezcla que ha entrado al cilindro, bien desde el carburador, o bien mediante la inyección de gasolina en el conducto de admisión se calienta, el combustible se evapora y se mezcla íntimamente con el aire. Esta mezcla está preparada para el encendido, en ese momento una chispa producida dentro de la masa de la mezcla comienza la combustión. Esta combustión produce un notable incremento de la presión dentro del cilindro que empuja el pistón con fuerza para producir trabajo útil.

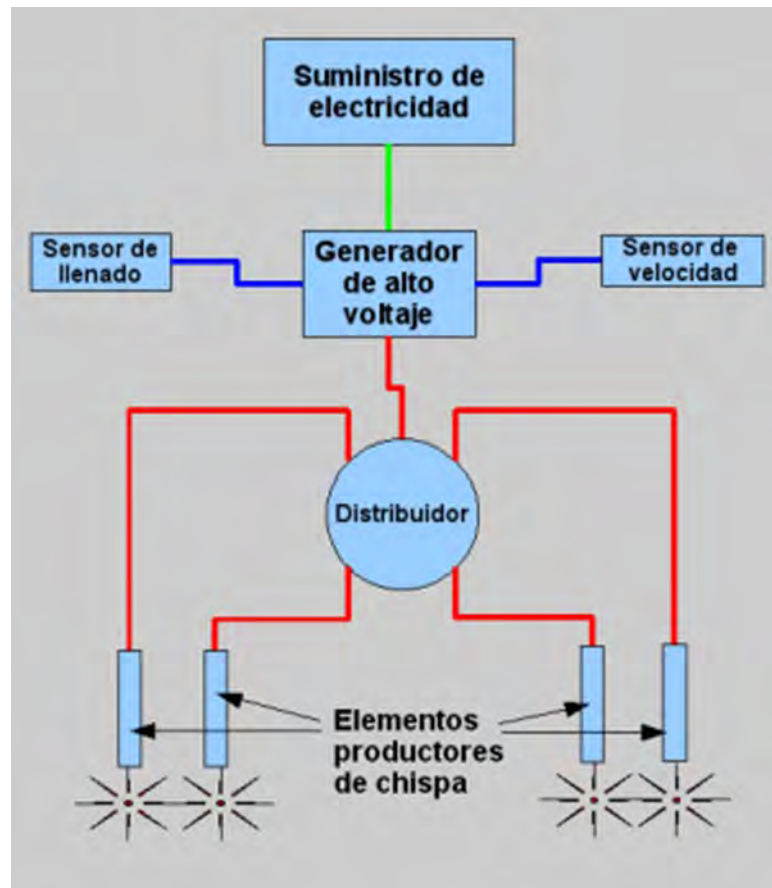
Para que el rendimiento del motor sea bueno, este incremento de presión debe comenzar a producirse en un punto muy próximo después del punto muerto superior del pistón y continuar durante una parte de la carrera de fuerza.

Cuando se produce la chispa se inicia el encendido primero alrededor de la zona de la chispa, esta luego avanza hacia el resto de la cámara como un frente de llama, hasta alcanzar toda la masa de la mezcla. Este proceso aunque rápido no es instantáneo, demora cierto tiempo, por lo que nuestro sistema debe producir la chispa un tiempo antes de que sea necesario el incremento brusco de la presión, es decir antes del punto muerto superior, a fin de dar tiempo a que la llama avance lo

suficiente en la cámara de combustión, y lograr las presiones en el momento adecuado, recuerde que el pistón está en constante movimiento. A este tiempo de adelanto de la chispa con respecto al punto muerto superior se le llama avance al encendido.

Si consideramos ahora la velocidad de avance de la llama como constante, resulta evidente que con el aumento de la velocidad de rotación del motor, el pistón se moverá más rápido, por lo que si queremos que nuestro incremento de presión se haga siempre en la posición adecuada del pistón en la carrera de fuerza, tendremos necesariamente, que adelantar el inicio del salto de la chispa a medida que aumenta la velocidad de rotación del motor. De este asunto surge la segunda condición que debe cumplir el sistema de encendido:

- **Condición 2:** El sistema de encendido debe ir adelantando el momento del salto de la chispa con respecto a la posición del pistón gradualmente a medida que aumenta la velocidad de rotación del motor.



**Figura 17.** Elementos necesarios para el encendido del motor

Resulta imprescindible una fuente de suministro de energía eléctrica para abastecer al sistema, este puede ser una batería de acumuladores o un generador. Luego será

necesario un elemento que sea capaz de subir el bajo voltaje de la batería, a un valor elevado para el salto de la chispa (varios miles de voltios). Este generador de alto voltaje tendrá en cuenta las señales recibidas de los sensores de llenado del cilindro y de la velocidad de rotación del motor para determinar el momento exacto de la elevación de voltaje. Para la elevación del voltaje se usa un transformador elevador de altísima relación de elevación que se le llama bobina de encendido en trabajo conjunto con un generador de pulsos que lo alimenta.

Será necesario también un dispositivo que distribuya el alto voltaje a los diferentes cables de cada uno de los productores de la chispa dentro de los cilindros (bujías) en concordancia con las posiciones respectivas de sus pistones para el caso del motor policilíndrico.

### **Descripción de los componentes**

Dada la diversidad y de formas en que pueden cumplimentarse en la actualidad las exigencias del sistema de encendido y a su larga historia de adaptación a las tecnologías existentes se hace difícil abarcar todas las posibilidades, no obstante, haremos un recorrido por los más representativos.

La aparición en la década de los 60s del siglo pasado de los dispositivos semiconductores y en especial los transistores, y luego los circuitos integrados, sentó pauta en la composición y estructura de los sistemas de encendido, de manera que para hablar de ellos habrá un antes, y un después, que son decisivos a la hora de describir un sistema de estos. Utilizaremos para la descripción del sistema uno de tipo clásico, de los utilizados antes de que los dispositivos electrónicos formaran parte del sistema.

### **Fuente de alimentación**

La fuente de alimentación del sistema de encendido depende en muchos casos de la futura utilización a que se destine el motor, así tenemos que normalmente para el motor del automóvil que incluye, porque es requerido, una batería de acumuladores, se utiliza esta fuente para la alimentación del sistema, pero para los motores estacionarios, especialmente los pequeños, donde la batería no es necesaria para otro fin, se acude a los generadores de pulsos eléctricos conocidos como magnetos. Estos magnetos son pequeños generadores del tipo de rotor a imanes permanentes de corriente alterna movidos por el propio motor y sincronizados con él que producen electricidad para alimentar el sistema de encendido durante el tiempo necesario para generar la chispa.

En ocasiones y para la mayoría de los motores mono cilíndricos pequeños de arranque manual, la electricidad la induce un imán permanente empotrado en el volante en el lugar apropiado al pasar frente a una bobina fija en el cuerpo del motor.

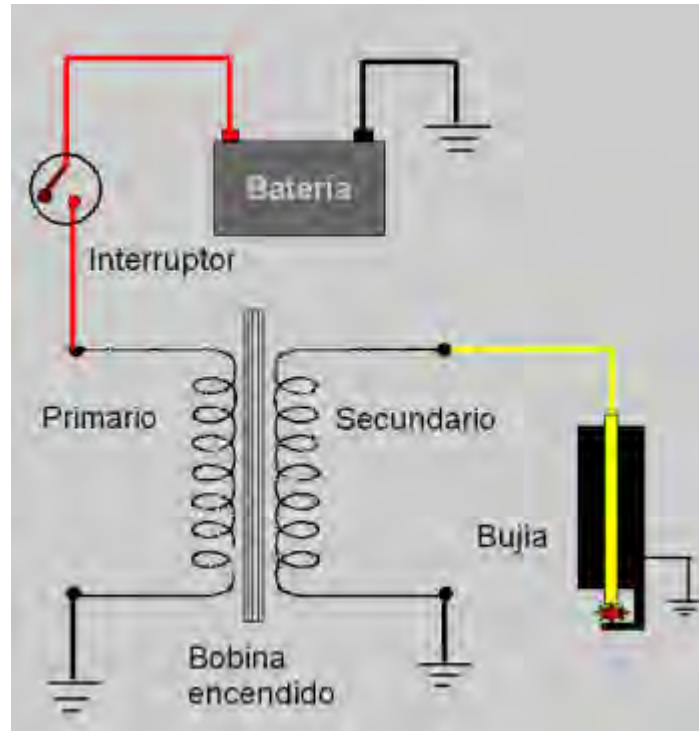
### **Generación del alto voltaje**

El voltaje de alimentación del sistema de encendido, por ejemplo, alimentado con una batería suele ser de 6, 12, o 24 volts, mucho más bajo de los 18,000 a 25,000 voltios necesarios para generar la chispa entre los electrodos de la bujía, separados hasta 2mm, y bajo la presión de la compresión. Para lograr este incremento se

acude a un transformador elevador con muy alta relación entre el número de vueltas del primario y del secundario, conocido como bobina de encendido. Usted se preguntará ¿Cómo un transformador, si es corriente directa? pues sí, veamos como:

En la Figura 18 se muestra un esquema del modo de convertir el voltaje de la batería al necesario para la chispa en el motor mono cilíndrico.

Note como la corriente de la batería está conectada al primario del transformador a través de un interruptor y que la salida del secundario se conecta al electrodo central de la bujía. Todos los circuitos se cierran a tierra.



**Figura 18.** Generación de Alto Voltaje

El interruptor está representado como un contacto, que era lo usual antes de la utilización de los dispositivos semiconductores. Hoy en día ese contacto es del tipo electrónico de diversos tipos.

Mientras el contacto está cerrado, circula una corriente eléctrica por el primario del transformador, en el momento de abrirse el contacto, esta corriente se interrumpe por lo que se produce un cambio muy rápido del valor del campo magnético generado en el núcleo del transformador, y por lo tanto la generación de un voltaje por breve tiempo en el secundario. Como la relación entre el número de vueltas del primario y del secundario es muy alta y además el cambio del campo magnético ha sido violento, el voltaje del secundario será extremadamente más alto, capaz de hacer saltar la chispa en la bujía.



Sincronizando el momento de apertura y cierre del contacto con el movimiento del motor y la posición del pistón, se puede generar la chispa en el momento adecuado al trabajo del motor en cada carrera de fuerza.

Si en lugar de una batería se utiliza un magneto, el esquema es esencialmente el mismo, con la diferencia de que el magneto estará generando la corriente del primario en el momento de apertura del contacto, aunque en el resto del ciclo no genere nada. Utilizando el sincronismo adecuado, magneto-contacto-posición del pistón el encendido estará garantizado.

### Distribución

Cuando el motor tiene más de un cilindro se necesita un chispa para cada uno, puede optarse por elaborar un sistema completo independiente por cilindro y de hecho se hace, pero lo más común es que solo haya un sistema generador del alto voltaje que produzca la elevación tantas veces como haga falta (una vez por cilindro) y otro aparato que distribuya la electricidad a la bujía del cilindro correspondiente. Este dispositivo se llama distribuidor. En la Figura 19 se muestra un esquema que sirve para entender cómo funciona el distribuidor, (sistema de encendido para un motor de seis cilindros).

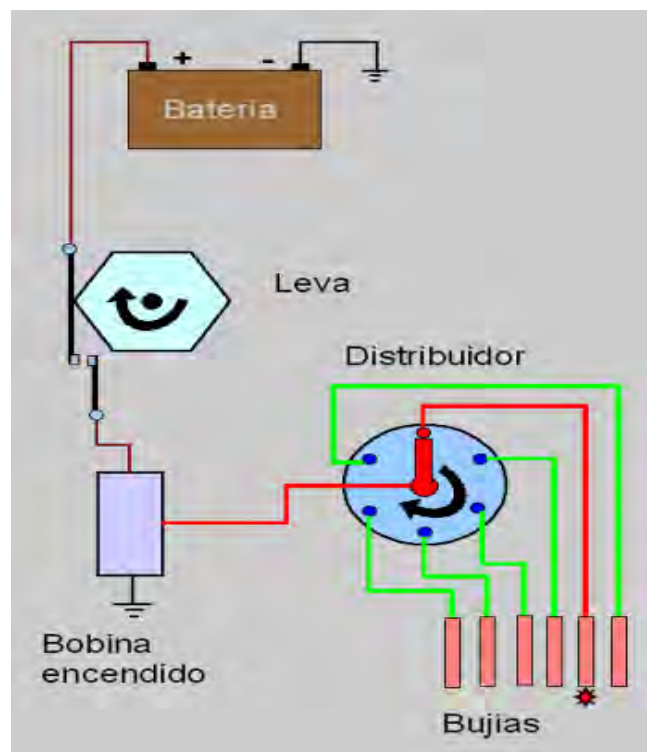


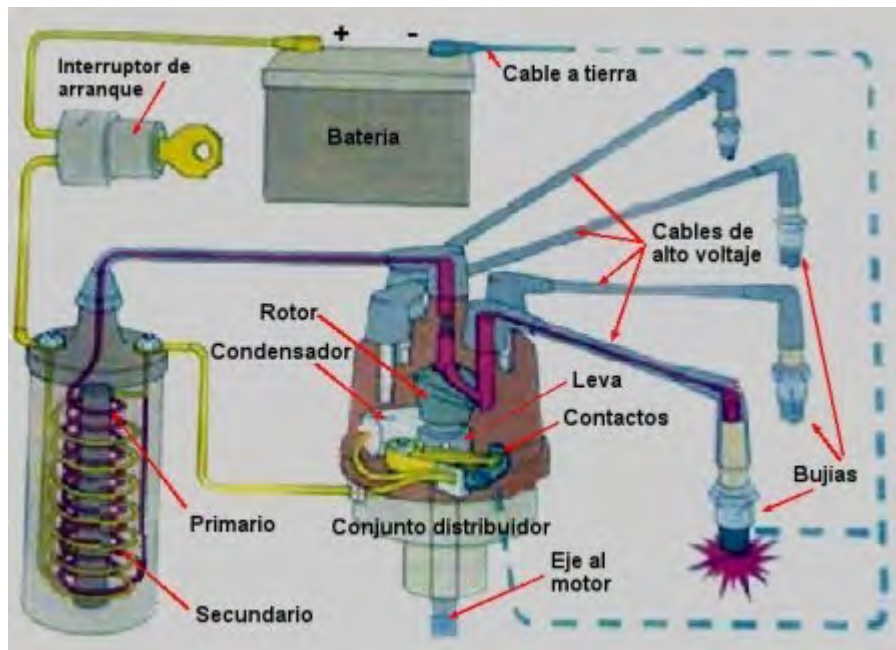
Figura 19. Sistema de Distribución

Como se explicó anteriormente, un contacto eléctrico interrumpe el circuito primario de la bobina de encendido y genera en el secundario el voltaje suficiente. En este caso una leva hexagonal sincronizada con el motor a través de engranajes gira, y abre el contacto en seis ocasiones por cada vuelta, el voltaje generado por la bobina de encendido se conecta a un puntero que gira también sincronizado con el motor,



de manera que cada vez que la leva abre el contacto, uno de los terminales que conduce a una bujía está frente al puntero y recibe la corriente. Colocando adecuadamente los cables a las bujías correspondientes se consigue que con un solo circuito generador de alto voltaje se alimenten todas las bujías en el momento propicio.

Tratemos ahora de poner todo junto como un conjunto, para ello utilizaremos el esquema de la Figura 20 correspondiente al sistema de encendido típico por contacto, tal y como se usaba antes de la introducción de los dispositivos semiconductores.



**Figura 20.** Sistema de Encendido por Contacto

Observe que el cable procedente de la batería pasando por el interruptor de arranque alimenta el primario de la bobina de encendido. El circuito del primario se completa a tierra con el contacto dentro del dispositivo llamado como Conjunto distribuidor.

Note también como la leva y el rotor que distribuye la corriente de alto voltaje a las diferentes bujías, están montados en el eje que se conecta al motor.

Un elemento nuevo es el condensador, está conectado en paralelo con el elemento móvil del contacto, este condensador ayuda a reducir las chispas en el contacto y aumenta la potencia de la chispa.

El mecanismo centrífugo y el diafragma que sirven para acomodar el avance al encendido no están representados. El cable de alto voltaje que sale de la bobina de encendido entra al centro del rotor por medio de un contacto deslizante y este lo transmite a la bujía correspondiente al girar.

### **1.4.7.- REFRIGERACIÓN**

Dado que la combustión produce calor, todos los motores deben disponer de algún tipo de sistema de refrigeración. Algunos motores estacionarios de automóviles y de aviones, y los motores fueraborda, se refrigeran con aire. Los cilindros de los motores que utilizan este sistema cuentan en el exterior con un conjunto de láminas de metal que emiten el calor producido dentro del cilindro. En otros motores se utiliza refrigeración por agua, lo que implica que los cilindros se encuentran dentro de una carcasa llena de agua que en los automóviles se hace circular mediante una bomba. El agua se refrigera al pasar por las láminas de un radiador. Es importante que el líquido que se usa para enfriar el motor no sea agua común y corriente porque los motores de combustión trabajan regularmente a temperaturas más altas que la temperatura de ebullición del agua. Esto provoca una alta presión en el sistema de enfriamiento dando lugar a fallas en los empaques y sellos de agua, así como en el radiador; se usa un refrigerante, pues no hierve a la misma temperatura que el agua, sino a más alta temperatura, y que tampoco se congela a temperaturas muy bajas.

Otra razón por la cual se debe usar un refrigerante es que éste no produce sarro ni sedimentos que se adhieran a las paredes del motor y del radiador formando una capa aislante que disminuiría la capacidad de enfriamiento del sistema. En los motores navales se utiliza agua del mar para la refrigeración.

La refrigeración en motores de combustión interna es necesaria para eliminar el calor generado por la quema del combustible (superior a 2000°C), y no transformado en energía mecánica, durante el funcionamiento de éstos. La principal función de la refrigeración es mantener todos los componentes dentro del rango de temperaturas de diseño del motor evitando su destrucción por deformación y agrietamiento.

#### **Razones para refrigerar el motor**

Durante la combustión, parte de la energía generada no es convertida en energía mecánica y se disipa en forma de calor. Según el diseño del motor alrededor del 33% de la energía potencial del combustible se transforma en trabajo mecánico, y el resto se transforma en calor que es necesario disipar para evitar comprometer la integridad mecánica del motor.

El sistema no solo debe limitar la temperatura máxima del motor para evitar daños al mismo. También debe mantener la temperatura óptima de funcionamiento que, dependiendo del diseño del motor, se encuentra en el rango de 80 a 100°C. De su buen funcionamiento depende en buena medida el rendimiento térmico del motor.

Si el motor trabaja por encima de su temperatura óptima, se corre el riesgo de disminuir la viscosidad del aceite y aumentar el desgaste del motor, se produce un recalentamiento de las piezas y una mayor fricción entre estas. También puede producirse detonaciones al encenderse la mezcla combustible antes de tiempo.

Si el motor trabaja por debajo de su temperatura óptima, se aumenta el consumo de aceite y el desgaste de las piezas, ya que éstas están diseñadas para dilatarse por efecto del calor a un tamaño determinado, se reduce la potencia por falta de

temperatura para una combustión eficiente, se producen incrustaciones de carbón en válvulas, bujías y pistones.

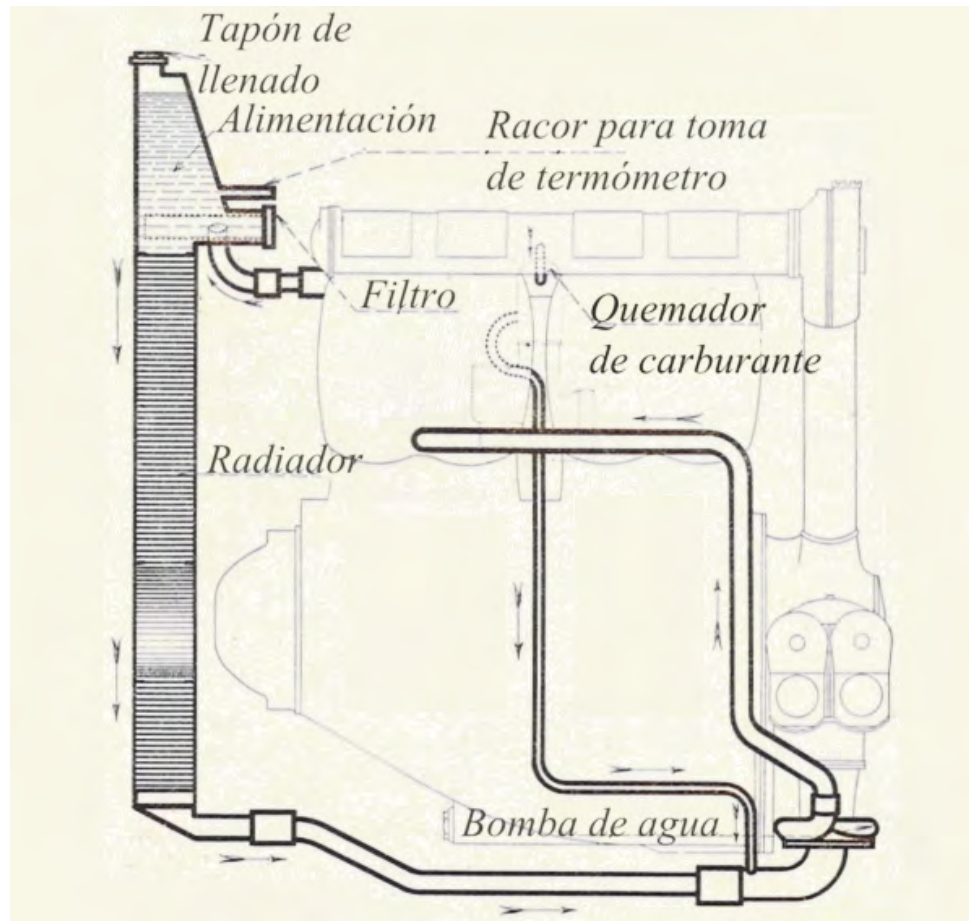


Figura 21. Esquema de la circulación del agua

## Sistemas de refrigeración:

### 1.- Por agua

#### Circulación por termosifón

Su funcionamiento está basado en la diferencia de densidad existente, entre el refrigerante caliente que está en el bloque y la culata, y el agua fría que se encuentra en el radiador. Para esto se requiere poca resistencia a la circulación del refrigerante. El depósito superior debe ser de gran capacidad para evitar que el nivel del líquido en caso de evaporación no descienda por debajo del nivel del orificio de llegada al radiador. Este sistema ya no se utiliza debido a las restricciones de capacidad térmica, posicionamiento y volumen.

#### Circulación forzada

Es el más empleado. La circulación del refrigerante, es impulsada a través de una bomba centrífuga, pasa por los cilindros del bloque motor, luego por la culata, y finalmente por el radiador, donde tiene lugar el enfriamiento. Al circular el

refrigerante por el panel del radiador, intercambia el calor con el aire de la marcha, o forzado por un ventilador. El agua refrigerada regresa al motor donde comienza nuevamente el ciclo. La bomba de agua es accionada generalmente mediante correas y poleas, que, en algunos casos, también hacen girar el ventilador. En los sistemas más modernos, el ventilador es movido por un motor eléctrico comandado por un termocontacto, y entra en funcionamiento sólo cuando la temperatura del agua lo requiere. El sistema consta de un depósito que sirve para almacenar el refrigerante y como eventual vaso de expansión. También es habitual encontrar un circuito paralelo utilizado para la calefacción del vehículo.

### **Ventajas e inconvenientes de la refrigeración por agua**

Las ventajas de la refrigeración por agua son: Excelente regulación de la temperatura, refrigeración homogénea, motor más silencioso, menor consumo de energía.

Las desventajas son: Mayor peso del motor y aumento en su complejidad. Mayor mantenimiento y mayor coste. Un fallo mínimo en el sistema (por ejemplo, una pequeña pérdida de agua) puede dejar el motor inutilizable. En caso de funcionar el motor con poca agua o sin agua y no ser advertido por el usuario, pueden producirse graves daños estructurales en pistones, camisas y culata.

### **Elementos constitutivos del sistema de refrigeración por agua:**

#### **Radiador**

Situado generalmente en la parte delantera del vehículo, de forma que reciba directamente el paso de aire a través de sus paneles y aletas refrigerantes durante el desplazamiento del mismo y donde se enfría el agua procedente del motor.

Este elemento está formado por dos depósitos, uno superior y otro inferior, unidos entre sí por una serie de tubos finos rodeados por numerosas aletas de refrigeración, o por una serie de paletas en forma de nidos de abeja que aumentan la superficie radiante de calor. Tanto los tubos y aletas como los paneles se fabrican en aleación ligera generalmente de latón, facilitando, con su mayor conductibilidad térmica, la rápida evacuación de calor a la atmósfera.

El depósito superior lleva una boca de entrada lateral que se comunica por medio de un manguito de goma con la salida de agua caliente de la culata o tapa de cilindros. En el depósito inferior va instalada la boca de salida del agua refrigerada, unida por otro manguito de goma a la entrada de la bomba.

#### **Diseños más utilizados:**

**Nido de abejas:** El agua circula por la parte externa, y el aire por el interior de los orificios. Alto costo de fabricación.

**De laminillas:** Muy poco utilizado debido a su fragilidad

**De tubos y aletas:** El agua circula por el interior de los tubos, estos se encuentran soldados en su periferia con láminas, siendo ambos barridos por la corriente de aire. Es el más utilizado actualmente.

La tapa del radiador o tapa presostática tiene como función el cierre del tanque superior, y al mismo tiempo limita la presión de trabajo del circuito mediante una válvula, con lo cual se logran circuitos presurizados, aumentando la temperatura de régimen sin que se produzca la ebullición del agua.

### **Bomba centrífuga**

Se halla instalada en el bloque del motor y es movida directamente por la polea del cigüeñal, a través de una transmisión por correa trapezoidal. Dicha bomba aspira el agua del radiador y la hace circular por el interior del bloque y la culata para refrigerar los cilindros y la cámara de combustión.

La bomba está formada por una carcasa de aleación ligera o de fundición (en los autos más antiguos), unida al bloque del motor con interposición de una junta de cartón amianto para hacer estanca la unión. En el interior de la misma se mueve una turbina de aletas unida al árbol de mando de la bomba, el cual se apoya sobre la carcasa por medio de uno o dos cojinetes de bolas, con un retén acoplado al árbol para evitar fugas de agua a través del mismo. En el otro extremo del árbol va montado un cubo al cual se une la polea de mando, y el ventilador.



**Figura 22.** Ventilador del sistema de refrigeración de un motor de combustión interna



## 2.- Por aire

En la refrigeración por aire el enfriamiento se obtiene mediante el barrido de los cilindros por la corriente de aire efectuada por el desplazamiento de la máquina (motos y aviones), o forzada mecánicamente. Este sistema es muy utilizado en motores de motocicletas, aviación de baja y alta potencia y turismos de escasa potencia, debido a su menor peso, mayor fiabilidad y/o bajo costo.

Las ventajas de este sistema son: casi nulo mantenimiento, seguridad al no tener casi partes móviles ni agua, rápido alcance del equilibrio térmico, menor peso, y menor costo.

Las desventajas son: motor ruidoso, regulación delicada, y absorción de energía por la turbina.



**Figura 23.** Motor de aviación Bristol Júpiter, enfriado por aire. Son claramente visibles las aletas de refrigeración de los cilindros, utilizadas para aumentar la superficie de disipación

## 3.- Por aceite

En algunos motores se ha empleado con éxito el propio aceite del motor como elemento refrigerante principal. En estos sistemas se aumenta la cantidad de aceite del cárter motor que se hace circular a través de un radiador de dimensión adecuada antes de pasar a lubricar y refrigerar el motor.

#### **1.4.8.- LUBRICACIÓN**

Consiste en hacer llegar una película de aceite lubricante a cada una de las superficies de las piezas que están en moviendo entre sí, para evitar, fundamentalmente, desgaste excesivos y prematuros, disminuyendo así la vida útil del motor de combustión interna.

##### **Consideraciones**

En la mayor parte de los motores solo se utiliza eficazmente del 23 al 35% de la energía generada por la combustión del combustible en los cilindros, el resto se disipa en pérdidas termodinámicas y mecánicas entre las que se encuentra la fricción, de tal modo que en el par anillo - émbolo se tiene casi la mitad de estas pérdidas. La disminución del peso del émbolo, el uso de mejores materiales en los anillos y los cilindros, permite reducir este valor en cerca del 25%.

##### **Causas del desgaste**

Una superficie lubricada se puede gastar por factores que pueden ser intrínsecos al tipo de lubricante utilizado, a su tiempo de servicio o debido a contaminantes externos. En algunos pocos casos se presenta como resultado de la selección incorrecta del equipo, de un mal diseño, o del empleo de materiales inadecuados para las condiciones de operación de los mecanismos. En las superficies lubricadas el proceso de desgaste es leve y genera partículas del orden de  $1\mu\text{m}$  a  $2\mu\text{m}$ . El desgaste es consecuencia directa del rozamiento metal-metal entre dos superficies y se define como el deterioro sufrido por ellas a causa de la intensidad de la interacción de sus rugosidades superficiales; este puede llegar a ser crítico, haciendo que las piezas de una máquina pierdan su tolerancia y queden inservibles, causando costosos daños y elevadas pérdidas de producción. La excesiva contaminación con carbón tupe los rociadores de enfriamiento del pistón por aceite aumentando bruscamente la temperatura de los pistones lo que se dilatan excesivamente y comienza un proceso acelerado del desgaste, inclusive puede trancar los pistones muy rápidamente al fallar el flujo de aceite.

En la práctica el desgaste adhesivo se puede presentar como consecuencia de un alto o bajo nivel de aceite, alta o baja viscosidad, y alta y baja presión. En el caso de un alto nivel de aceite, alta viscosidad y alta presión, el exceso de fricción fluida en el aceite incrementa la temperatura de operación, haciendo que las superficies metálicas se dilaten y rocen, rompiendo en un momento dado la película límite y dando lugar finalmente al desgaste adhesivo. La herrumbre en un motor de combustión interna resulta casi enteramente del agua y los ácidos provenientes de la cámara de combustión. En los motores Diesel la combustión de los compuestos de azufre produce ácido sulfúrico que ataca los anillos y las paredes del cilindro. De manera similar, el ataque de las partes ferrosas de un motor de gasolina se debe a los ácidos orgánicos y al ácido clorhídrico y bromhídrico, éstos últimos procedentes de los haluros orgánicos (dicloruro y dibromuro de etileno) usados junto con el compuesto antidetonante, con el fin de eliminar los residuos de plomo dejados al quemarse el combustible.

Se ha demostrado que mientras que las paredes del cilindro se mantengan por encima de 180°F, el desgaste corrosivo aumenta marcadamente, debido a la condensación de agua ácida. Por lo tanto, un motor se debe dejar funcionando en vacío durante el tiempo necesario, para que alcance la temperatura normal de operación, de lo contrario, en unos pocos minutos puede ocurrir un considerable desgaste corrosivo.

Los ácidos débiles se forman a medida que el aceite se degrada y éste es un fenómeno normal, mientras que los fuertes son ocasionados por una descomposición a altas temperaturas. Esta última situación es la que necesita el máximo control (en el caso de los aceites industriales) para evitar desgaste corrosivo. El desgaste corrosivo en un motor de combustión interna se puede controlar mediante aditivos alcalinos, tales como fenatos y sulfonatos básicos. Se ha encontrado que en un motor Diesel se puede inhibir la corrosión debido al ácido sulfúrico si el pH (acidez) del aceite se mantiene por encima de 4,5. En motores de gasolina que operan a baja temperatura (unos 900 °F), el desgaste de los anillos y el cilindro aumenta rápidamente si el pH del aceite baja de 6.

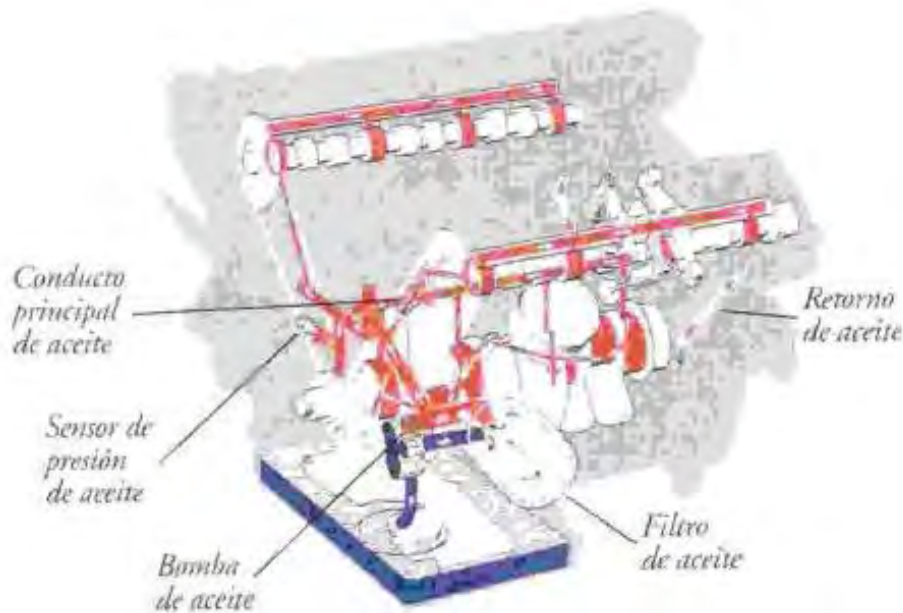
### **Componentes y funcionamiento del sistema de lubricación**

- **Cárter:** El cárter o charola de aceite cumple la función de almacenar la cantidad de aceite determinada por el fabricante para la adecuada lubricación del motor de tu auto. Esta cantidad de aceite varía en función del diseño y tamaño del motor, puede que dos motores con un diseño similar pero de marcas diferentes requieran de un volumen de aceite similar pero no idéntico.
- **Bomba de aceite:** La bomba de aceite es el corazón del motor. Este elemento tiene la función de impulsar el lubricante desde la parte más baja hasta la más alta del motor a un flujo o velocidad constante, para que todas aquellas piezas críticas en la operación del motor cuenten con la protección adecuada y alcancen la vida o tiempo de servicio propuesto por el fabricante del auto. La bomba no genera presión de aceite, solamente flujo.
- **Filtro de aceite:** El filtro de aceite tiene la finalidad de separar sustancias e impurezas asociadas con el trabajo del aceite, permitiendo que los elementos rodantes del motor cuenten con el aceite suficiente y limpio para realizar su trabajo de manera normal. La separación de estas impurezas es vital, ya que el aceite debe presentar una movilidad propia para conducir su trabajo de lubricación; cualquier pieza que no cuente con la lubricación suficiente estará sujeta a manifestar un fallo, el cual seguramente se asociará de manera equívoca con la calidad o tipo de aceite utilizado.
- **Venas de lubricación:** Las venas de lubricación del motor son un sistema complejo de distribución de aceite el cual se compone por una red de conductos, tubos, ranuras y agujeros por donde se mueve el aceite internamente hasta alcanzar cada uno de los componentes del motor. El paso de aceite a través de estos conductos provoca una presión hidrodinámica la



cual aumenta o disminuye según los diámetros de paso entre cada línea y se ve afectada por las impurezas que logren obstaculizar su paso a través de ellas.

- **Válvula de alivio de presión:** La válvula de alivio de presión en el sistema de distribución es otro elemento vital para la correcta operación del motor. Este mecanismo tiene por objeto desviar el flujo de aceite cuando se presión no es la adecuada, evitando así una lubricación deficiente en todas las piezas que dependen del aceite. La operación de un motor sin un control apropiado de presión de aceite favorece a situaciones reportadas como fugas de aceite o entallamiento de líneas.
- **Luz indicadora:** La modernidad de los autos permite que estos cuenten en el tablero con algún tipo de señal, referenciada normalmente como una luz, que le permita al operador detectar el momento en que tu auto esté operando con aceite o presión de aceite insuficiente. Estas luces pueden estar asociadas con señales auditivas para percatarnos de una situación anormal y tomar medidas preventivas para no poner en riesgo la vida y/o funcionalidad del motor.



**Figura 24.** Sistema de Lubricación

### **Características de un buen lubricante**

Cuando requiere comprar aceite para su motor, usted debe escoger un lubricante que le brinde la máxima protección posible, entre las características que debe cumplir un buen lubricante resaltan las siguientes:

- a. Baja viscosidad
- b. Viscosidad invariable con la temperatura

- c. Estabilidad química
- d. Acción detergente para mantener limpio el motor
- e. Carencia de volatilidad
- f. No ser inflamable
- g. Tener características anticorrosivas
- h. Tener características antioxidantes
- i. Soportar altas presiones
- j. Impedir la formación de espuma
- k. Tener gran resistencia pelicular

A continuación se describe cada una de ellas.

#### **a) Baja viscosidad**

Algunas personas piensan que es mejor un aceite “grueso”, es decir, muy viscoso, sin embargo el aceite debe llegar a todas aquellas partes que requieren lubricación en el menor tiempo posible y esto sólo se logra si el aceite tiene una baja viscosidad (“delgado”) de hecho a un motor con un aceite muy viscoso le costará mayor trabajo arrancar. Pero también hay que tener cuidado de que el aceite no tenga baja viscosidad ya que podría entrar al interior de la cámara de combustión y quemarse generando el “humo azul”. Para conocer el grado de viscosidad adecuado para su automóvil debe consultar el manual del propietario. Un aceite clasificación 10W30 puede ser útil para vehículos con menos de 80,000 km y un 10W40 para motores con mayor kilometraje. Recuerde que la viscosidad es la resistencia que opone el aceite a moverse.

#### **b) Viscosidad invariable con la temperatura**

En todos los aceites la viscosidad cambia con la temperatura, sin embargo no todos cambian de la misma manera, generalmente los aceites monogrados son aquellos en los que estos cambios son más importantes. En los aceites de tipo multigrado los cambios no son tan drásticos.

#### **c) Estabilidad química**

El aceite lubricante se encuentra en constante movimiento, arrastra las partículas formadas por el desgaste propio de las partes, se contamina con: partículas de polvo, agua, combustible y gases producto de la combustión. Es por esta razón que debe tener una gran estabilidad química, de lo contrario se degradaría y formaría compuestos agresivos para el motor como “lodos de alta y baja temperatura”.

#### **d) Acción detergente**

Esta característica permite que el motor siempre se encuentre limpio evitando la formación de lodos, una forma de determinar si el aceite utilizado es de tipo detergente es que al usarlo después de un cierto tiempo éste cambia de color.

#### **e) Carencia de volatilidad**

Esta característica es importante porque evita que se pierda lubricante cuando se incrementa la temperatura del motor.

**f) No ser inflamable**

Esta característica ayuda a evitar un incendio debido a que el aceite está en contacto con zonas de alta temperatura como el pistón.

**g), h) Tener características anticorrosivas y antioxidantes**

- Ayuda a evitar el ataque por corrosión y oxidación de los materiales de los diferentes componentes del motor.
- Tener gran resistencia pelicular.
- Ayuda a evitar el desgaste y pérdida de material de las piezas del metal.

**a) Soportar altas presiones**

Ayuda a evitar el contacto entre metal y metal.

**b) Impedir la formación de espuma**

La espuma genera la disminución de la cantidad de lubricante inyectado a las diferentes áreas que requieren la lubricación y puede provocar daño a componentes como la bomba de aceite.

Para lograr estas características generalmente los fabricantes de aceites de buena calidad adicionan aditivos a los aceites base.

## **CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES**

Los aceites lubricantes se clasifican de acuerdo a la SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices) o al API (Instituto Americano del Petróleo) de la siguiente forma:

### **Clasificación SAE**

La Sociedad de Ingenieros Automotrices SAE clasifica a los aceites de acuerdo a la viscosidad del lubricante y los divide en:

Monogrados (a estos se les asigna un número el cual es indicativo de su viscosidad) y multigrados (se les asigna dos números y entre ellos se coloca la letra W de winter que significa invierno en inglés).

Los aceites monogrados tienen la característica de que su viscosidad cambia de manera importante con la temperatura, cuando ésta baja, su viscosidad se incrementa y cuando aumenta su viscosidad disminuye.

Entre los aceites monogrados se tienen:

- SAE40 Usado en motores de trabajo pesado y en tiempo de mucho calor (verano)
- SAE30 Sirve para motores de automóviles en climas cálidos.
- SAE20 Empleado en climas templados o en lugares con temperaturas inferiores a 0°C, antiguamente se utilizaba para asentamiento en motores nuevos. Actualmente esto no se recomienda.
- SAE10 Empleado en climas con temperaturas menores de 0°C.

Desde 1964 se utilizan aceites multigrados en los motores. Estos aceites tienen la característica de que su viscosidad también cambia con la temperatura pero lo hacen de una manera menos drástica que los aceites monogrados.

Para los aceites multigrados se tienen algunas de las siguientes clasificaciones: SAE5W30, 10W40, 10W50, etc.

### **Clasificación API para servicio de los aceites**

El Instituto Americano del Petróleo clasifica a los aceites de acuerdo al tipo de motor en el cual será utilizado, los divide en aceites para motores a gasolina o para diesel y les asigna dos letras: la primera indica el tipo de motor; si es de gasolina, esta letra es una "S" del inglés spark (chispa) si la letra es una "C" (del inglés compression) el aceite es para un motor a diesel. La segunda letra que forma la pareja indica la calidad del aceite.

### **Aceites para motores a gasolina**

- SA Típico para motores en condiciones ideales en donde son adecuados los aceites minerales simples (obsoleto).
- SB Para motores cuyo funcionamiento se asemeja al anterior, para motores que necesitan un aceite que les brinde protección contra ralladuras, resistencia a la oxidación y a la corrosión (obsoleto).
- SC Para vehículos de 1964 a 1967, incluye aditivos detergentes y dispersantes a la vez ofrecen protección contra el desgaste, la herrumbre y la corrosión.
- SD Para motores a partir de 1968 ofrecen mayor protección contra el desgaste, la herrumbre y la corrosión.
- SE Para motores modelo 1972 y posteriores, ofrecen mayor protección contra corrosión, los depósitos por alta temperatura (lodos) y la oxidación del aceite.
- SF Para motores a partir de 1980, efectúa protección contra oxidación del aceite, formación de depósitos, herrumbe y corrosión.
- SG Adecuado para motores modelo 1989, se recomienda usar en motores recién reparados.
- SH Adecuado para motores modelo 1993 de inyección electrónica de combustible, turbocargados o supercargados.
- SJ Adecuado para motores modelo 1996 turbocargados, supercargados o de inyección electrónica, especialmente preparado para reducir el desgaste durante el arranque y reducir el consumo de combustible.

### **1.4.9.- SISTEMA DE ARRANQUE**

El motor de combustión interna no tiene arranque propio, hay que hacerlo girar con una fuente externa para que se completen los procesos necesarios y se produzca el encendido. Existen varias formas de hacer girar el motor para que arranque:

- Arranque manual.
- Arranque por motor de aire comprimido.
- Arranque por motor de combustión auxiliar.
- Arranque por motor eléctrico.

El arranque manual se usa para los pequeños motores donde con un aceptable esfuerzo corporal se hace girar el motor para el arranque y puede ser:

- Accionando una palanca con los pies (motocicletas y similares).
- Tirando de una cuerda arrollada en una polea en el cigüeñal.
- Girando un eje acodado acoplado al cigüeñal.
- Empujando el vehículo hasta el arranque.

El arranque por aire comprimido se usa para algunos grandes motores en los que la potencia necesaria hace difícil el uso del arranque eléctrico, debido a las altísimas corrientes necesarias, y en algunos vehículos especiales adaptados para funcionar a muy bajas temperaturas donde las baterías de acumuladores no pueden utilizarse. También en estos grandes motores el proceso de arranque es más complejo y por lo general, deben hacerse girar hasta que se lubriquen las partes internas antes de someterlos al funcionamiento por ellos mismos.

El arranque por motor de combustión auxiliar se usa en algunas máquinas de la construcción que usan motores Diesel. Estas máquinas pueden prescindir de las baterías de acumuladores y así ser más adaptables a condiciones climáticas de fríos severos. Usan un pequeño motor de gasolina que se arranca por el método manual o con motor eléctrico, este a su vez acciona el motor principal a través de un acoplamiento de engranajes desplazables. Estos pequeños motores pueden hacer girar por largo tiempo al motor principal para permitir la lubricación antes de la puesta en marcha.

En los automóviles se usa casi universalmente el arranque por motor eléctrico, por lo que será este método el que será tratado.

#### **Arranque por motor eléctrico**

Para el arranque de los motores de automóvil se usa un motor eléctrico de corriente continua que se alimenta desde la batería de acumuladores a través de un relé. Este relé a su vez se acciona desde el interruptor de encendido del automóvil. En la Figura 25 podemos observar el sistema de arranque.

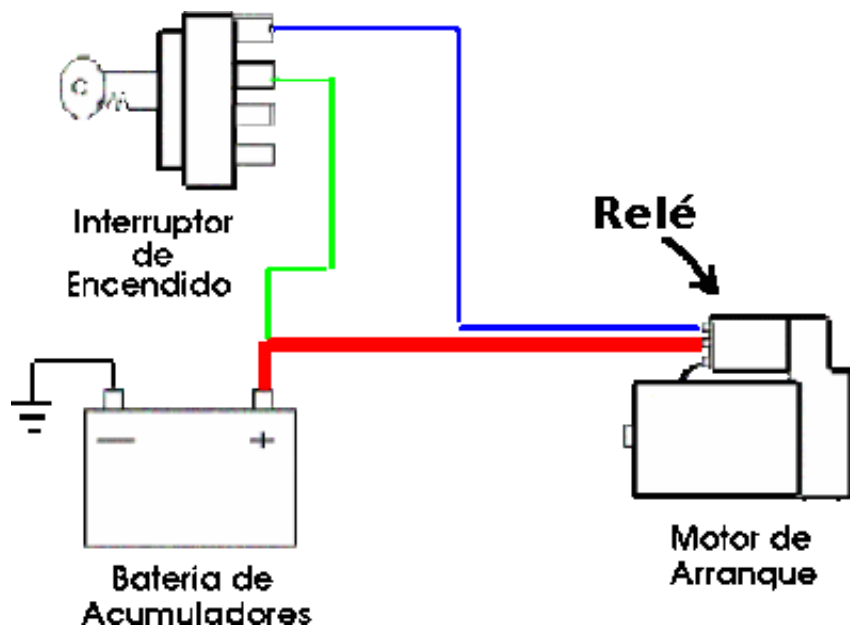


Figura 25. Sistema de Arranque

Cuando se acciona el interruptor de arranque se alimenta con electricidad proveniente de la batería a la bobina del relé, y este a su vez cierra dos grandes contactos en su interior alimentando el motor de arranque directamente desde la batería a través de un grueso conductor (representado con color rojo).

### El motor eléctrico

El motor de arranque es un motor de corriente directa tipo shunt especialmente diseñado para tener una gran fuerza de torque con un tamaño reducido, capaz de hacer girar el motor de combustión interna. Esta capacidad se logra a expensas de sobrecargar eléctricamente las partes constituyentes ya que el tiempo de funcionamiento es muy breve, por tal motivo no debe mantenerse en acción por largo tiempo, so pena de terminar averiado por sobrecalentamiento. El consumo de electricidad durante el arranque es elevado (hasta 1000 Amp para grandes motores de combustión), de manera tal que también la batería funciona en un régimen muy severo durante este proceso. Debido a estas razones es muy recomendable, cuando se intenta arrancar un motor "perezoso" usar varios intentos de corta duración (unos 10 segundos), en lugar de un solo intento de larga duración.

En la Figura 26 se puede diferenciar el relé así como los grandes tornillos de conexión para los cables procedentes de la batería.



**Figura 26.** Motor de Arranque

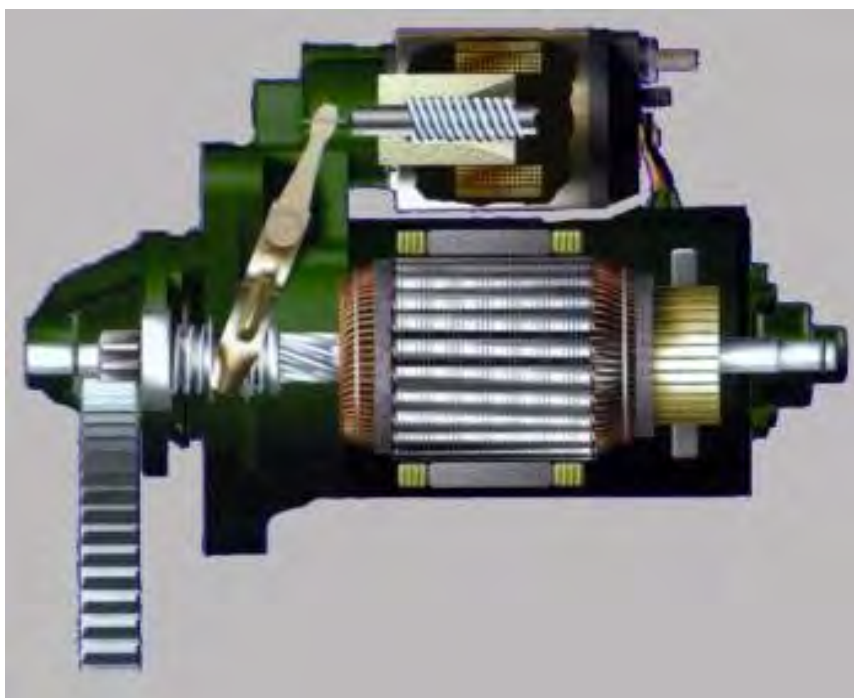
### **El mecanismo de accionamiento**

La transmisión de la rotación desde el motor de arranque al motor de combustión se realiza a través de engranajes. Un pequeño engrane deslizante está acoplado al eje del motor de arranque, este engrane es desplazado sobre estrías por el relé a través de una horquilla pivotante, de manera que se acopla a un engrane mayor que rodea el volante del cigüeñal del motor haciéndolo girar.

Este engrane funciona a través de un mecanismo de rueda libre (como el de las bicicletas) de manera que el torque del motor de arranque se trasmita al engrane del cigüeñal, pero una vez que el motor de combustión se ponga en marcha, no pueda arrastrar al motor de arranque. Sin este mecanismo de rueda libre, debido a la gran velocidad del motor de combustión y a la elevada relación de transmisión entre el par engranado, la velocidad de rotación del rotor del motor eléctrico llegaría a velocidades peligrosas para su integridad, especialmente en conductores demorados en soltar la llave de encendido.

En la Figura 27 podemos observar un motor de arranque seccionado.

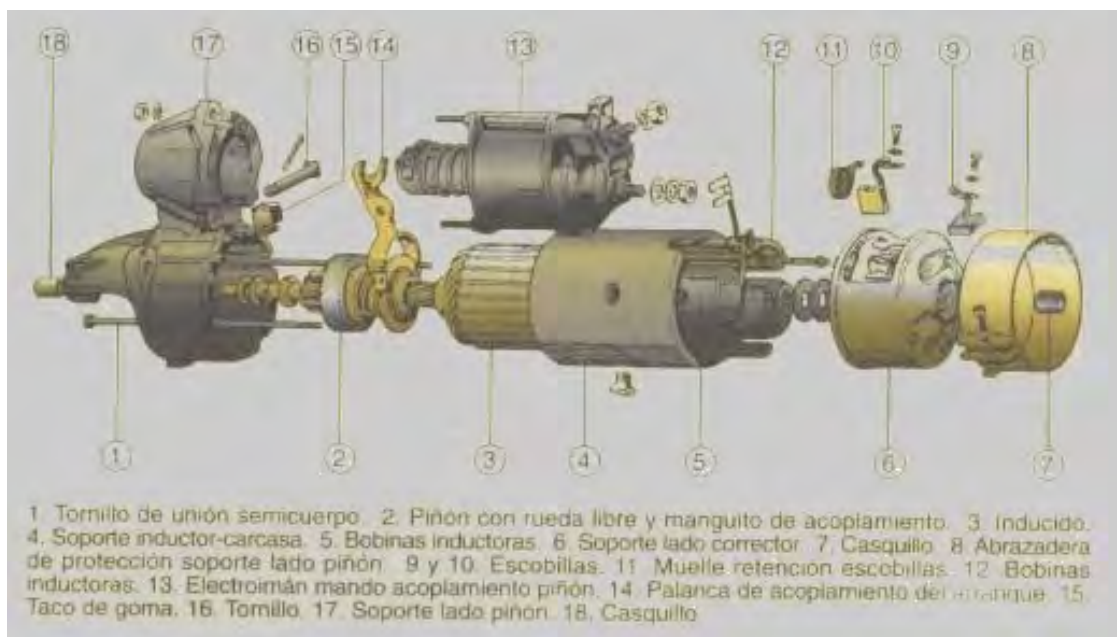




**Figura 27.** Motor de Arranque seccionado

Una vez que el motor de combustión se ha puesto en marcha y el conductor suelta la llave de encendido, se corta la alimentación eléctrica a la bobina del relé y el muelle de recuperación retira el núcleo cortando la alimentación con electricidad y desacoplando ambos engranes.

En la Figura 28 se muestra un típico motor de arranque despiezado donde pueden observarse sus partes constituyentes.



**Figura 28.** Despiece de un motor de arranque

## 1.5.- FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA (CICLO OTTO)

Se denomina motor de cuatro tiempos al motor de combustión interna tanto de ciclo Otto como ciclo del diesel, que precisa cuatro, o en ocasiones cinco, carreras del pistón o émbolo (dos vueltas completas del cigüeñal) para completar el ciclo termodinámico de combustión. Estos cuatro tiempos son:

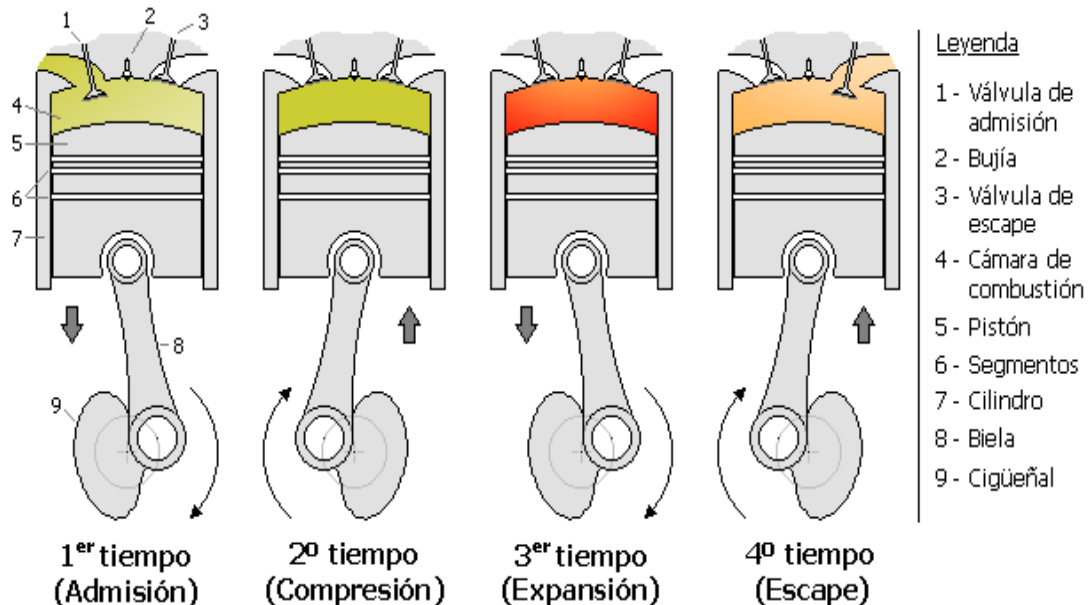


Figura 29. Cuatro tiempos de un motor de combustión interna

### Tiempos del ciclo:

Aquí se detallan los diferentes tiempos (actividades realizadas durante el ciclo) y sus características.

1. Primer tiempo o admisión: en esta fase el descenso del pistón aspira la mezcla aire combustible en los motores de encendido provocado o el aire en motores de encendido por compresión. La válvula de escape permanece cerrada, mientras que la de admisión está abierta. En el primer tiempo el cigüeñal gira  $180^\circ$  y el árbol de levas da  $90^\circ$  y la válvula de admisión se encuentra abierta y su carrera es descendente.
2. Segundo tiempo o compresión: al llegar al final de la carrera inferior, la válvula de admisión se cierra, comprimiéndose el gas contenido en la cámara por el ascenso del pistón. En el 2º tiempo el cigüeñal da  $360^\circ$  y el árbol de levas da  $180^\circ$ , y además ambas válvulas se encuentran cerradas y su carrera es ascendente.
3. Tercer tiempo o explosión/expansión: al llegar al final de la carrera superior el gas ha alcanzado la presión máxima. En los motores de encendido provocado o de ciclo Otto salta la chispa en la bujía, provocando la inflamación de la

mezcla, mientras que en los motores diesel, se inyecta a través del inyector el combustible muy pulverizado, que se autoinflama por la presión y temperatura existentes en el interior del cilindro. En ambos casos, una vez iniciada la combustión, esta progresa rápidamente incrementando la temperatura y la presión en el interior del cilindro y expandiendo los gases que empujan el pistón. Esta es la única fase en la que se obtiene trabajo. En este tiempo el cigüeñal gira  $180^\circ$  mientras que el árbol de levas gira  $90^\circ$  respectivamente, ambas válvulas se encuentran cerradas y su carrera es descendente.

4. Cuarto tiempo o escape: en esta fase el pistón empuja, en su movimiento ascendente, los gases de la combustión que salen a través de la válvula de escape que permanece abierta. Al llegar al punto máximo de carrera superior, se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión, reiniciándose el ciclo. En este tiempo el cigüeñal gira  $180^\circ$  y el árbol de levas gira  $90^\circ$ .

### Ciclo Otto teórico

El Ciclo Otto teórico es el ciclo ideal del motor de encendido por chispa, y está representado gráficamente en la Figura 30, tanto en coordenadas P-V como en coordenadas T-S.

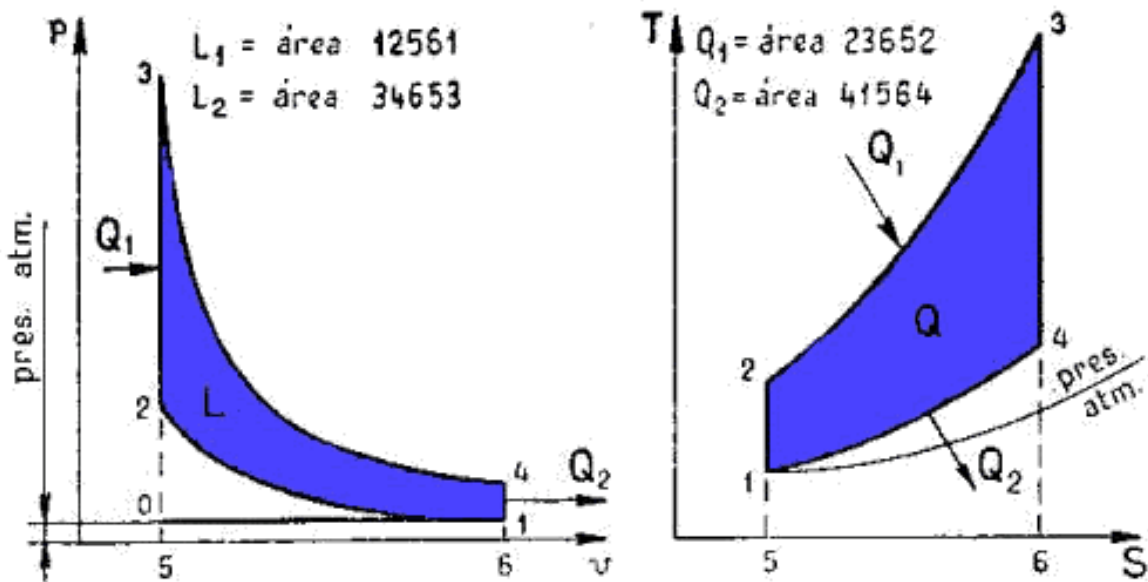


Figura 30. Representación del Ciclo Otto

Las transformaciones termodinámicas que se verifican durante el ciclo son:

**1-2 Adiabática isentropica (sin intercambio de calor con el exterior):**

Compresión del fluido activo y correspondiente al trabajo  $L_1$  realizado por el pistón.

**2-3 A volumen constante:**

Introducción instantánea del calor suministrado  $Q_1$ .

**3-4 Adiabática:**

Expansión y correspondiente trabajo  $L_2$  producido por el fluido activo.

**4-1 A volumen constante:**

Sustracción instantánea del calor  $Q_2$ .

En realidad, en los motores de 4 tiempos, la sustracción del calor se verifica durante la carrera de escape 1-0, y el fluido se introduce en el motor en la carrera de aspiración 0-1, lo cual se representa gráficamente en el diagrama P-V mediante una línea horizontal, mientras que en el diagrama T-S no es posible representarlo. Los efectos de ambos procesos se anulan mutuamente, sin ganancia ni pérdida de trabajo, razón por la cual no suelen considerarse en los diagramas ideales en coordenadas P-V las carreras de aspiración y escape, y el ciclo Otto está representado como un ciclo cerrado, en el cual el fluido activo vuelve a su estado inicial cuando llega a su término la fase de expulsión del calor 4-1.

### 1.5.1.- EFICIENCIA

La eficiencia de los motores Otto modernos se ve limitada por varios factores, entre otros, la pérdida de energía por la fricción y la refrigeración.

En general, la eficiencia de un motor de este tipo depende de la relación de compresión, la proporción entre los volúmenes máximo y mínimo de la cámara de combustión. Esta proporción suele ser de 8 a 1 o 10 a 1 en la mayoría de los motores Otto modernos. Se pueden utilizar proporciones mayores, como de 12 a 1, aumentando así la eficiencia del motor, pero este diseño requiere la utilización de combustibles de alto índice de octano. La eficiencia media de un buen motor Otto es de un 20 a un 25%: sólo la cuarta parte de la energía calorífica se transforma en energía mecánica.

El motor convencional del tipo Otto es de cuatro tiempos. La eficiencia de los motores Otto modernos se ve limitada por varios factores, entre otros la pérdida de energía por la fricción y la refrigeración.

En general, la eficiencia de un motor de este tipo depende del grado de compresión. Esta proporción suele ser de 8 a 1 o 10 a 1 en la mayoría de los motores Otto modernos. Se pueden utilizar proporciones mayores, como de 12 a 1, aumentando así la eficiencia del motor, pero este diseño requiere la utilización de combustibles de alto índice de octano. La eficiencia media de un buen motor Otto es de un 20 a un 25%: sólo la cuarta parte de la energía calorífica se transforma en energía mecánica.

## 1.5.2.- RENDIMIENTO

Como todos sabemos, un motor de combustión interna es una máquina que transforma energía mediante el siguiente proceso:

**Energía química ----- Energía térmica ----- Energía mecánica**  
**Combustible ----- Combustión ----- Desplazamiento del pistón**

La energía contenida en el combustible se transforma en calor mediante la combustión. De este modo, al aumentar la temperatura de los gases, hacemos que aumente la presión dentro del cilindro (los gases aumentan de volumen al subir de temperatura y viceversa); lo que hace que mueva el pistón, obteniéndose energía mecánica.

La ecuación para calcular el balance de rendimiento (al que llamamos  $\eta$ ) es ésta:

$\eta = \text{Energía obtenida} / \text{Energía aportada} (100 (\%))$ .

El rendimiento del motor será mayor cuanto menos sean las pérdidas durante la transformación.

### **Pérdidas de energía:**

- Pérdidas de calor: Producidas por el sistema de refrigeración, la radiación de calor al exterior y los gases de escape.
- Pérdidas mecánicas: Rozamiento de piezas en movimiento y accionamiento de dispositivos auxiliares (bomba de agua, bomba de aceite, etc.).
- Pérdidas químicas: Motivadas por una combustión incompleta (mala carburación, mal reglaje de válvulas, etc.).

### **Tipos de rendimiento:**

- **Rendimiento térmico:** El rendimiento térmico será mayor cuanto más alta sea la temperatura alcanzada y menores sean las pérdidas de calor.

Las pérdidas de calor a través de los gases de escape suponen el 35% en los motores Otto y el 30% en los motores Diesel:

Por el sistema de refrigeración se evacua aproximadamente el 30% del calor en ambos motores.

Del 100% de la energía calorífica que posee el combustible, los motores de combustión interna sólo son capaces de transformar entre el 35% y el 50%.

- Rendimiento de motores Otto: de 35% a 40%.
- Rendimiento de motores Diesel: de 40% a 50%.

- **Rendimiento mecánico:** Se podría expresar como la relación que existe entre la potencia efectiva que se obtiene en el eje del motor y la potencia indicada que se obtiene en el diagrama de trabajo, el cual expresa el trabajo interno obtenido dentro del cilindro y en el que no intervienen las pérdidas

mecánicas. El conjunto de pérdidas mecánicas supone entre un 10% y un 15%.

- **Rendimiento efectivo:** Balance final de pérdidas:

Motores Otto:

- Pérdidas térmicas: 60% - 65%
- Pérdidas mecánicas: 10% - 15%
- Total pérdidas: 70% - 75%
- Rendimiento efectivo: 25% - 30%

Motores Diesel

- Pérdidas térmicas: 50% - 60%
- Pérdidas mecánicas: 10% - 15%
- Total pérdidas: 60% - 70%
- Rendimiento efectivo: 30% - 40%

- **Rendimiento volumétrico:** Se puede definir como la eficacia con que se logra llenar el cilindro. Se expresa como la relación entre la masa de gas que es introducida en el cilindro y la masa que teóricamente cabe en el cilindro.

El llenado de los cilindros influye directamente sobre el par y, por tanto, sobre la potencia desarrollada por el motor, ya que cuanto mejor sea llenado, más energía se obtiene de la combustión.

La presión interna del cilindro al final de la carrera de compresión es siempre inferior a la atmosférica y está entre 0.8 y 0.9 bares. El rendimiento volumétrico máximo está entre el 70% y el 90% y depende de varios factores:

- Régimen de giro
- Las condiciones ambientales exteriores, que determinan la densidad del aire.
- El diagrama de distribución
- La sección de las válvulas y los conductos de admisión
- La eficacia de barrido de los gases quemados

## 1.6.- EL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA Y SU IMPACTO AMBIENTAL

La energía mecánica, indispensable para poner en acción diferentes máquinas se puede obtener utilizando energía térmica, hidráulica, solar y eólica. La que más se utiliza es la energía térmica obtenida de los combustibles de naturaleza orgánica. Los equipos energéticos que más aceptación han tenido son los motores de combustión interna (MCI), a ellos corresponde más de un 80 % de la totalidad de la energía producida en el mundo.

En la Unión Europea aunque los medios de locomoción son responsables únicamente de un 5 % de las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), son

responsables del 25 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), del 87 % de las de monóxido de carbono (CO) y del 66 % de las de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

El impacto ambiental del MCI está estrechamente relacionado con un problema social surgido por la utilización creciente del mismo: la reducción de los niveles de emisión de sustancias tóxicas y de los llamados "gases de invernadero", y la reducción de los niveles de ruido.

Las discusiones internacionales acerca de las causas e implicaciones para la humanidad del llamado "efecto invernadero", provocado por las crecientes emisiones a la atmósfera de gases tales como: CO<sub>2</sub>, metano, óxido nitroso y los cloro-fluorocarbonatos, reflejan la necesidad de un enfoque integral en el tratamiento de los problemas ambientales y del desarrollo, así como la necesidad de una acción concertada de la comunidad internacional para mitigar los efectos del calentamiento global.

En el presente trabajo se analizan los factores que influyen sobre los niveles de toxicidad y ruido de los MCI más usados en la agricultura y se ofrecen algunas medidas que pueden tomarse para disminuir los mismos.

Formas de acción del motor de combustión interna sobre el medio ambiente.

Las formas más importantes de acción del motor sobre el medio ambiente son:

1. Agotamiento de materias primas no renovables consumidas durante el funcionamiento de los MCI.
2. Consumo de oxígeno que contiene el aire atmosférico.
3. Emisión y contaminación de la atmósfera con gases tóxicos que perjudican al hombre, la flora y la fauna.
4. Emisión de sustancias que provocan el llamado efecto invernadero contribuyendo a la elevación de la temperatura de nuestro planeta.
5. Consumo de agua potable.
6. Emisión de altos niveles de ruido a la atmósfera que disminuye el rendimiento de los trabajadores y ocasiona molestias en sentido general.

### **Toxicidad de los gases de escape de los motores de combustión interna y formas para reducirla.**

Se llaman sustancias tóxicas a las que ejercen influencia nociva sobre el organismo humano y el medio ambiente. Durante el trabajo de los MCI de émbolo se desprenden las siguientes sustancias tóxicas principales: óxidos de nitrógeno, hollín, monóxido de carbono, hidrocarburos, aldehídos, sustancias cancerígenas (bencipireno), compuestos de azufre y plomo. Además de los gases de escape de los MCI, otras fuentes de toxicidad son también los gases del cárter y la evaporación del combustible a la atmósfera. Incluso en un motor bien regulado la cantidad de componentes tóxicos que se expulsan durante su funcionamiento puede alcanzar los valores mostrados en la Tabla 1.



Componentes tóxicos	Motores Diesel	Motores de carburador
Monóxido de carbono, %	0.2	6
Óxidos de nitrógeno. %	0.35	0.45
Hidrocarburos, %	0.04	0.4
Dióxido de azufre, %	0.04	0.007
Hollín/ mg/l	0.3	0.05

**Tabla 1.** Compuestos emitidos al medio ambiente durante la combustión

De este modo, la toxicidad de los motores Diesel depende en lo principal del contenido de los óxidos de nitrógeno y el hollín. La toxicidad de los motores de encendido por chispa y carburador depende en gran medida de la concentración del monóxido de carbono y de los óxidos de nitrógeno.

¿Contaminan o no contaminan los motores diesel?

Convertidos en la "bestia negra de los ecologistas" (muchos de ellos con más entusiasmo que preparación técnica), los motores Diesel tienen mucha menos responsabilidad en la contaminación ambiental de la que se les imputa normalmente lo que se puede observar al remitirnos a la tabla ofrecida anteriormente; aunque su contaminación se ve más por la típica emisión de humo negro formado por partículas microscópicas que no son tóxicas pero si molestas. Además, estudios realizados demuestran que los niveles de emisión de dióxido de carbono en motor Diesel son claramente más bajos que un motor de gasolina de igual potencia.

Los motores de combustión interna tienen gran responsabilidad en los niveles de emisión de sustancias que provocan el "efecto invernadero", fundamentalmente del dióxido de carbono y los óxidos nitrosos.

De acuerdo con estimaciones del Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos; de mantenerse las actuales tendencias en las emisiones de "gases del efecto invernadero", la temperatura media global aumentaría a un ritmo de 0.3 °C por década. Consecuentemente, se producirán incrementos en el nivel del mar que pudiera ser entre 20 y 50 cm. para el año 2005 y de alrededor de 1 m. para el año 2100.

Los métodos de reducción de la toxicidad y el humeado de los MCI pueden ser divididos en dos grupos: los constructivos y los explotativos. Entre los métodos constructivos podemos citar: la recirculación de los gases de escape y la neutralización de los mismos. Dentro los métodos explotativos se encuentran: el estado técnico del MCI y su correcta regulación, perfeccionamiento de los procesos de formación de la mezcla y de combustión, la correcta selección de los combustibles y sus aditivos, y la utilización de los biocombustibles.

Para la neutralización de los gases de escape desde hace años se habla de catalizadores de tres vías, de catalizadores de oxidación, de sondas Lambda o de válvulas ERG (exhaust gas recirculation).

El sensor que proporciona al sistema la capacidad de mantener la estequiometría es el sensor o sonda "Lambda". Se coloca atornillada en el colector de escape, suministra a la computadora información sobre el contenido de oxígeno de los gases residuales que se escapan de los cilindros. Esencialmente es una pila seca, ya que produce voltaje del potencial eléctrico entre dos sustancias, en este caso, el aire ambiental y el escape; cuanto más oxígeno hay en el escape (lo cual corresponde a una condición de mezcla pobre) menor será el potencial y el voltaje producido, pero cuando hay menos oxígeno (como en una mezcla rica) mayor será el potencial y el voltaje creado.

El índice de aire y combustible "estequiométrico" (o sea, una relación aire a combustible por peso de 14.6:1) en los motores de encendido por chispa asegura que todo el combustible que entra en la cámara de combustión tenga la cantidad adecuada de oxígeno para combinarse logrando un quemado completo, reduciendo de esta manera las emisiones de HC (hidrocarburos) y de CO (monóxido de carbono). El convertidor catalítico de oxidación de doble vía puede limpiar una gran cantidad de HC y CO después de dejar los cilindros; un contaminante más difícil de eliminar son los NOx (óxidos de nitrógeno, un ingrediente del smog fotoquímico). Si bien la EGR realiza una tarea razonablemente buena en mantener baja la formación de NOx reduciendo las temperaturas máximas de combustión, no puede hacer lo suficiente para satisfacer los requisitos de algunos países. El convertidor catalítico de tres vías tiene una sección de oxidación que utiliza platino y paladio, más una sección de reducción que utiliza rodio para reducir los NOx a nitrógeno y oxígeno inocuos, sin embargo esta reacción de reducción sólo se puede mantener si hay una relación estequiométrica de aire y combustible.

El catalizador de tres vías se instala en la mayoría de los coches modernos acompañado de la sonda Lambda, mientras que en los motores Diesel para tractores y autos pesados el más empleado es el catalizador de oxidación.

Los biocombustibles son uno de los combustibles alternativos que disfrutan de unas ventajas más claras y que se obtienen a partir de productos agrícolas, no contienen azufre y por lo tanto no forman el anhídrido sulfuroso, uno de los principales causantes de la lluvia ácida, ni incrementan la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida a la atmósfera. Los análisis realizados, tanto en bancos de pruebas como en experiencias piloto, dejan bien claro que la utilización de los biocombustibles ofrece ventajas medioambientales en comparación con los combustibles convencionales como el gasoil.

En la siguiente gráfica mostramos una comparación entre los niveles de emisión de un motor que funciona con gasoil y otro que trabaje con éster metílico de colza como biocombustible. En cuanto a los gases de invernadero la cadena gasoil emite cinco veces más cantidad de ellos que la cadena del éster metílico del aceite de colza, solo para el CO<sub>2</sub> la cadena gasoil emite 7,6 veces más.

Para ilustrar la importancia que se le otorga en la actualidad a la reducción de la toxicidad de los gases de escape mostramos un paralelo entre la legislación de

emisión de humos en Europa y el estado alcanzado por la firma alemana Fendt, en la Tabla 2.

<b>Emisiones de gases en g/(kW h)</b>	<b>D CEE 15-4-82</b>	<b>DCE 88/77 1-10-97</b>	<b>Fendt modelos de 1990 de serie</b>
CO	14	11.2	1.5
Hidrocarburos	3.5	2.4	1.15
Óxidos de N2	18	14.4	13.8

**Tabla 2.** Emisión de Humos

Es muy común ver en nuestras carreteras como circulan vehículos con MCI diesel arrojando una gran cantidad de humo negro y MCI de encendido por chispa que al pasar no sólo humean sino que también dejan un fuerte olor a gasolina que incluso es irritante para nuestros ojos, evidencias estas no solo de una elevada cantidad de gases tóxicos sino también de mala regulación del sistema de alimentación de estos vehículos. Por lo que se deduce que de elevar las exigencias al personal técnico responsabilizado por la explotación de estos equipos y a los propios conductores, se puede disminuir no solo la contaminación ambiental sino también dar mejor uso al combustible disponible, pues un sistema de alimentación en mal estado trae aparejado también un consumo de combustible elevado.

### **Ruidos de los MCI y formas para reducirlos**

Se entiende por ruido del MCI la emisión acústica que éste produce durante el trabajo. Los principales componentes del ruido del motor son: el ruido de admisión; el ruido por la deformación de las paredes de la cámara de combustión durante la compresión, combustión y expansión; el ruido durante la combustión; el ruido provocado por las oscilaciones del motor sobre la suspensión; el ruido por golpes durante el trabajo de los mecanismos; el ruido por el funcionamiento de agregados del motor y el ruido durante el escape de los gases.

Procedimientos para disminuir el ruido de los MCI: ejerciendo influencia sobre las fuentes perturbadoras (colocando silenciadores); debilitando la transmisión de las vibraciones acústicas desde la fuente de perturbación hacia la superficie que emiten ruido (colocando en el camino de propagación materiales que absorben la energía de las oscilaciones); encapsulando el motor y reduciendo la eficiencia de la emisión mediante elementos aislados exteriores de la estructura del MCI (empleando pantallas, cambiando la configuración de las piezas).

Una escala objetiva para determinar la intensidad sonora son los dB(A). La medición sonora con la variación (A) se asimila a la receptibilidad del oído humano en la gama auditiva de 20 Hz a 20 < Hz. Las emisiones sonoras de los automóviles y los tractores se miden durante el paso acelerado a una distancia de 7.5 m desde el centro del vehículo con la marcha más rápida.

Como se conoce la principal fuente de ruido de los vehículos en sentido general es el producido por el motor de combustión interna durante su funcionamiento. Para proporcionarle al conductor un máximo de comodidad en la cabina es necesario tener en cuenta varios factores: el andar en la cabina, los niveles de ruido y la temperatura en la misma. Se considera que el nivel de ruido estándar actual en la cabina es de 90 dB medidos a 200 mm, desde el oído derecho del conductor; persiguiéndose como objetivo final para el nivel de ruido dentro de la cabina el valor de 74 dB.

En nuestro país no se realizan controles de los niveles de ruido de los MCI. Con mucha frecuencia percibimos el acercamiento de un vehículo determinado debido a los altos niveles de ruido que emiten sus MCI durante su funcionamiento, esto es provocado por la eliminación de los silenciadores con que están provistos dichos motores: así por ejemplo la gran mayoría de las motocicletas de 50 cc no están provistas del mismo.

### **Conclusiones**

1. Los motores de combustión interna que mayor contaminación del medio ambiente provocan, son los motores a gasolina a pesar de ser menos visible sus emisiones a la atmósfera.
2. En nuestro país no se controla los niveles de emisión de sustancias tóxicas por los MCI, existiendo reservas de tipo explotativas para la disminución de los mismos.
3. En México no se realizan controles de los niveles de ruido que emiten los MCI durante su funcionamiento, existiendo un gran número de vehículos que circulan por nuestras vías con altos niveles de ruido.

### **Recomendaciones**

1. Elevar las exigencias del personal responsabilizado con la asistencia técnica para lograr la elevación de la calidad en la realización de los mantenimientos técnicos y reparaciones como fuente de disminución de las emisiones de sustancias tóxicas y de ruido a la atmósfera.
2. Tomar conciencia de los problemas que se le están causando a nuestro planeta por la emisión indiscriminada de sustancias tóxicas y provocantes del llamado efecto invernadero.
3. Aplicar con rigor las disposiciones sobre el cuidado y conservación del medio ambiente en nuestro país.

# CAPÍTULO II

## EL HIDRÓGENO: HISTORIA, CARACTERÍSTICAS, MÉTODOS DE OBTENCIÓN Y APLICACIONES

### 2.1.- HISTORIA

#### Descubrimiento del hidrógeno

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 (en francés Hydrogène, del griego ὕδωρ, ὑδατοϛ, "agua" y γένος-ου, "generador") cuando comprobó (junto a Laplace) el descubrimiento de Cavendish.

### 2.2.- CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO

#### Introducción

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, insípido y no venenoso bajo condiciones normales. Es el elemento más simple conocido por el hombre. Un átomo de hidrógeno tiene únicamente un protón y un electrón. Normalmente existe como una molécula diatómica, es decir formada por átomos de hidrógeno, de ahí que el hidrógeno normalmente se exprese como  $H_2$ . Es el elemento más abundante en el universo, con un 90% del universo en peso, y el tercero más abundante en la Tierra. Sin embargo, en la Tierra, no es frecuente encontrarlo en su forma pura, ya que reacciona rápidamente con otros elementos para formar compuestos más estables. Combinado con el oxígeno forma agua ( $H_2O$ ). Combinado con el carbono puede formar distintos componentes como el metano ( $CH_4$ ), el carbón o el petróleo.

El hidrógeno es una mezcla en equilibrio de orto-hidrógeno y para-hidrógeno cuya diferencia radica en la distinta rotación relativa del spin atómico. Las moléculas con

los spins en la misma dirección (paralelos) se denominan orto-hidrógeno; y aquellas con los spins en direcciones opuestas (antiparalelas) se denominan, para-hidrógeno. A medida que la temperatura disminuye las moléculas de orto-hidrógeno se convierten en para-hidrógeno. En la licuación del hidrógeno será muy importante tener en cuenta esta propiedad. Estas moléculas tienen pequeñas diferencias en las propiedades físicas pero son químicamente equivalentes; por lo tanto, los riesgos asociados con el uso del hidrógeno son los mismos para las dos formas moleculares.

Las principales propiedades del hidrógeno son:

### **Densidad**

Es el elemento más ligero de la tabla periódica con una **densidad** de **0.0899kg/Nm<sup>3</sup>**.

### **Poderes caloríficos superior e inferior**

Tiene un alto contenido de energía por unidad de masa con uno Poder Calorífico Superior a 141MJ/kg e Inferior de 119MJ/kg. Estos valores son muy superiores a los de otros combustibles convencionales, siendo el poder calorífico inferior del hidrógeno del orden de tres veces superior al de la gasolina. Debido a su baja densidad en condiciones normales, tiene una baja densidad energética por unidad de volumen con un poder calorífico inferior por unidad de volumen de 10.79MJ/m<sup>3</sup>. La densidad energética por unidad de volumen puede aumentarse al aumentar la presión o disminuir la temperatura.

### **Inflamabilidad**

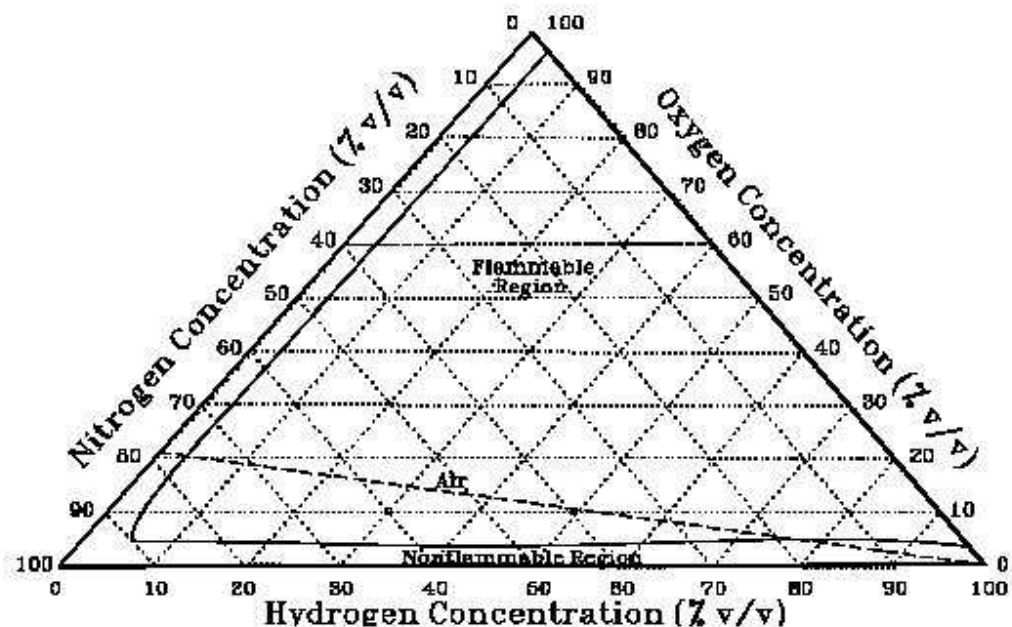
El hidrógeno no es explosivo, es una molécula estable, y a diferencia de los explosivos, el hidrógeno necesita una fuente de ignición externa para que se produzca la ignición. Para que el hidrógeno arda son necesarias tres condiciones: que el hidrógeno se mezcle con un oxidante, que la mezcla esté dentro de los límites de inflamabilidad y que esté presente una fuente apropiada de ignición.

Las mezclas de hidrógeno con aire, oxígeno, u otros oxidantes son altamente inflamables en un amplio rango de composiciones. Los límites de inflamabilidad, en porcentaje en volumen, definen el rango en el cual los combustibles gaseosos se incendian cuando están expuestos a una fuente de ignición con suficiente energía. Los límites de inflamabilidad son dependientes de la energía de ignición, de la temperatura, de la presión, de la presencia de diluyentes y del tamaño y configuración del equipo, instalaciones o aparatos. El rango de inflamabilidad de las mezclas hidrógeno-aire e hidrógeno-oxígeno se amplían si la propagación de la llama es hacia arriba y se estrechan si la propagación de la llama es hacia abajo.

Los límites de inflamabilidad del hidrógeno en aire seco a una presión de 101.3kPa y a una temperatura de 298 K son de 4.1% y 74.8%, para los límites inferior y superior respectivamente. Para el caso de la mezcla hidrógeno-oxígeno son de 4.1% y 94%. Una reducción en la presión por debajo de 101.3 kPa tiende a estrechar el rango de inflamabilidad, aumentando el límite inferior y disminuyendo el superior.

Una mezcla inflamable puede ser diluida con sus propios componentes hasta que la concentración de la mezcla caiga fuera de los límites de inflamabilidad (límites

inferior y superior). En la Figura 31 se muestra los límites de inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-oxígeno-nitrógeno.



**Figura 31.** Límites de Inflamabilidad de la mezcla Hidrógeno-Oxígeno-Nitrógeno a una presión de 101 kPa (14.7 psia) y una temperatura de 298 K (77 °F)

### Temperatura de Autoignición

Las temperaturas de ignición son dependientes de la concentración y presión del hidrógeno gaseoso y del tratamiento superficial de los contenedores. Las temperaturas obtenidas son muy dependientes del sistema y de los valores seleccionados y sólo se deben aplicar a sistemas similares. A una presión de 101.3 kPa el rango de temperaturas de autoignición para hidrógeno estequiométrico en aire está entre 773 a 850 K; en oxígeno estequiométrico está entre 773 a 833 K.

### Energía mínima de la chispa para la ignición

La mínima energía de la chispa para la ignición se define como la mínima energía de la chispa requerida para incendiar la concentración más fácilmente incendiabile del combustible en aire u oxígeno. En la Tabla 3 se muestra la mínima energía de la chispa del hidrógeno en aire para diferentes presiones:

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

**Tabla 3.** Energía mínima de la chispa para la ignición de un mezcla Hidrógeno-Aire



La mínima energía de chispa requerida para incendiar el hidrógeno es considerablemente inferior que la del metano (0.29mJ) o la de la gasolina (0.24mJ); sin embargo, la energía de ignición de estos tres combustibles es lo suficientemente baja que es relativamente cierto en presencia de cualquier fuente de ignición débil; como chispas, cerillas, superficies calientes, electricidad estática de un cuerpo humano puede ser suficiente para incendiar cualquiera de estos combustibles en aire.

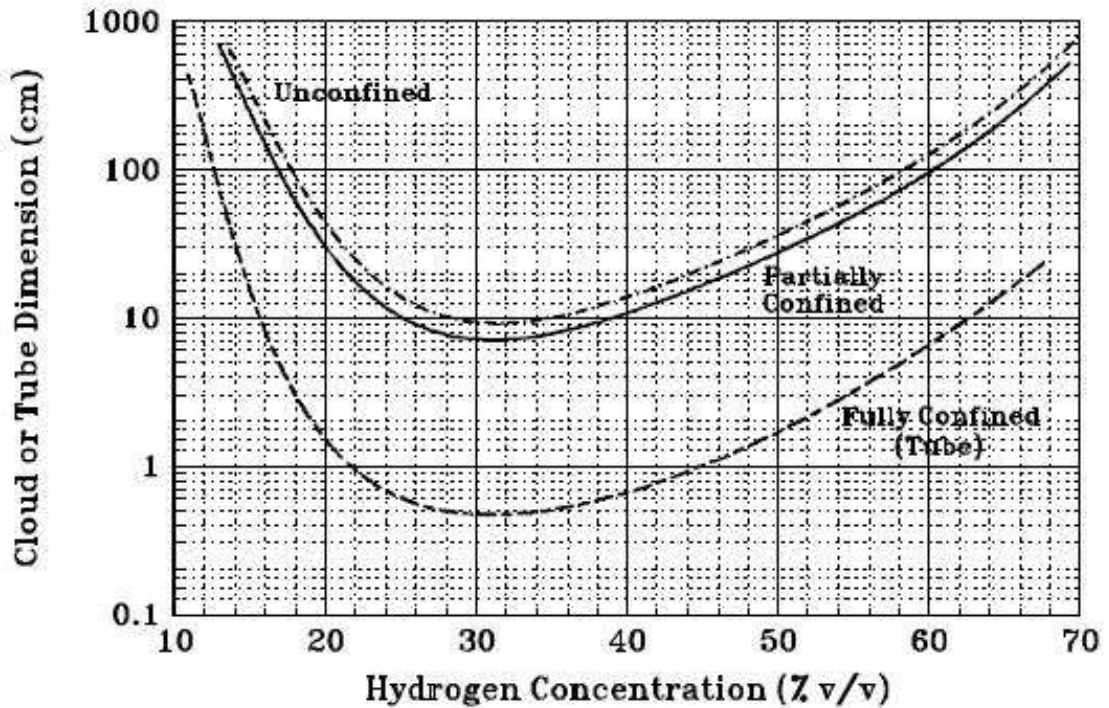
### **Franja de extinción**

La franja de extinción del hidrógeno a temperatura y presiones normales (NTP) del aire es de 0.6mm. Este valor depende de la temperatura, presión y composición de la mezcla del combustible gaseoso.

### **Detonación**

El peor suceso resultante de la liberación de hidrógeno, es que se mezcle con un oxidante (normalmente aire), que la mezcla se sitúe dentro de las concentraciones de detonación, y que por lo tanto produzca una mezcla detonante. La flotabilidad positiva y la rápida difusión molecular del hidrógeno gaseoso hacen que cualquier escape se mezcle rápidamente con el gas de los alrededores. Si se produce la detonación, el resultado en la zona de reacción es una onda de choque y la onda expansiva que le acompaña que tiene un gran potencial para causar daños personales o de los equipos.

Los límites de detonación varían considerablemente con la naturaleza y dimensiones del confinamiento y no pueden ser especificadas para ninguna mezcla combustible-oxidante a menos que la naturaleza y dimensiones del confinamiento estén también especificadas.<sup>32</sup> En la Figura 32 se muestran las mínimas dimensiones de la mezcla hidrógeno-aire para la detonación en tres tipos de confinamiento a una presión de 101.3 kPa. En ella se observa la gran influencia que tipo de confinamiento tiene en los límites de detonación.



**Figura 32.** Límites de detonación de una mezcla de Hidrógeno-Aire, dependiendo del tipo de confinamiento

La energía de detonación aumenta para mezclas pobres y ricas; sin embargo es posible producir detonaciones sobre conducidas si se introducen gran energía de ignición. Por lo tanto los límites de detonación que se encuentran en la literatura deben ser utilizados con cautela.

### **Transición de la deflagración a la detonación**

Una combustión hidrógeno-aire puede comenzar como una detonación o como una deflagración y luego transformarse en una detonación después de que la llama haya viajado una cierta distancia. El rango de composición en el cual se puede desarrollar una detonación es más estrecho que el de una deflagración. El rango normalmente citado para la detonación de la mezcla hidrógeno-aire es desde 18.5 al 59% de hidrógeno. Sin embargo con mayores energías de ignición estos límites se pueden ampliar. Se necesita una fuente energética de iniciación para que una combustión comience como una detonación. Para que una deflagración pase a ser una detonación es necesario un mecanismo de aceleración de la llama.

## **2.2.1- PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓGENO GASEOSO**

El hidrógeno gaseoso tiene unas características particulares que deben ser especialmente analizadas.

### **Detección**

El hidrógeno gaseoso es incoloro, inodoro y no es detectable en ninguna concentración por los sentidos humanos. El hidrógeno no es tóxico pero puede resultar asfixiante al diluir el oxígeno necesario en el aire respirable. Una atmósfera que contenga una concentración de oxígeno inferior a 19.5 porcentaje en volumen se considera como deficiente en oxígeno.

### **Densidad Variable**

El hidrógeno es más ligero que el aire en condiciones normales (NTP) y tiende a subir a temperaturas superiores a 23 K. El vapor saturado es más pesado que el aire y permanece cerca del suelo hasta que aumenta la temperatura. Las velocidades de flotabilidad están relacionadas con la diferencia de densidades entre el combustible y el aire; por lo tanto, el combustible gaseoso frío y denso producido por los escapes de hidrógeno líquido subirán más lentamente que aquellos a temperatura y presión estándar. La velocidad de elevación del hidrógeno en condiciones normales (NTP) en aire está entre 1.2 a 9 m/s.

### **Llama incolora**

La llama hidrógeno-aire-oxígeno es incolora. Cualquier visibilidad de la misma es causada por impurezas. A presiones reducidas puede presentarse en un azul o morado pálidos.

### **Temperatura de la llama en aire**

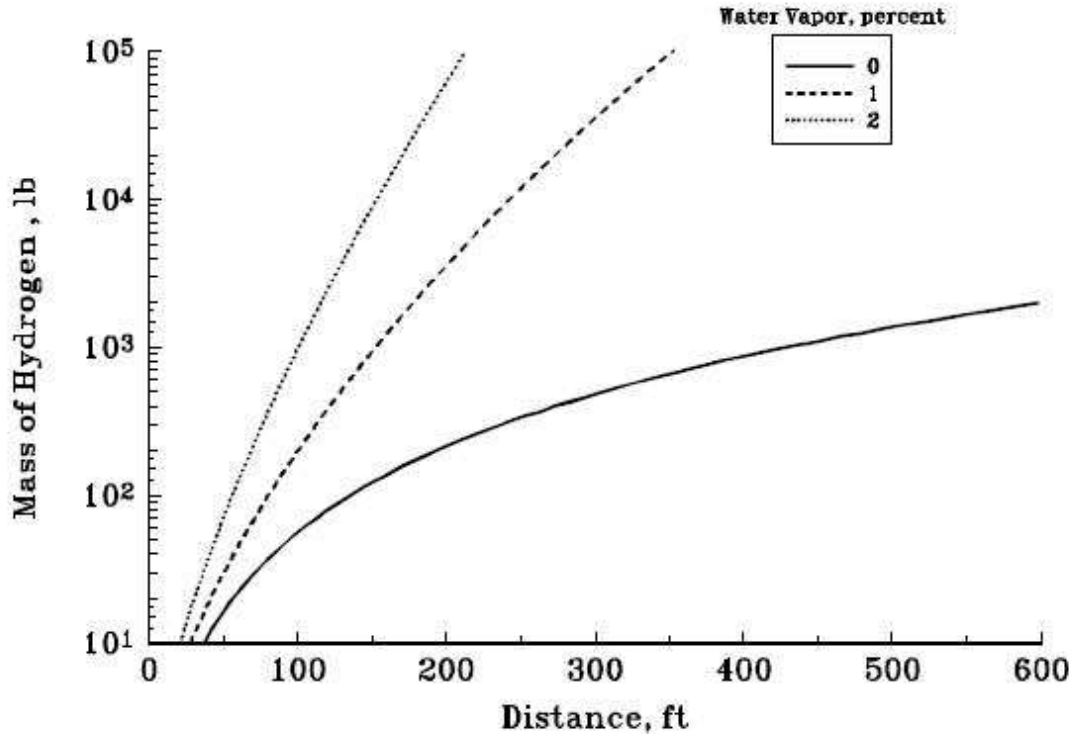
La temperatura de la llama para un porcentaje en volumen de hidrógeno de 19.6% es de 2321K.

### **Velocidad de combustión en aire en condiciones normales**

La velocidad de combustión en aire a condiciones normales, definida como la velocidad subsónica a la que la llama se propaga a través de una mezcla de aire combustible, es de 2.7 a 3.5 m/s. Las velocidades de combustión dependen de la presión, temperatura y composición de la mezcla. La alta velocidad de combustión del hidrógeno indica su alto potencial explosivo y la dificultad de confinar las llamas y explosiones de hidrógeno.

### **Energía Térmica Radiante de la Llama**

La exposición a fuegos de hidrógeno puede resultar significativamente dañina por radiación térmica. La radiación térmica depende de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. La humedad atmosférica absorbe la energía térmica radiada desde un fuego y puede reducir los valores. Este efecto es significativo en los fuegos de hidrógeno. La intensidad de la radiación desde una llama de hidrógeno a una distancia determinada depende fuertemente de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera.



**Figura 33.** Variación de la distancia a un fuego de Hidrógeno por una exposición a una radiación térmica de  $2 \text{ cal/cm}^2$ , para un tiempo de exposición de 10 s.

### **Coefficiente de Difusión en Aire en condiciones normales (NTP)**

El coeficiente de difusión para el hidrógeno en condiciones normales es de  $0.61 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

### **Índice Límite de Oxígeno**

El índice límite de oxígeno es la concentración mínima de oxígeno que puede mantener la propagación de una llama en una mezcla de combustible, aire y nitrógeno. Ninguna mezcla de hidrógeno, aire y nitrógeno en condiciones normales propagará una llama si la mezcla contiene menos de un cinco por ciento en volumen de oxígeno.

### **Coefficiente de Joule-Thomson**

El hidrógeno tiene un coeficiente de Joule-Thomson negativo. Esto significa que el hidrógeno ante una expansión isentálpica se calienta. Aunque este calentamiento no aumenta el peligro de ignición de forma significativa.

## **2.2.2- PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DEL HIDRÓGENO LÍQUIDO**

Todos los peligros que existen con el hidrógeno gaseoso también existen con el hidrógeno líquido debido a la facilidad con la que este último se evapora. Las propiedades características del hidrógeno líquido de particular preocupación por los peligros que suponen se analizan a continuación.

### **Bajo punto de evaporación**

El hidrógeno líquido tiene el punto de ebullición a 20.3 K a la presión del nivel del mar. Cualquier hidrógeno líquido salpicado en la piel o en los ojos puede producir serias quemaduras por congelación o hipotermia. Inhalar gas o vapor frío produce dificultades respiratorias que pueden tener como resultado la asfixia.

### **Formación de hielo**

Las aperturas y las válvulas de los tanques de almacenamiento de hidrógeno líquido pueden bloquearse por la acumulación de hielo formado de la humedad del aire.

### **Evaporación continúa**

La continua evaporación del hidrógeno líquido en las aperturas genera hidrógeno gaseoso que debe ser purgado hasta un lugar seguro o temporalmente confinado de forma segura. Los tanques de almacenamiento se deben mantener sobrepresión para prevenir que el aire entre en ellos. El hidrógeno líquido es objeto de contaminación con aire condensado y solidificado de la atmósfera. Esta mezcla es fácilmente incendiable y puede entonces detonar.

### **Alta densidad**

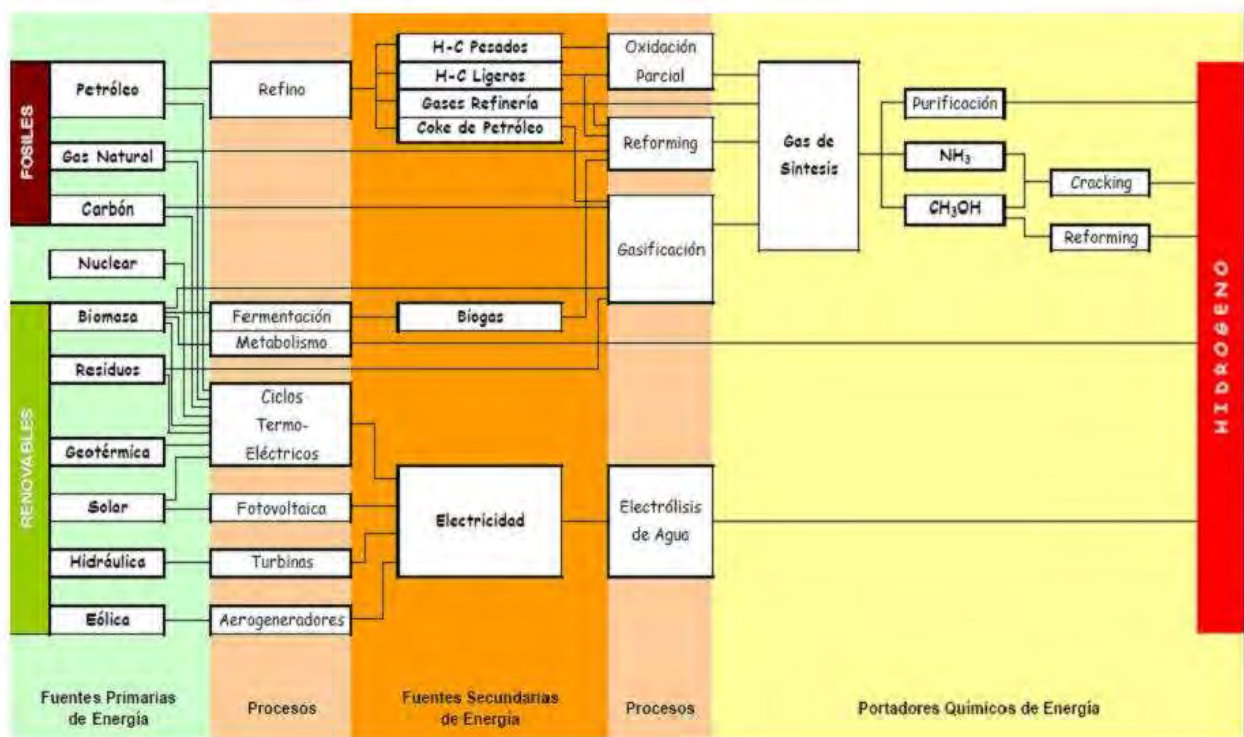
La alta densidad del vapor saturado puede causar que la nube de hidrógeno fluya horizontalmente o de forma descendente inmediatamente después de liberarse en un escape de hidrógeno líquido.

## **2.3.- MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**

### **Introducción**

El hidrógeno no se encuentra en la naturaleza en su estado elemental, sino que tiene que ser producido a partir de otras fuentes como pueden ser el agua y el gas natural, y con la aportación de energía. Idealmente, la energía aportada sería igual a la energía contenida en el gas sintetizado. Sin embargo, la producción de hidrógeno a partir de cualquier proceso implica una transformación de energía. Y desgraciadamente, las transformaciones de energía siempre tienen asociada pérdidas de energía.

Uno de los grandes beneficios del hidrógeno es que puede ser producido por un gran rango de fuentes potenciales incluyendo el agua, los combustibles fósiles y la materia orgánica. En la Figura 34 se describen las principales vías de producción de hidrógeno en la actualidad. Cada uno de los caminos tiene sus propias ventajas e inconvenientes que deben ser consideradas en términos de coste, emisiones, viabilidad, escala y logística.



Fuente: INTA

**Figura 34.** Vías de producción de Hidrógeno

Hay otros métodos de producción de hidrógeno que todavía están en investigación y desarrollo, pero que puede que algún día lleguen a ser comercialmente viables entre estos están: la fotoelectrolisis, la descomposición térmica del agua, la producción fotobiológica y el “plasmatron”.

El uso del hidrógeno no contamina, sino que solo produce calor y agua, por que promete ser la energía verde por excelencia. No obstante, se necesita una fuente adicional para obtenerlo. Y dependiendo cual sea la fuente elegida se emitirá o no CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Si el hidrógeno se obtiene a partir de un combustible fósil, como es el carbón, el petróleo o el gas natural, durante su producción se producen emisiones de CO<sub>2</sub>. A este hidrógeno se le denomina hidrógeno sucio, porque su uso ha implicado la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Por el contrario, si el hidrógeno se obtiene a partir del agua y con el aporte energético de energías renovables durante la vida completa del hidrógeno no se habrían producido emisiones de CO<sub>2</sub>. En el caso de la biomasa el tema de las emisiones de CO<sub>2</sub> es más complejo, ya que para la producción de hidrógeno se ha emitido CO<sub>2</sub> sin embargo, ese CO<sub>2</sub> fue capturado previamente por las plantas, durante la fotosíntesis para la producción de la propia biomasa. Y todo esto en un ciclo visible por el hombre.

El caso de la energía nuclear también es complejo, porque la energía nuclear no produce emisiones de CO<sub>2</sub>, pero produce residuos radiactivos.

De modo que una posible clasificación de la producción de hidrógeno podría ser la mostrada en la Figura 35.



**Figura 35.** Clasificación del Hidrógeno

En la actualidad se están desarrollando métodos de captura de dióxido de carbono, en cuyo caso la producción de hidrógeno a partir de los combustibles fósiles estaría libre de CO<sub>2</sub>.

Por otro lado, teniendo en cuenta los métodos de producción, aquellos que no originan la producción de dióxido de carbono, se resumen en la electrolisis, siempre que la electricidad necesaria provenga de una fuente renovable, los ciclos termoquímicos del agua y la fotólisis del agua. En cualquier proceso de producción de hidrógeno hay unas entradas (materias primas y energía) y unas salidas (hidrógeno, subproductos y pérdidas de energía). Tal y como se ve en la Figura 36.





**Figura 36.** Entradas y Salidas de un proceso de producción de Hidrógeno

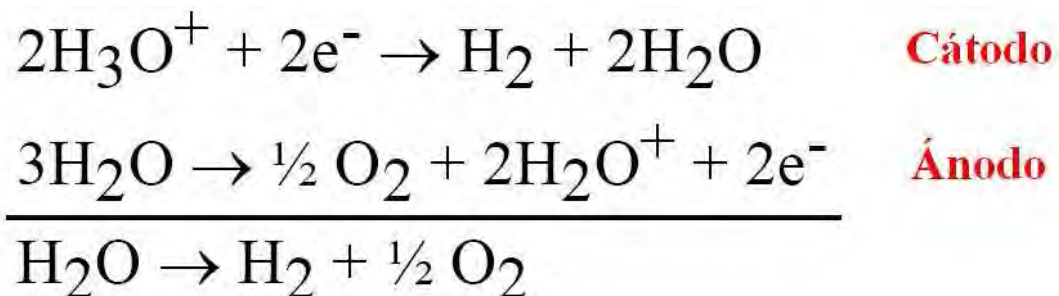
La eficiencia térmica de un proceso de producción de hidrógeno se puede definir como el poder calorífico inferior del hidrógeno producido dividido entre la energía suministrada al sistema desde todas las fuentes. El hidrógeno útil es aquel que llega al consumidor, por lo tanto los costes de purificación y almacenamiento también deberían ser considerados a la hora de estimar el coste total. Sin embargo, los mayores costes de la producción de hidrógeno resultan de la energía suministrada. El coste de los materiales, suministro de agua, gas natural u otros hidrocarburos, y los procesos finales, la purificación y el almacenamiento, no son especialmente significativos.

### 2.3.1.- ELECTROLISIS

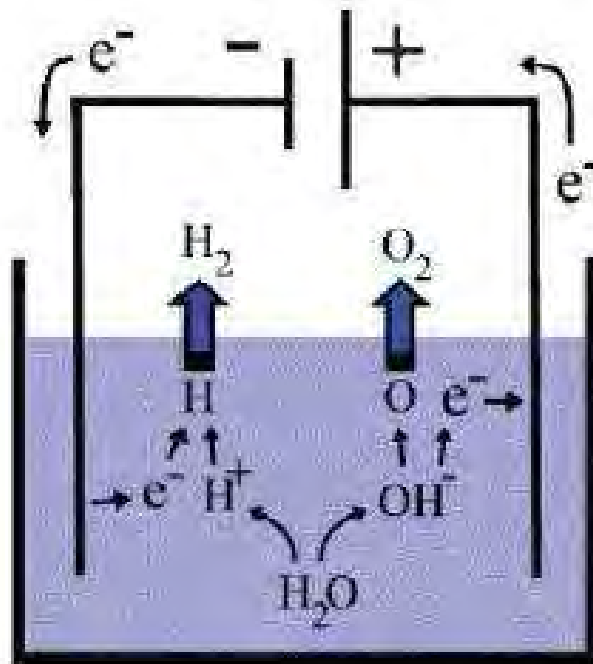
No enfocaremos en este método ya que es la forma más común de obtención de hidrógeno y en la cual aplicaremos sobre nuestro proyecto.

La electrolisis es la hidrólisis del agua, separación de los átomos que constituyen sus moléculas, por medio de la electricidad. Es el método mejor conocido para la producción de hidrógeno.

Las reacciones fundamentales que hacen la electrolisis posible son las semirreacciones de los iones del agua, mostrados en la Figura 37 y Figura 38.



**Figura 37.** Reacciones químicas del proceso de Electrolisis



**Figura 38.** Esquema de la Electrolisis

Los electrodos, el cátodo y el ánodo, se sitúan en la solución y generan el movimiento de electrones. El hidrógeno se forma en el cátodo, mientras que el oxígeno lo hace en el ánodo. Para mejorar la producción de hidrógeno, u oxígeno, por vía de la electrolisis, se suele variar la composición del agua, generalmente con la adición de sales, para aumentar la velocidad de reacción. También se utilizan tecnologías de membrana.

La electrolisis es muy efectiva como medio de producir hidrógeno puro en cantidades pequeñas.

Debido a que la electrolisis utiliza electricidad, la eficiencia térmica del proceso incluye la eficiencia de la generación de la energía eléctrica, así como la electrolisis en sí misma. El proceso de electrolisis tiene una eficiencia generalmente de entorno al 75%. La eficiencia de producción de energía eléctrica varía dependiendo del medio por el que se produzca ésta. Lo que significa que la eficiencia total para la producción de hidrógeno mediante esta tecnología se encuentra entre el 25-45% o incluso menos si es producido por fuentes de energía renovable.

Por otro lado, debido a que la electrolisis utiliza la electricidad como entrada, no tiene las restricciones geográficas de otros procesos, como son por ejemplo aquellos que necesitan calor. Esto permite una localización flexible y remota de los generadores de hidrógeno, suministrando una generación distribuida para este portador de energía, sin necesidad de transporte físico o almacenamiento a gran escala del gas en sí mismo.

A pesar de que la separación de la molécula de agua por medio de la electrolisis ha sido utilizada durante décadas, este uso ha sido limitado a unidades de producción pequeñas. La electrolisis no ha sido empleada en grandes plantas debido, principalmente, a su baja eficiencia comparada con el reformado de vapor. Existen, de todas formas, algunas grandes plantas de hidrógeno electrolítico que consumen más de 100MW, así como miles pequeñas. Recientes investigaciones, han mejorado la tecnología y aumentado las eficiencias. Se han examinado satisfactoriamente células de alta presión y alta eficiencia.

Teóricamente, la eficiencia en estas unidades es sobre un 90% y cuando se combinan con plantas de potencia de alta eficiencia, esto puede llegar a constituir la mejor eficiencia del rango mencionado anteriormente.

En la electrolisis hay que tener en cuenta tanto la eficiencia del proceso, como la velocidad a la que transcurre. Hay, por lo tanto, múltiples variables al diseñar una célula electrolítica.

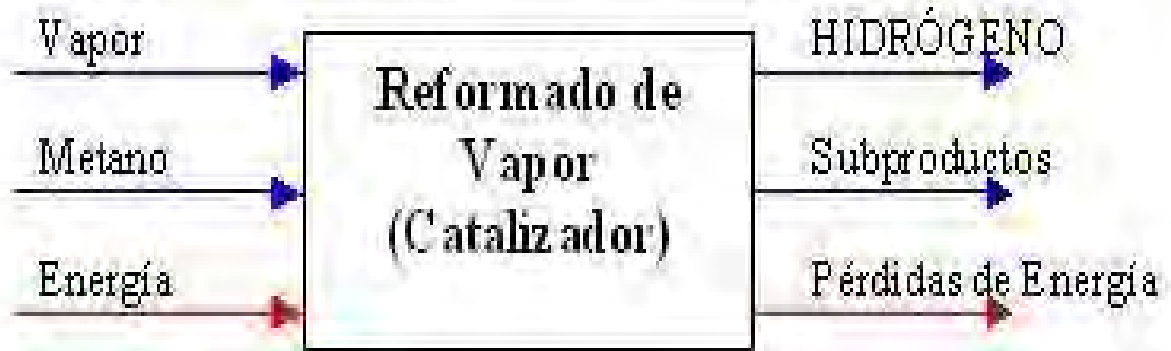
La producción de hidrógeno usando la electrolisis tiene el potencial de estar completamente libre de emisiones si la electricidad se genera a partir de una fuente de energía renovable limpia como puede ser la energía solar y eólica.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos está intentando resolver los problemas asociados a la producción de hidrógeno mediante electrolisis. Han demostrado, que utilizando gas natural en lugar de aire, en el compartimiento del ánodo en un electrolizador de óxido sólido, la electricidad necesaria para la operación del sistema se reduce en gran medida. El sistema tiene la capacidad de producir hidrógeno puro o hidrógeno humidificado en niveles apropiados para usar directamente en una célula de combustible tipo PEM. Los cálculos preliminares realizados indican que utilizando este concepto el hidrógeno se podría producir a coste competitivo con la gasolina a la vez que bajarían las emisiones de dióxido de carbono.

### **2.3.2.- REFORMADO DE VAPOR DE GAS NATURAL**

El hidrógeno también puede ser extraído de los hidrocarburos a partir del reformado. Reformado de vapor, o reformado catalítico de un hidrocarburo ligero, como el gas natural, bajo una atmósfera de vapor, es la tecnología dominante para la producción de hidrógeno. De hecho el 95% del hidrógeno producido en los Estados Unidos es a partir de este proceso. El hidrógeno producido por este proceso necesita una purificación antes de ser utilizado en procesos posteriores.

El reformado de vapor es un proceso termodinámico que consiste en hacer reaccionar metano, o más comúnmente gas natural, y vapor a una alta temperatura.



**Figura 39.** Entradas y Salidas del proceso de producción de Hidrógeno mediante reformado de vapor

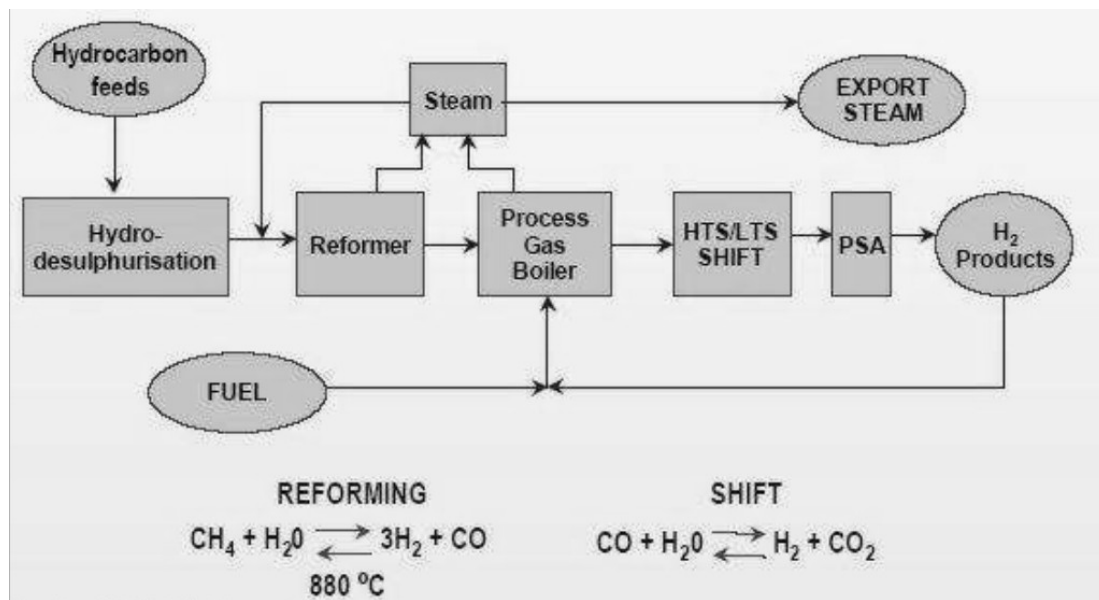
Se producen dos reacciones. La primera, la reacción de reformado, que es fuertemente endotérmica, y que transcurre con un catalizador y a una alta temperatura.

La segunda reacción es exotérmica. A continuación se produce el proceso de separación, se elimina el dióxido de carbono y se purifica el hidrógeno. Las entalpías de estas reacciones se muestran en la Figura 40.

Step	Reaction Equation	Name	$\Delta H$
1	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	Reforming	205.82
2	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	Shift Reaction	- 41.17
3	Separation Step		-

**Figura 40.** Entalpías

El proceso convencional transcurre en un reactor químico a temperaturas entre 800-900°C. Cuando estas temperaturas se consiguen con combustibles fósiles, se convierte en el método más barato para producir hidrógeno actualmente. El calor es generalmente suministrado quemando el exceso de metano. Esto conlleva la pérdida de tanto reactante como de algo de producto de hidrógeno. Las eficiencias típicas para un proceso de reformado de vapor son en torno al 70%.



**Figura 41.** Proceso de Reformado de Vapor

Una de las principales desventajas que se observan en este proceso es la pureza del hidrógeno obtenido. La pureza del hidrógeno resultante tiene que ser mejorada para muchas de las aplicaciones de hoy en día, en las que se requiere un hidrógeno de alta pureza. El CO<sub>2</sub> se elimina mediante un lavado alcalino, bien con una solución amínica, bien con una solución cáustica regenerativa, y finalmente, gas rico en hidrógeno se refrigera hasta bajas temperaturas y se purifica. Este proceso de purificación incurre en costes, y no es, por ejemplo, necesario en el proceso de electrolisis.

Este proceso de producción de hidrógeno lleva asociada la emisión de gases de efecto invernadero como es el dióxido de carbono. Por tanto se podría enmarcar dentro de los sistemas de producción de hidrógeno sucio.

### 2.3.3.- GASIFICACIÓN DEL CARBÓN

El proceso básico de gasificación del carbón comienza convirtiendo el carbón en estado gaseoso calentándolo en un reactor de alta temperatura. El carbón gaseoso se trata posteriormente con un vapor y oxígeno y el resultado es la formación de hidrógeno gaseoso, monóxido de carbono y dióxido de carbono.

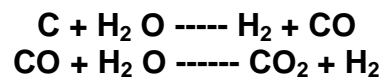
La gasificación del carbón es el método más antiguo de producción de hidrógeno; las plantas llevan operando durante largo tiempo en Europa, Sudáfrica y los Estados Unidos. Además hay grandes yacimientos de carbón en todo el mundo. Este método de producción se convierte en económicamente viable si el CO<sub>2</sub> es capturado y usado para recuperar el metano atrapado en las minas de carbón.



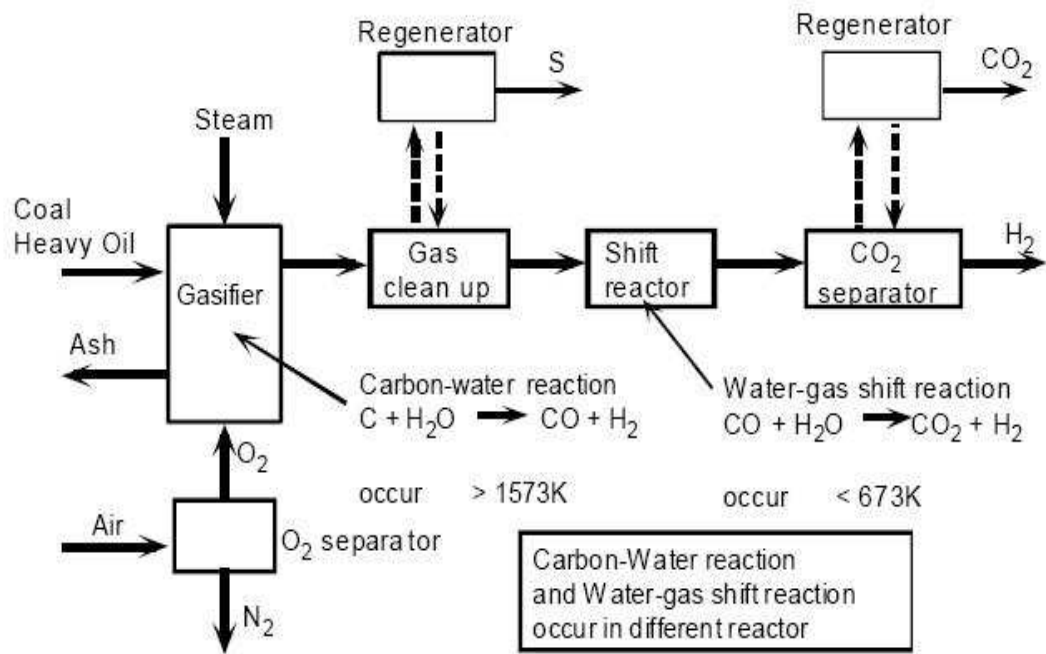
**Figura 42.** Planta piloto de Gasificación de Vapor

Sin embargo, es casi dos veces más caro producir hidrógeno a partir del carbón que a partir del gas natural, debido a ratio hidrógeno carbono, que en el gas natural es de 4:1 y en el carbón es de 0.8:1.48 Y, a menos que el dióxido de carbono sea capturado en el punto de producción, las emisiones asociadas a la gasificación del carbón son significativas.

Reacciones para producción de hidrógeno a partir de la gasificación son las siguientes:



La primera reacción convierte el carbono del carbón en monóxido de carbono y la segunda reacción lo convierte el dióxido de carbono. En las dos reacciones se produce hidrógeno. Un diagrama típico de producción de hidrógeno basado en la gasificación del carbón se muestra en la figura 43.



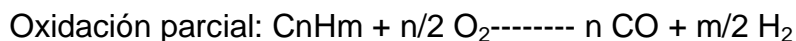
**Figura 43.** Diagrama típico de producción de Hidrógeno por gasificación de carbón

En el proceso, la reacción del vapor con el carbón se produce en el reactor primario a una temperatura de operación de 1273K, y los gases producidos se introducen en el segundo reactor, que normalmente opera por debajo de los 673K, para producir la reacción shift. El proceso necesita dos reactores para producir hidrógeno debido a que las reacciones primera y segunda transcurren a temperaturas diferentes. Además es necesario un sistema de purificación del gas.

### 2.3.4.- OXIDACIÓN PARCIAL DE HIDROCARBUROS

Mediante la oxidación parcial se puede obtener hidrógeno de una gran variedad de materias primas o de subproductos de otras reacciones. Entre éstos se encuentran los hidrocarburos, los residuos industriales, la biomasa, el metano, etc.

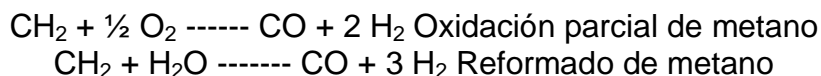
Mediante la oxidación parcial con oxígeno, a temperaturas 1150-1350°C se produce un gas bruto compuesto de H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Las impurezas contenidas en el gas bruto dependen de la composición de la materia prima y de las condiciones de desarrollo del proceso (presión y temperatura), encontrándose el azufre procedente de la materia prima prácticamente en su totalidad en forma de H<sub>2</sub>S. Luego se realizan unas etapas de depuración y de acondicionamiento, tras las cuales se obtiene hidrógeno puro.



La oxidación parcial se produce para el caso hidrocarburos pesados con una eficiencia del 86%, para el caso del carbón con un 50% y para el caso de la biomasa con un 65%.



La oxidación parcial ofrece algunas ventajas claras con respecto al reformado con vapor en cuanto que utiliza aire, en vez de vapor, y es una reacción exotérmica por lo que no requiere un aporte de energía externa durante la operación. Estas ventajas se contrarrestan con la producción de una cantidad de hidrógeno menor. Por ejemplo, en el caso de oxidación parcial o reformada de metano:



Por cada mol de metano, en el caso de la oxidación parcial se obtienen dos moles de hidrógeno, mientras que en el caso del reformado se obtienen tres moles.

El proceso industrial de obtención de hidrógeno a partir de oxidación parcial se esquematiza en la figura 44.

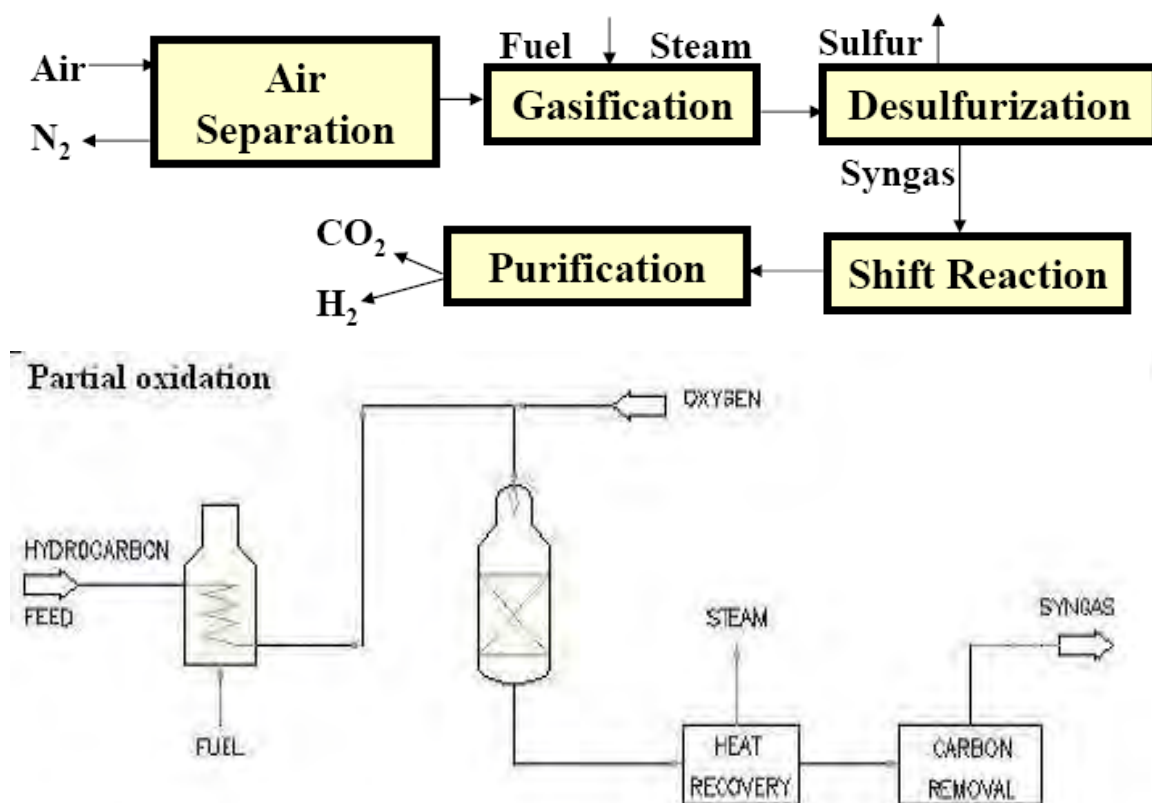


Figura 44. Obtención de Hidrógeno por Oxidación Parcial

### 2.3.5.- LA BIOMASA

La Biomasa se define como la materia orgánica que está disponible en una base renovable a través de un proceso natural o como subproducto de un proceso que utiliza fuentes renovables. La mayoría de la biomasa se usa en procesos de combustión en fábricas que producen electricidad como generación de producto de

uso final. La producción de hidrógeno a partir de la biomasa ofrece la ventaja de proporcionar un portador renovable de energía con una importante reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La biomasa puede ser convertida en hidrógeno a partir de distintos métodos:

- Gasificación seguida de una reacción shift.
- Pirolisis de la biomasa para formar un bioaceite que puede ser convertido a continuación en hidrógeno a través de un reformado catalítico de vapor y una reacción shift.
- Oxidación parcial de la biomasa con agua en estado super crítico.
- Fermentación de la materia orgánica por bacterias capaces de producir hidrógeno.

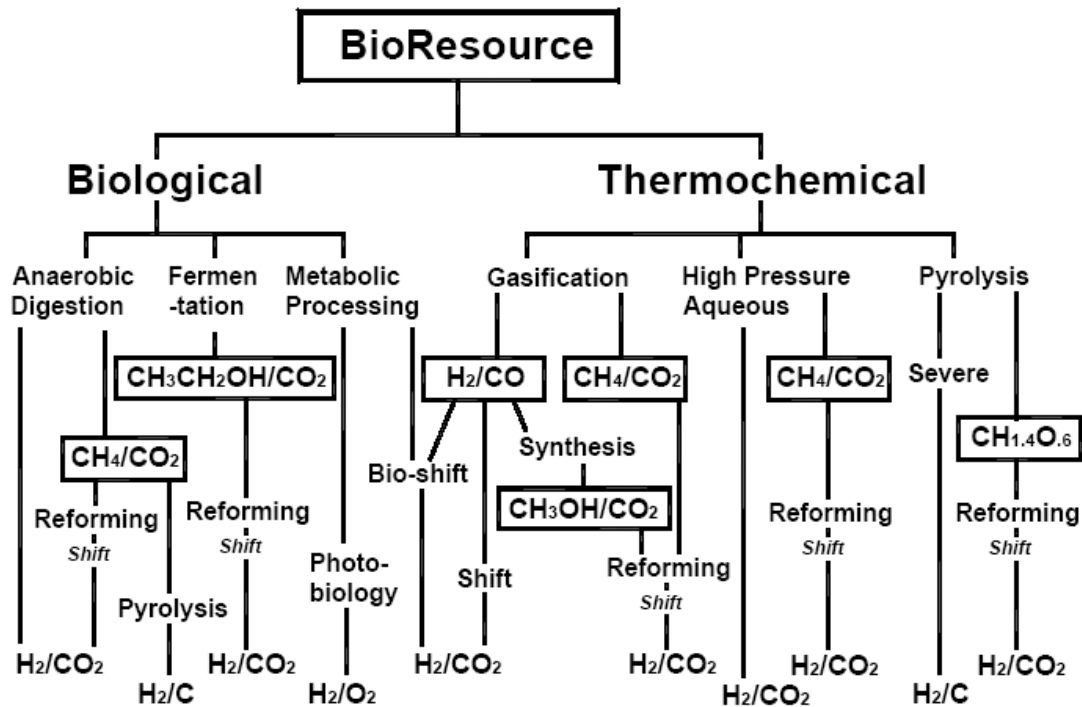


Figura 45. Distintas formas de producción de Hidrógeno a partir de la Biomasa

### 2.3.6.- ENERGÍA SOLAR

Existen tres métodos de producción de hidrógeno a partir de la energía solar, y éstos son:

- Electroquímica (Electrolisis)
- Termoquímica.
- Fotoquímica.

En el primer caso se utiliza la energía del sol para producir electricidad, y ésta será la que después se utilice para producir hidrógeno, por el método de la Electrolisis,

que se describió anteriormente. El segundo caso, el de la Termólisis, se utiliza la energía del sol para generar un calor que luego será empleado en el proceso que producirá el hidrógeno, mediante los denominados ciclos de hidrólisis termoquímica del agua como son por ejemplo el ciclo azufre-yodo o el ciclo UT-3, también descritos con anterioridad. Finalmente, los procesos de Fotólisis son aquellos que necesitan expresamente la luz como una entrada al proceso, y sin la cual el proceso no produce hidrógeno. A continuación se describirán los tres sistemas.

#### **a) Sistemas electroquímicos**

Puesto que la Electrolisis ya se ha descrito, aquí solamente se describirá de forma breve la producción de energía eléctrica por vía solar.

Existen dos métodos de producción de energía eléctrica por vía solar. El primero sería la energía solar fotovoltaica y el segundo sería utilizar la energía solar térmica de alta temperatura, para calentar un fluido térmico hasta una temperatura suficiente como para que pueda ser introducido en una turbina para la producción de energía eléctrica.

#### **Energía solar fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica es aquella que utiliza la radiación solar para excitar una célula solar fotovoltaica, compuesta por un material fotoexcitable, de modo que se produce una diferencia de potencial entre distintas partes del material.

Una célula solar puede estar compuesta por diferentes materiales. Las células que más se utilizan son las que tienen como material fundamental el silicio. Pero es necesario dopar a las células con fósforo (P) y con boro (B). Pero dentro de las de silicio las podemos encontrar de silicio monocristalino, de silicio policristalino y de silicio amorfo. Las dos primeras son las más comerciales. Las de silicio monocristalino tienen una eficiencia mejor y son algo más caras que las de policristalino que tienen algo menos de eficiencia pero son más baratas.

Las células suelen tener un tamaño de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , pero se pueden alcanzar hasta de  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ . Y se les suele aplicar un tratamiento superficial para que sean antirreflectantes, de modo que se refleje la menor cantidad de radiación y se absorba la máxima posible.

El comportamiento de una célula solar viene dado por su curva característica que representa la intensidad que da la célula frente a la tensión. La curva característica para una misma célula variará al variar la irradiancia ( $\text{W/m}^2$ ) que recibe y dependiendo de la temperatura del panel fotovoltaico.

Los datos que generalmente da el fabricante de células fotovoltaicas es:

- Intensidad de cortocircuito:  $i_{cc}$
- Tensión de circuito abierto:  $v_{ca}$
- Punto de máxima potencia:  $P_{mp}$
- Intensidad de máxima potencia:  $i_{mp}$
- Tensión de máxima potencia:  $v_{mp}$

Todos estos valores estarán medidos en condiciones estándar, es decir a una irradiancia de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  y una temperatura del panel de  $25^\circ\text{C}$ . A la potencia máxima que da el panel en estas condiciones se le denomina potencia pico. Los valores tipo de una célula fotovoltaica son  $i_{cc} = 3\text{A}$  y  $v_{ca} = 0,6\text{V}$ .

Un módulo fotovoltaico es un conjunto de células solares fotovoltaicas asociadas en serie o en serie-paralelo. Los módulos suelen estar formados por 36, 72, y 108 células. Una instalación fotovoltaica doméstica, con frecuencia está formada por varios módulos fotovoltaicos asociados en serie o paralelo.

Si el objetivo es producir hidrógeno, la energía eléctrica producida por uno o más módulos fotovoltaicos es la que se introduce en el electrolizador para la que se produzca la electrolisis necesaria para la producción de hidrógeno. Existen varias líneas de investigación para aumentar la rentabilidad de las células fotovoltaicas:

- Utilizar menos material, para reducir el coste de las células.
- Conseguir que sobre una célula llegue más radiación, mediante métodos de concentración de la radiación solar. El problema es que tampoco se puede aumentar mucho la radiación porque la célula se calienta mucho, y al aumentar la temperatura de la célula disminuye el rendimiento.

#### b) Sistemas termoquímicos

Los procesos solares termoquímicos son aquellos que utilizan como la energía solar como fuente de calor. Estos procesos han sido descritos anteriormente, y podrían utilizar otras fuentes de calor para la producción de hidrógeno. Por lo tanto, en este apartado lo que se describirá es la producción de calor por vía solar. En la Figura 46 se resumen gráficamente estos procesos termoquímicos.

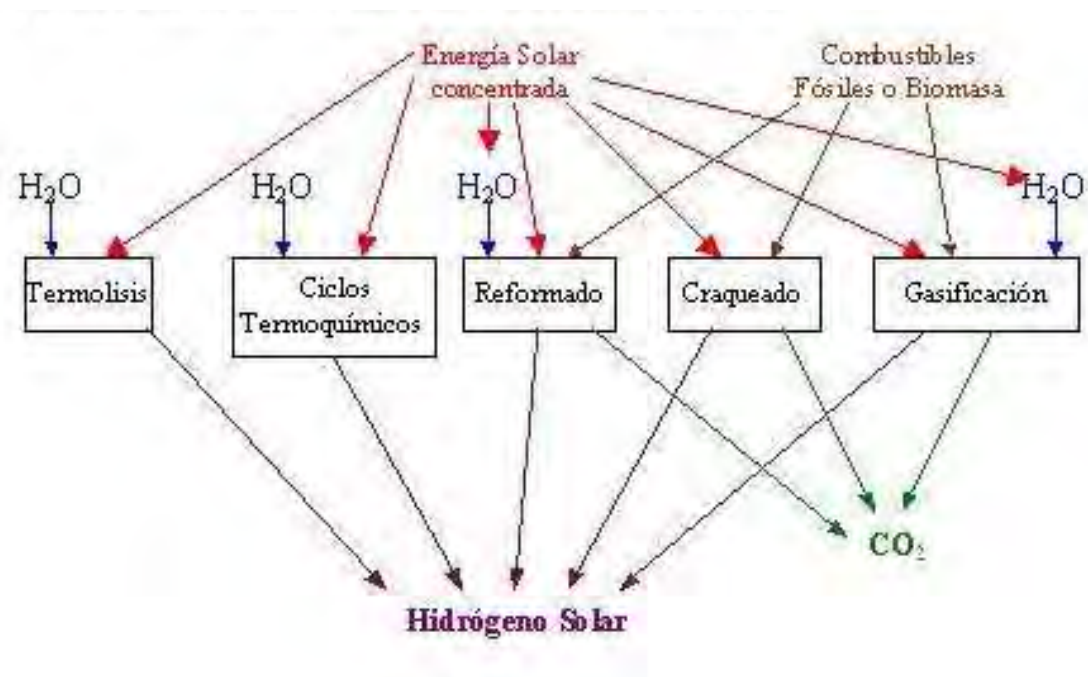


Figura 46. Procesos solares termoquímicos de producción de Hidrógeno

### **Energía solar térmica de baja temperatura**

Se denomina energía solar térmica de baja temperatura al proceso de calentar un fluido térmico hasta una temperatura inferior a 100°C. Esta tecnología está muy extendida en el uso doméstico como calentamiento del agua caliente sanitaria, o para procesos de calefacción de edificios y climatización de, por ejemplo, piscinas. En el sector industrial, si bien también se utilizan procesos a baja temperatura, lo más frecuente es que se precisen niveles mayores de calentamiento del fluido térmico. Estos se conforman la denominada energía solar térmica de alta temperatura.

### **Energía Solar Térmica de Alta Temperatura**

El aprovechamiento de la energía solar a alta temperatura es posible gracias a los denominados Sistemas Termosolares de Concentración Solar (STCS). Estos sistemas se fundamentan en el aprovechamiento de la energía solar en media y alta temperatura mediante la concentración de la radiación directa. Los STCS se clasifican en dos tipos: de foco lineal y de foco puntual dependiendo de cómo concentren la radiación.

Los STCS de foco lineal serán los concentradores cilindro-parabólicos. Serán concentradores en dos dimensiones. El concentrador será una superficie reflexiva con forma de cilindro parabólico, y el receptor será un tubo absorbente situado en el foco del cilindro parabólico. Dentro del tubo irá un fluido térmico que se calentará conforme transcurre por el interior del tubo. Tienen muy poco rendimiento ya que, al tener que unir los distintos concentradores, quedarán muchos metros de tubo fuera de la zona de radiación. La estructura es móvil de forma que siempre esté orientada perpendicularmente a la dirección de los rayos de sol.

Los STCS de foco puntual, o sistemas de receptor central, serán sistemas que concentren la radiación en tres dimensiones. De esta forma se alcanza una muy alta relación de concentración. Se clasifican en dos tipos fundamentales: paraboloides de revolución y campos de helióstatos. Los primeros son discos parabólicos de forma que refleja todos los rayos recibidos a un único punto, idealmente, donde se sitúa el receptor. El segundo es un conjunto de helióstatos, orientados de forma que todos los rayos reflejados se concentren en un único punto, o superficie pequeña. Un helióstato es un instrumento geodésico que refleja un rayo de luz siempre en dirección fija, por medio de un espejo, regido por un mecanismo, que sigue el movimiento aparente del sol.

### **c) Sistemas fotoelectroquímicos (Fotolisis)**

El proceso por el cual los materiales semiconductores absorben la luz y la convierten esa luz en electricidad se conoce desde hace algún tiempo y es la piedra angular de la industria fotovoltaica. Como alternativa a la generación de electricidad, la energía generada mediante la absorción de luz por un semiconductor podría ser utilizada para una transformación química, y de este modo almacenar la energía para un uso posterior. Esta es la base de la generación fotoelectroquímica de hidrógeno a partir de la luz solar. En este proceso, los electrones generados por la absorción de luz se utilizan para reducir el agua, generando hidrógeno, y los protones son utilizados para

oxidar el agua, generando oxígeno. El hidrógeno generado podría ser utilizado como combustible tanto en un proceso electrolítico como en una combustión. Es más eficiente generar hidrógeno usando directamente la fotoelectroquímica ya que los sistemas fotoelectroquímicos de conversión directa no sólo eliminan los costes de un electrolizador, sino que también tienen la posibilidad de incrementar la eficiencia global del proceso, comparado con el sistema fotovoltaico/electrólisis.

Los requerimientos de los principales materiales para una producción eficiente de hidrógeno son:

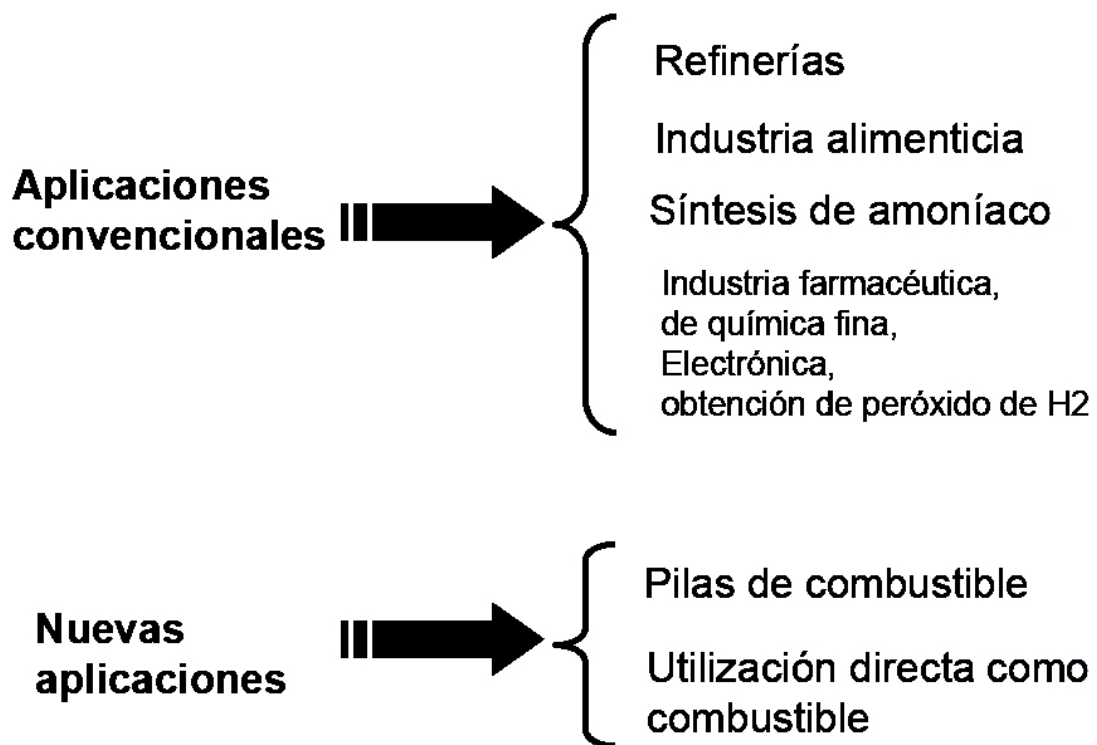
- Un semiconductor con un ancho de banda adecuado al espectro solar para maximizar la radiación solar.
- Energía en los bordes de la banda adecuada para los potenciales de reducción y oxidación del agua para minimizar la energía de pérdida.
- Rápido transporte de electrones entre las fases para minimizar la recombinación.
- Estabilidad en presencia de un electrolito acuoso.

La llave de las barreras técnicas a la implementación de la producción de hidrógeno fotoelectrolíticamente está relacionada con el hecho de que los materiales que satisfacen todos estos requerimientos, simultáneamente, no se han encontrado. Esto no es debido a conflictos entre estos requerimientos y las leyes de la naturaleza, sino que refleja un estado inmaduro de esta tecnología. En los primeros trabajos sobre esta tecnología, se analizaron los materiales semiconductores desarrollados para la industria fotovoltaica, y se encontraron inadecuados debido a su pobre estabilidad en electrolitos acuosos. Los trabajos actuales están intentando identificar materiales específicamente para la generación fotoelectroquímica de hidrógeno. Por otro lado, para que el proceso sea viable el sistema de iluminación tiene que suministrar la energía correcta para provocar la descomposición del agua.

## **2.4.- APLICACIONES DEL HIDRÓGENO**

### **Introducción**

El hidrógeno se usa en un gran número de aplicaciones industriales, dentro de la industria, los mayores consumidores de hidrógeno son las empresas que sintetizan amoníaco (40,3%), seguido de las refinerías de petróleo (37,3%) y las plantas de producción de metanol (10,0%). El resto está repartido en la industria farmacéutica, de alimentación, electrónica etc. Sin embargo en los últimos años ha tomado una relevancia añadida, el hecho de que el hidrógeno pueda ser el portador energético del futuro.



**Figura 47.** Aplicaciones del Hidrógeno

Este apartado se centrará en las “nuevas aplicaciones”. Las aplicaciones del hidrógeno son amplísimas. El hidrógeno puede servir como combustible a motores de combustión interna alternativos, a turbinas de gas y a células de combustible. Los dos primeros se aplicarían fundamentalmente a los sectores del transporte y de la industria, mientras que las células de combustible podrían cubrir además el sector de la vivienda.

En este apartado se ha hecho una clasificación atendiendo a los distintos sectores comerciales.

- Aplicaciones portátiles.
- Aplicaciones estacionarias.
- Aplicaciones en el transporte.
- Aplicaciones espaciales.
- Aplicaciones militares.

Las aplicaciones militares la hemos separado, al pensar que es un sector con características propias en las que prácticamente todas las aplicaciones podrían encajar, es decir las aplicaciones militares pueden ser portátiles, estacionarias, de transporte o incluso espaciales.



## 2.4.1.- APLICACIONES PORTÁTILES

Las células de combustible fueron ideadas originalmente para el uso en plantas y vehículos. Más recientemente, los diseñadores se dieron cuenta que era posible construir unidades mucho más pequeñas. Esto ha despertado un gran interés en el desarrollo de pequeñas células de combustible. Las pequeñas células de combustible podrían reemplazar a las baterías en los equipos electrónicos portátiles, hasta 100W y a los motores de generación de combustión interna. El límite superior de los generadores portátiles está en torno a los 5kW sobretodo debido al peso de la célula de combustible.

Las células de combustible portátiles podrían proporcionar energía eléctrica con mucho más tiempo de funcionamiento que las baterías. El incremento de la electrificación del equipo personal: teléfonos móviles, radios, ordenadores portátiles, ordenadores de bolsillo, herramientas eléctricas etc., abre un rango muy amplio en diferentes aplicaciones. Las células de combustible portátiles podrían ser abastecidas con hidrógeno, o metanol o etanol. Es importante destacar que los sistemas portátiles con largo tiempo de duración son muy demandados y compiten con los altos precios de las baterías, así que este mercado podría ayudar a extender la aceptación de las células de combustible.

### **Tipos de células de combustible apropiadas para las aplicaciones portátiles**

Las células de combustible que son apropiadas para aplicaciones portátiles son:

- a) Células de combustible de membrana polimérica que utilizan hidrógeno puro (H<sub>2</sub>-PEMFC)
- b) Células de combustible de membrana polimérica que utilizan gases ricos en hidrógeno procedente del reformado de hidrocarburos o alcoholes (Ref-PEMFC)
- c) Células de combustible de metanol directo (DMFC)
- d) Células de combustible de alta temperatura como son las células de combustible de óxido sólido (SOFC) y las de carbonatos fundidos (MCFC) que pueden utilizar hidrocarburos directamente.

Las células de combustible de metanol directo son las unidades y dispositivos integrados más pequeños porque utilizan un combustible líquido con alta densidad energética. Las células de membrana polimérica son mejores para sistemas de alta potencia debido a su mayor densidad energética. Las aplicaciones de células de combustible pequeñas de alta temperatura están limitadas a las unidades de potencia auxiliar que son de uso frecuente.

Los generadores portátiles de PEMCF no se diferencian mucho de las PEMFC usadas en aplicaciones estacionarias y en el transporte.

## **Aplicaciones**

Nos referimos a aplicaciones portátiles cuando las células de combustible son capaces de suministrar hasta 5kW de potencia. Sin embargo dividiremos las aplicaciones en tres grupos:

- a) Potencia inferior a 20W
- b) Potencia entre 20-100W

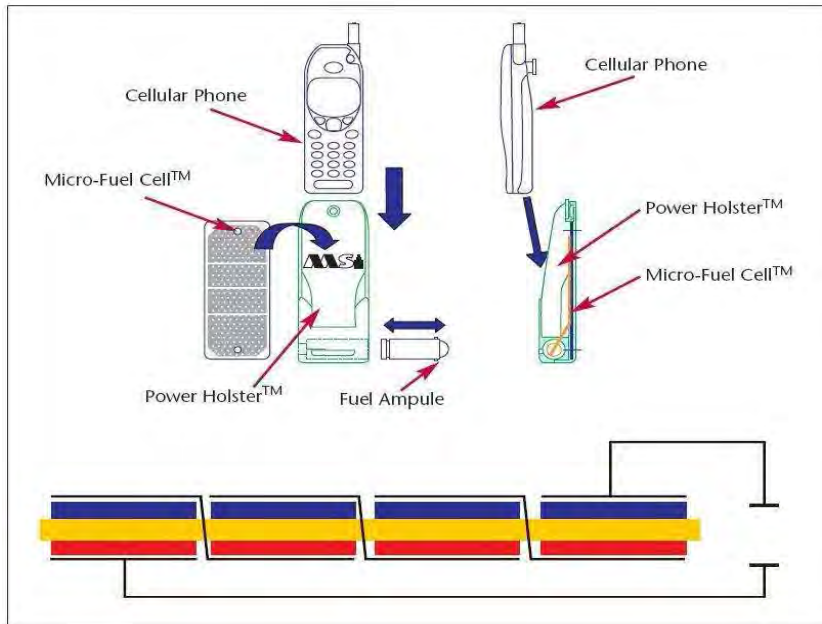
Las principales aplicaciones de las células de combustible de baja potencia son los teléfonos móviles, los asistentes digitales personalizados (PDA), los ordenadores portátiles, las agendas electrónicas, las cámaras, los equipos médicos, las aplicaciones militares y otros dispositivos electrónicos portátiles. En comparación con las baterías, las células de combustible pueden proporcionar mucha más potencia por unidad de volumen o peso, aunque tienen voltajes más bajos y respuestas más lentas.

### **Aplicaciones en dispositivos de hasta 20W de potencia**

Este tipo de potencia atiende fundamental a dispositivos electrónicos que actualmente funcionan con pilas o con baterías recargables. Como pueden ser:

- Teléfonos móviles
- Teléfonos inalámbricos
- Localizadores
- Radios
- Agendas electrónicas
- Lectores de música portátiles
- Radio casetes portátiles
- Cargadores de baterías

Es evidente que para sistemas de células de combustible integradas, el volumen es más importante que la fiabilidad, el tiempo de vida o el coste. Por lo tanto es importante reducir el tamaño la pila de células de combustible, el sistema de almacenamiento de combustible y los componentes auxiliares como son válvulas, sensores, unidades de control y separadores líquido gas. Por esta razón, el aire o el oxígeno deberían poder ser suministrados a la célula sin necesidad de forzar el movimiento del aire con, por ejemplo, ventiladores. En la Figura 48 podemos observar cómo se puede integrar la célula de combustible y el almacenamiento de combustible en un teléfono móvil.



**Figura 48.** Almacenamiento de combustible en un teléfono móvil

Otra posibilidad sería la de mantener el teléfono móvil con su batería y hacer un cargador de la misma. En la Figura 49 se observa un cargador de célula de combustible de metanol directo. El metanol, al ser líquido resulta más sencillo de almacenar, y muchos dispositivos de baja potencia optan por él en lugar del hidrógeno.



Portable DMFC

**Figura 49.** Cargador de célula de combustible de Metanol

### Aplicaciones en dispositivos con potencias entre 20-100W

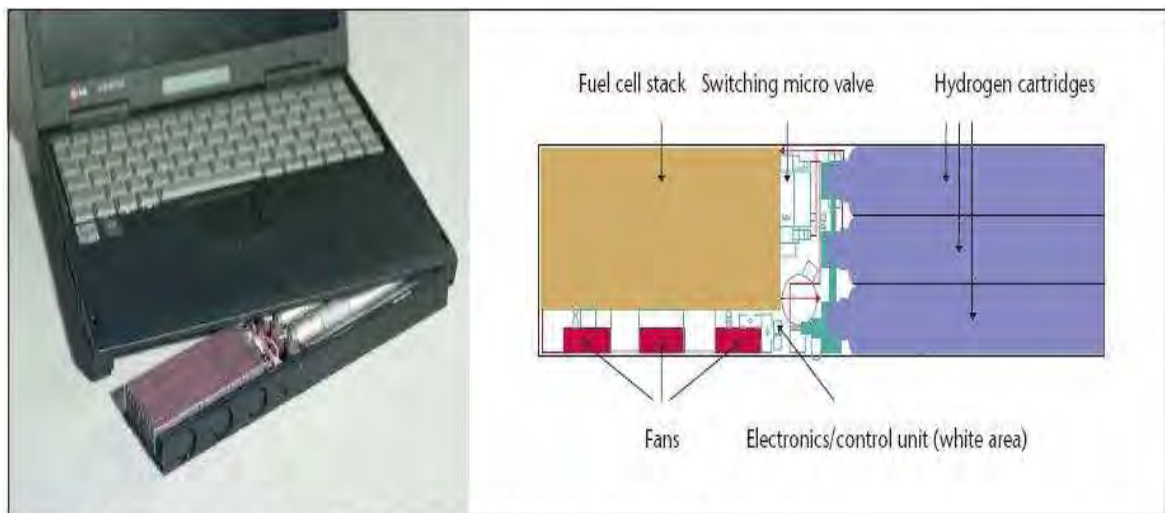
En estas aplicaciones también el peso, el volumen y el tiempo de funcionamiento son factores muy importantes. Entre los dispositivos podemos encontrar:

- Ordenadores portátiles.
- Herramientas inalámbricas.
- Videocámaras.
- Cámaras digitales.
- Juguetes.

Aquí, las células de combustible tienen peores eficiencias eléctricas, alrededor del 50%, que las baterías a las que sustituirían, en torno al 80%. Debido que toda la energía que no es convertida en electricidad acaba convirtiéndose en calor, las células de combustible en este rango de potencia podrían sufrir un sobrecalentamiento.

Solucionar el problema del exceso de calor, requiere un inteligente diseño térmico. Los hidruros metálicos necesitan calor para liberar el hidrógeno almacenado, así que el calor liberado podría ser capturado y utilizado para este fin. Otra importante vía de investigación y desarrollo en los sistemas de células de combustibles es la seguridad y la gestión de los efluentes.

Es importante, para el buen lanzamiento al mercado de estos productos que los cartuchos de recambios de combustible se estandaricen. En la Figura 50 se puede observar un ordenador portátil de célula de combustible de hidrógeno.



A notebook computer (LG CiNOTE 7400) with an integrated H<sub>2</sub>-PEMFC system (LG; ISE Freiburg).

**Figura 50.** Ordenador portátil de célula de combustible de Hidrógeno

## 2.4.2.- APLICACIONES ESTACIONARIAS

A pesar de que la atención actual en el hidrógeno y en las pilas de combustible está centrada en su uso en vehículos, la mayoría de las células que están actualmente en uso lo hacen en aplicaciones estacionarias.<sup>104</sup> Se pueden cosechar importantes mejoras de eficiencias y reducción de emisiones al utilizar las células de combustibles en la generación de electricidad estacionaria, tanto en grandes plantas como en uso doméstico, combinando la generación de calor y electricidad en los edificios.

Las aplicaciones estacionarias cubren un amplio rango de actividades. Las pequeñas unidades pueden proporcionar electricidad, calor y agua caliente a casas individuales (10 kW) o para un bloque de viviendas (100-300kW). La generación de electricidad centralizada se prevé que tenga potencias muchos megavatios.

Las células de combustible estacionarias permiten una alta eficiencia, bajas emisiones y generación de energía en un amplio rango de tamaños. Existen distintos tipos de células de combustible estacionarias, que utilizan distintos materiales y funcionan a distintas temperaturas, desde 60°C hasta 1000°C. Pueden ser utilizadas en sistemas descentralizados para suministrar energía, agua caliente y calor, incluso en unidades domésticas muy pequeñas.

Un gran número de células de combustible estacionarias están siendo probadas tanto en casas individuales como en grandes aplicaciones como un hospital. En los Estados Unidos, las células de combustible están siendo utilizadas para suministrar energía a las bases militares.

### **Aplicaciones**

Podemos dividir las células de combustible estacionarias en dos grupos:

- a. Las células de combustible estacionarias pequeñas, que serían las que generarían electricidad de forma distribuida.
- b. Las grandes células de combustible estacionarias, que generarían de forma centralizada. Y por tanto serían de mayor tamaño.

#### **a. Pequeñas células estacionarias**

Actualmente, hay alrededor de ochenta compañías en activo en el desarrollo de pequeñas células de combustible estacionarias en todo el mundo. De estas algunas ya han empezado a vender unidades abiertamente, mientras que otras han anunciado planes de introducir sus primeros productos comerciales en los próximos dos a tres años.

Se estima que se han construido alrededor de 1900 pequeñas células estacionarias que están funcionando en todo el mundo. Este número incluye sistemas instalados en hogares domésticos y unidades en el rango de 0.5-10kW que están funcionando en otras aplicaciones estacionarias pequeñas, como son generadores de emergencia en comercios y en localizaciones remotas.

Los dos principales problemas son que los precios son todavía muy altos como para ser competitivos, y que el tiempo de vida es muy corto. Está comúnmente aceptado que un sistema doméstico debería funcionar unas 40000 horas (o cinco años) sin ningún mantenimiento, incluyendo esto el cambio de la pila. Sin embargo muy pocas compañías han demostrado sistemas de más de 10000horas.

El mercado de generadores de emergencia parece atractivo, ya que existe una demanda de generadores fiables por una serie de compañías, como pueden ser bancos, o compañías de telecomunicaciones, donde un corte energético puede suponer pérdidas de hasta seis millones de dólares la hora o incluso más. En estas situaciones, los generadores de emergencia sólo tendrían que funcionar de forma intermitente, siendo ahora la vida media menos importante.



Range of residential systems being tested  
by the Japan Gas Association (Source: Japan Gas Association)

**Figura 51.** Se muestran pilas de combustible estacionarias

La mayoría de los fabricantes de pequeñas células estacionarias con alta potencia a la salida han pronosticado la salida al mercado de estas células dentro 5 a 15 años. La mayoría de los estudios concluyen que las células de combustible estacionarias tendrán éxito a medio o largo plazo. La mayoría de los fabricantes tienen planes de lanzar sus primeros modelos al mercado antes de 2006.



Hoy en día, hay alrededor de ochenta compañías que han producido células de combustible estacionarias pequeñas. Sin embargo, alrededor de dos tercios sistemas instalados han sido construidos solo por seis fabricantes, entre los que se incluyen:

Avista Labs, H Power, Nippon Oil, Plug Power, Sanyo Electric y SulzerHexis.

### **b. Grandes células estacionarias**

A mediados de 2003 se estimaba que habían construido y estaban en operación alrededor de 650 células de combustible estacionarias de grandes dimensiones en todo el mundo. Este número incluía unidades estacionarias mayores de 10kW, aunque la media estaba cercana a los 200kW. Por ejemplo la menor célula de combustible de carbonatos fundidos analizada era de 250kW, mientras que la mayor célula de combustible analizada era una célula de combustible de ácido fosfórico con 11MW, fabricada por Toshiba y UTC Fuel Cells.

Las primeras unidades comerciales se basaban en la tecnología del ácido fosfórico. Las mejoras tecnológicas se han extendido, pero la naturaleza del mercado necesita alta fiabilidad y larga duración, cuestiones que pueden llevar tiempo en probar, aunque se están haciendo grandes progresos. En la Figura 52 se muestra una Generación centralizada con pilas de combustible.



*Fuente: General Motors*

**Figura 52.** Generación centralizada con pilas de combustible



La tecnología elegida para las aplicaciones de las células de combustible estacionarias. Diferentes compañías eligen diferentes tecnologías, por ejemplo:

- Las células de combustible de ácido fosfórico son elegidas por UTC y Fuji Electric.
- Las células de combustible de carbonatos fundido son elegidas por Fuel Cell Energy y MTU CFC Solutions.
- Las células de combustible poliméricas por General Motors.
- Las células de óxidos sólidos por Siemens Westinghouse, Mitsubishi Heavy Industries, Nippon Steel y RollsRoyce.

Pero tal y como se observa en la Figura 53, las células de combustible de ácido fosfórico y de carbonatos fundidos son las predominantes.

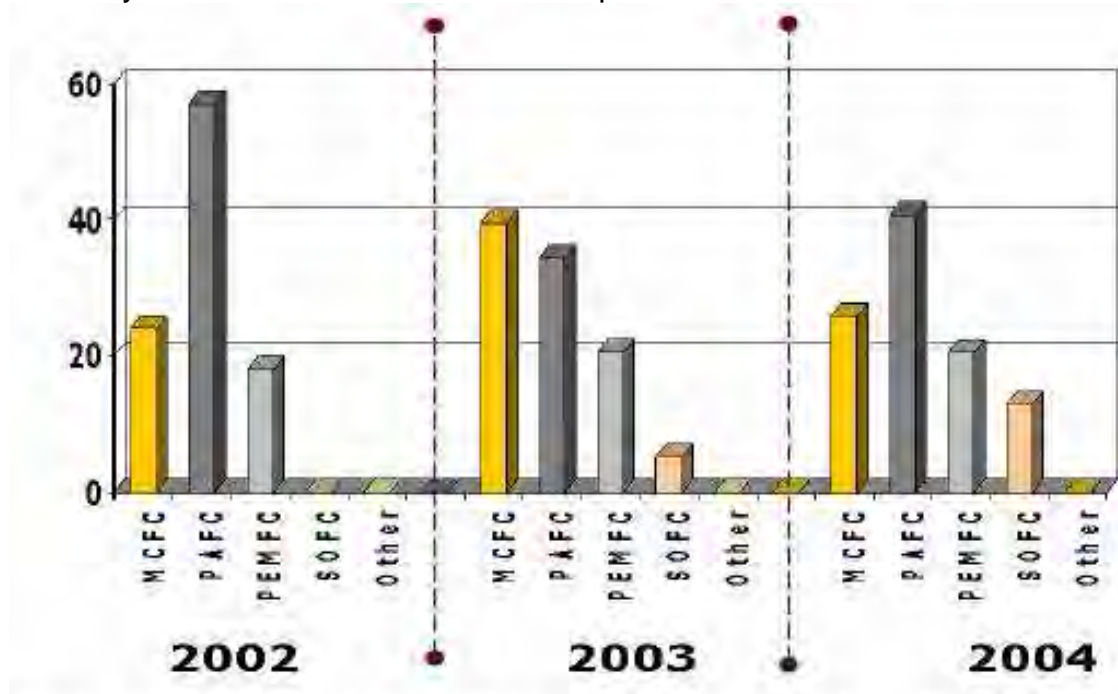


Figura 53. Tipo de tecnología por porcentaje de nuevas unidades de fabricación

#### **Ventajas de las células de combustible estacionarias**

- Pueden suministrar a la vez electricidad, agua caliente y calor, incluso en unidades domésticas muy pequeñas.
- Las células de combustible utilizadas en el transporte también pueden ser utilizadas en algunos sistemas estacionarios.
- Tienen alta eficiencia.
- Al tener bajas emisiones sonoras y contaminantes, pueden ser instaladas en áreas sensibles.

#### **Inconvenientes de las células de combustible estacionarias**

- Se necesita más investigación y desarrollo para que sean competitivas económicamente.
- Se necesita mejora en los procesos de fabricación.

- Necesario alargar los periodos de vida.
- Necesario reducir el coste de los sistemas.
- Necesario mejorar la fiabilidad de los sistemas.

### **2.4.3.- APLICACIONES EN EL TRANSPORTE**

Una de las principales razones por las que hay que mirar seriamente al hidrógeno como portador de energía es porque puede abastecer directamente a los vehículos de carretera, a locomotoras, a barcos y a aviones. Por otro lado, el hidrógeno puede ser el combustible dominante en los vehículos eléctricos impulsados por células de combustible, haciendo posible un transporte silencioso.

El hidrógeno puede ser utilizado para impulsar vehículos por medio de motores de combustión interna, células de combustible y turbinas de gas. Las células de combustible tienen unas eficiencias de conversión energética mayores, que los motores de combustión interna, además no tienen partes móviles y en el escape solo producen agua, de ahí su importancia en las aplicaciones en el sector del transporte. Sin embargo la tecnología de los motores de combustión interna está bien establecida y es bastante fácil convertirlos desde los combustibles líquidos convencionales al hidrógeno. Por eso algunos fabricantes están trabajando en la modificación de los motores de combustión interna para que puedan funcionar con hidrógeno.

La mayoría de las turbinas de gas de hoy en día son demasiado grandes para que puedan ser utilizadas en los vehículos. Sin embargo, los departamentos de investigación y desarrollo de países como Alemania y Estados Unidos intentan desarrollar pequeñas turbinas de gas para hidrógeno apropiadas para los vehículos de carretera.

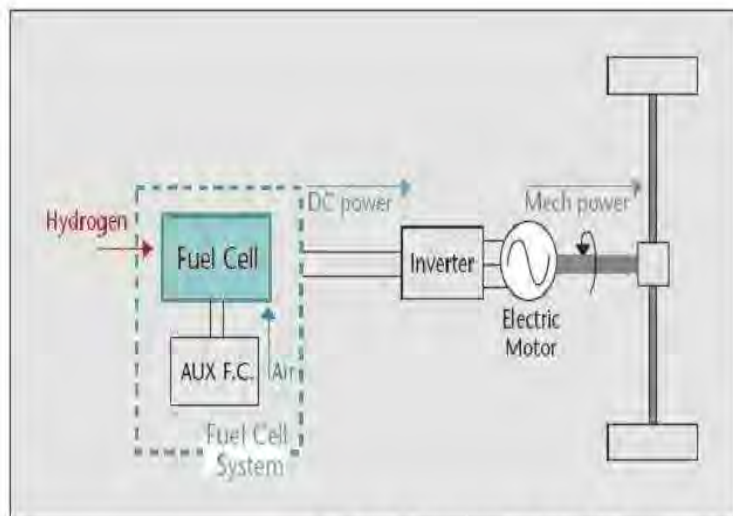
El uso más avanzado del hidrógeno en el sector del transporte es en los vehículos de motor, especialmente los coches. Esta es la razón por la cual los fabricantes de automóviles de todo el mundo están invirtiendo grandes sumas de dinero en la investigación del hidrógeno. Aunque los vehículos de células de combustible todavía no son rentables, en la mayoría de los países industrializados se están llevando a cabo esfuerzos de financiación de proyectos de demostración de por ejemplo en autobuses con emisiones nulas. Además, muchos de los mayores fabricantes de vehículos del mundo han presentado prototipos de vehículos de células de combustible, e incluso han empezado a alquilar pequeños números de estos vehículos a algunos clientes seleccionados.

Aunque los prototipos de vehículos de células de combustible todavía no pueden alcanzar en prestaciones a los vehículos de diesel o gasolina convencionales, tienen mucho mayor alcance que los vehículos de baterías. Las células de combustible superan mejor los problemas de autonomía asociados a los vehículos eléctricos que usan acumuladores para almacenar la electricidad. Ya que el medio de almacenamiento químico como el hidrógeno tiene mayor densidad energética que los acumuladores. Además se pueden recargar en pocos minutos, mientras que

recargar una batería de un vehículo requiere horas. Por otro lado, las células de combustible pueden suministrar una fuente de energía eléctrica a bordo, una unidad auxiliar de potencia, en los coches convencionales o en los camiones, habilitando un uso más limpio y eficiente que la propulsión con motores de combustión, sobre todo si el tráfico está congestionado. También pueden proporcionar energía eléctrica a bordo de los barcos, e incluso propulsión, especialmente en aquellas zonas sensibles donde sólo se permiten barcos de bajas emisiones.

#### Funcionamiento de un vehículo impulsado con célula de combustible

La célula de combustible genera electricidad que mueve un motor eléctrico. Apesar de que tiene dos pasos de conversión de energía, los motores de combustión interna sólo uno, la eficiencia global puede ser mayor ya que la célula de combustible, pero sobretodo el motor eléctrico tienen unas eficiencias de conversión individual muy altas.



Fuente: [www.risoe.dk/frispubl/energy\\_report3/ris-r-1469\\_summary.pdf](http://www.risoe.dk/frispubl/energy_report3/ris-r-1469_summary.pdf)

**Figura 54.** Funcionamiento de un vehículo impulsado con una célula de combustible

La principal barrera tecnológica para el desarrollo del hidrógeno en el sector del transporte es el almacenamiento del hidrógeno. La baja densidad del hidrógeno dificulta el almacenamiento de suficiente cantidad de hidrógeno a bordo, como para permitir una autonomía suficiente sin que el contenedor de hidrógeno sea demasiado grande o demasiado pesado.

En la Figura 55 se comparan distintas formas de almacenar hidrógeno. La masa de hidrógeno almacenado sería de algo menos de cinco kilogramos, sin embargo el peso del tanque sería de hasta veinticinco veces más en el caso de almacenamiento como metal hidruro o de trece veces más en el caso del hidrógeno comprimido. El volumen que ocupa el almacenamiento del hidrógeno también es muy importante. En el dibujo se observa la relación con un turismo de gama media. En relación con el alcance que aparece en la tabla, se debe entender de forma orientativa ya que esto dependería del modelo y marca del vehículo, del tipo de propulsión de la velocidad entre otros.

Por otro lado está el tema de las emisiones. Los fabricantes de automóviles se tienen que enfrentar cada vez a más restricciones en las emisiones contaminantes. Refinamientos en la tecnología de los motores convencionales podrán, probablemente, ajustarse a las restricciones en contaminantes como el NOx y los hidrocarburos inquemados, sin embargo, las restricciones sobre las emisiones de

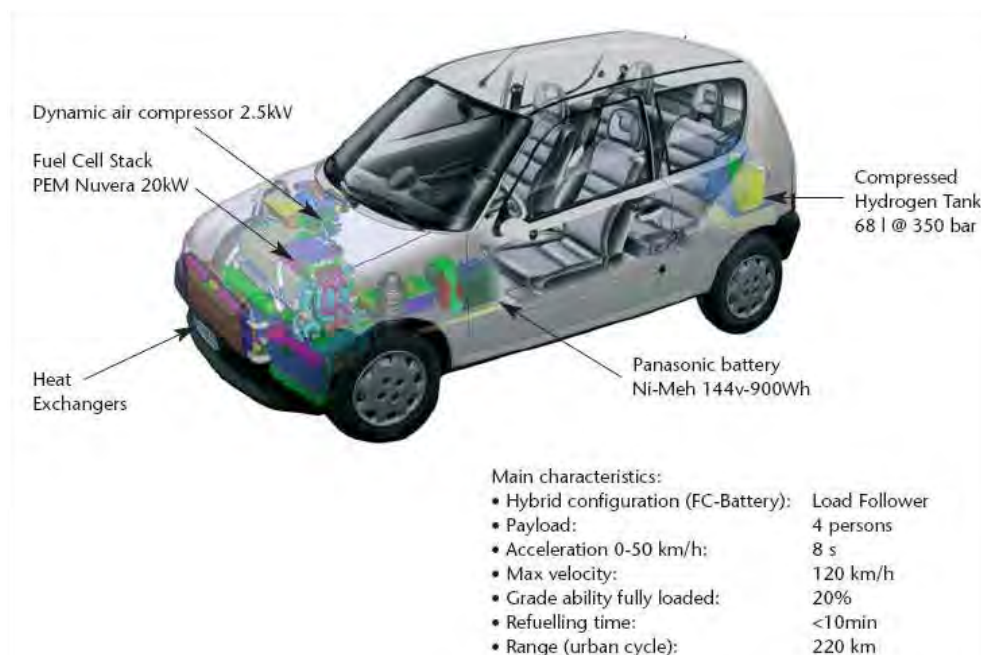
CO<sub>2</sub> necesitan de mejoras en los combustibles que son más difíciles de solventar, ya que en los combustibles convencionales una cantidad dada de energía está asociada a una cantidad fija de CO<sub>2</sub>. La solución puede que sea el uso de motores de combustión interna con hidrógeno, o células de combustible. Los motores de combustión interna que funcionan con hidrógeno emiten NOx, pero el combustible al no tener carbono, el escape no contiene ni CO<sub>2</sub> ni hidrocarburos inquemados.

<i>On-Board Storage Comparison</i>			
<i>Storage Parameter</i>	<i>C-H<sub>2</sub></i>	<i>L-H<sub>2</sub></i>	<i>Metal Hydride</i>
<i>Fuel mass (kg)</i>	4.7	4.7	4.7
<i>Tank mass (kg)</i>	~63-86	18.6	120
<i>Mass of Fuel system (kg)</i>	~67-90	23.3	124.7
<i>Volume (liters)</i>	408-227	177.9	120
<i>Range (km)</i>	600	600	570



**Figura 55.** Formas de almacenamiento de Hidrógeno

En la Figura 56 se puede observar la posible disposición de los distintos elementos de un sistema de un vehículo impulsado por una célula de combustible.



**Figura 56.** Vehículo impulsado por célula de combustible



Dos recientes estudios, uno europeo y otro norteamericano, analizan el uso energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) para un amplio rango de combustibles. En dichos informes se diferencia entre las distintas formas de producir hidrógeno. En las Figuras 57 y 58 sólo se refleja la producción como reformado de gas natural y por la electrolisis del agua, con algunas variaciones como que la producción sea centralizada o distribuida, y la producción de energía eléctrica sea fruto de una mezcla de las distintas formas convencionales o provenga de la energía eólica. Y lo compara con la gasolina convencional, con el diesel y con los vehículos eléctricos híbridos.



Figura 57. Uso energético, de acuerdo al estudio Europeo

El estudio europeo concluye que, con excepción de las energías renovables, los vehículos híbridos de células de combustible (FCHV, fuel cell hybrid vehicles) que usan hidrógeno comprimido reformado del gas natural, tienen las menores emisiones de efecto invernadero en una base del pozo a la rueda. Éstos también son los que menos cantidad de energía necesitan, prácticamente empatados con los vehículos híbridos de célula de combustible que utilizan un hidrógeno producido por electrolisis con energía renovable del viento. Las emisiones de efecto invernadero del hidrógeno producido por la energía del viento son nulas. Los vehículos híbridos de células de combustible que utilizan hidrógeno producido a partir de la electrolisis de la actual mezcla de energías convencionales utilizan mucha energía y emiten muchos gases de efecto invernadero, debido a que se utiliza el carbón y otros combustibles fósiles para la producción de energía.

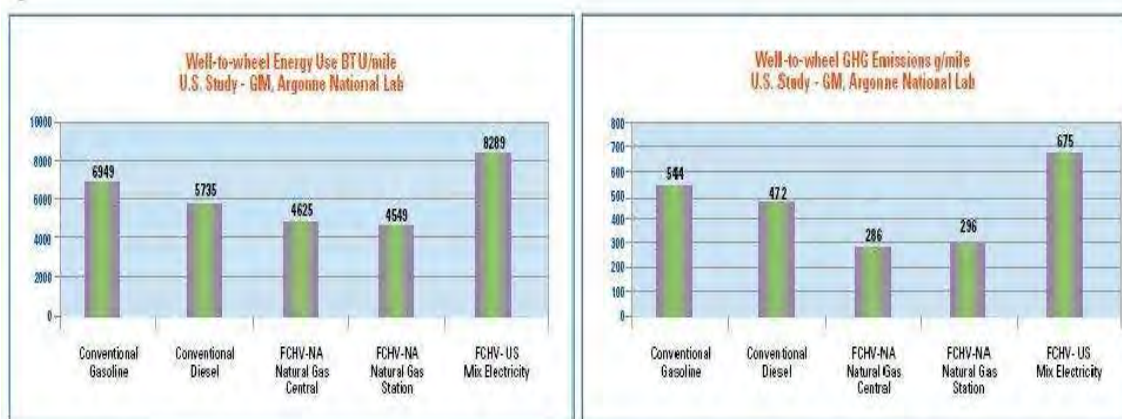


Figura 58. Uso energético, de acuerdo al estudio Americano

Igualmente, el estudio norteamericano, muestra que los vehículos de células de combustible que utilizan hidrógeno comprimido reformado del gas natural tienen menor utilización de energía que los vehículos convencionales de gasolina o diesel. Al igual, son los que tienen las menores emisiones de efecto invernadero. Los vehículos híbridos de célula de combustible que utilizan el hidrógeno producido por vía electrolisis con el pool energético actual de los Estados Unidos, tienen grandes consumos de energía y altas emisiones de gases de efecto invernadero, debido, del mismo modo que ocurría en el estudio europeo, que la energía eléctrica procede del carbón y de otras fuentes fósiles. El estudio norteamericano no analizó el hidrógeno producido a partir de fuentes renovables.

Con esto lo que se demuestra, no es que sea más limpio la producción vía reformado de gas natural que la electrolisis, sino que actualmente la energía eléctrica que se produce de forma mayoritaria procede de fuentes fósiles, es decir, de grandes contaminantes, y como la electrolisis requiere del gasto de una gran cantidad de energía, hace que el proceso global, tenga mayores emisiones que los combustibles tradicionales de transporte. Tal y como vimos en el apartado de producción del hidrógeno. La utilización de la electrolisis sólo se justifica si la electricidad necesaria se obtiene a partir de energías renovables.

#### **Ventajas del uso del hidrógeno en el sector del transporte:**

- Los motores de combustión interna alternativos convencionales con ligeras modificaciones pueden funcionar con hidrógeno.
- El hidrógeno puede ser producido en el hogar, a partir de la generación distribuida.
- Aunque actualmente la infraestructura de hidrogenadoras es prácticamente inexistente, en el futuro, el hidrógeno puede representar más seguridad energética que los combustibles fósiles, debido a la no dependencia entre países.

#### **Ventajas concretas de los vehículos de células de combustible que funcionan con hidrógeno:**

- Han demostrado tener unas eficiencias mayores que los coches de combustión interna alternativos que funcionan con gasolina o diesel.
- Tienen emisiones nulas de CO<sub>2</sub> o de gases de efecto invernadero\*, sólo emiten H<sub>2</sub>O.
- Tienen una alta aceleración.
- Tienen una conducción muy suave y refinada.
- Al contrario de los motores de combustión interna alternativos, la célula de combustible es muy silenciosa.
- Pueden proporcionar electricidad a bordo con alta eficiencia.
- Podrían producir electricidad para las casas, oficinas y localizaciones remotas.
- Inconvenientes del uso del hidrógeno en el sector del transporte.
- Problemas con el almacenamiento del hidrógeno.
- Coste elevado de las pilas de combustible.

- Coste elevado del resto de dispositivos necesarios en el sistema.
- Necesario mejorar las prestaciones a temperaturas bajo cero.
- Necesario mejorar la tolerancia en las pilas de combustible al monóxido de carbono y a otros contaminantes presentes en el hidrógeno procedente de combustibles fósiles o de la biomasa.
- Necesario demostrar la durabilidad de los componentes individuales del sistema completo de propulsión.

#### 2.4.4.- APLICACIONES ESPACIALES

El transporte aeroespacial es actualmente el mayor consumidor de hidrógeno líquido. Durante años, se ha usado el hidrógeno líquido, en combinación con el oxígeno líquido, como combustible de alta energía. La ventaja principal es el alto impulso específico que tiene la combinación hidrógeno-oxígeno. Esto unido al bajo peso molecular y a la alta temperatura de llama, hacen del hidrógeno el mejor combustible líquido para los cohetes. El hidrógeno líquido fue utilizado como combustible de los cohetes lunares Apolo segundo y tercero. El hidrógeno también se ha utilizado para la flota actual de "Space Shuttles", cuyos tres motores principales montados en la cola se abastecieron con un tanque de almacenamiento de combustible que contenía hidrógeno y oxígeno líquido.

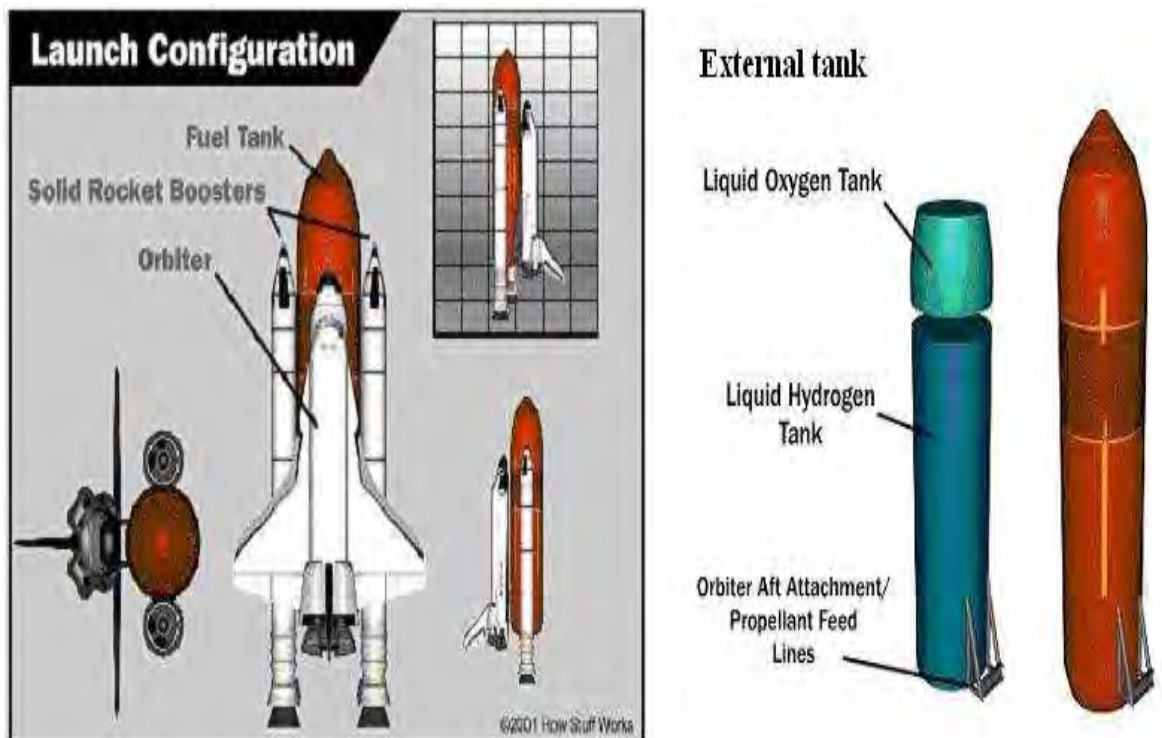


Figura 59. Esquema de un Space Shuttle



**Figura 60.** Lanzamiento del Space Shuttle

Las ventajas que encontraron los ingenieros en el uso del hidrógeno como combustible de las aeronaves fueron las siguientes:

- Mejores características de eficiencia y seguridad.
- Minimizar la contaminación.
- Ser más ligero y silencioso.
- Necesita menor superficie de alas y menores espacios de despegue.
- Debido a la ausencia de carbón en el combustible, se reducían los costes de operación y mantenimiento de los ingenieros.
- El ruido del despegue se reducía un tercio.



## 2.4.5.- APLICACIONES MILITARES

El bombardero B-57 de las fuerzas armadas de los Estados Unidos fue el primer avión que se modificó para que usara hidrógeno líquido como combustible. La modificación fue llevada a cabo por la NASA en 1956.



**Figura 61.** Bombardero B-57 de la Fuerza Aérea de U.S. con Hidrógeno Líquido como combustible

La NASA es el primer consumidor de hidrógeno del mundo. Los departamentos de defensa están invirtiendo en la investigación y desarrollo del hidrógeno como combustible. Teniendo en cuenta que en Estados Unidos el ejército es el mayor consumidor de petróleo, se hace necesario, sobretodo en este sector, no depender de un recurso externo a su país.

Las células de combustible podrían ayudar a reducir el coste de la logística en el campo de batalla, proporcionando una fuente de energía a los soldados modernos, ahorrando dinero y reduciendo la contaminación en las instalaciones militares, en los buques y en los vehículos terrestres, y sobretodo reducir el revelador ruido. Más del 70% del tonelaje requerido para posicionar al ejército de los Estados Unidos en el campo de batalla es combustible. Las células de combustible tienen un amplio potencial en las aplicaciones de defensa, ya que proveen de un sistema de generación de energía silencioso, en lugar de los generadores diesel, como generadores de energía para los tanques o produciendo altos niveles de energía en los avanzados uniformes de los soldados. El mercado de defensa es menos sensible al coste que los mercados privados, y puede proporcionar una excelente oportunidad para el desarrollo de la tecnología.

# CAPÍTULO III

## CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA DE HIDRÓGENO, MATERIALES, PRUEBAS Y FUNCIONAMIENTO

### Objetivo general

El objetivo es realizar un dispositivo que sea capaz de producir gas oxihidrógeno empleando el proceso de electrólisis en una solución iónica de agua, cuya energía sea suministrada por una fuente eléctrica (batería de automóvil) llamado celda electrolítica, divide en 2 tipos: celda seca y celda húmeda. El gas obtenido en este proceso es la combinación de 2 elementos muy comunes para nosotros y muy abundantes en la naturaleza, el Hidrógeno y el oxígeno, conocido como gas El oxihidrógeno (HHO) o gas "hydroxi". Este gas se introduce en el múltiple de admisión del motor, en la toma de aire del motor, antes de la mariposa o cuerpo de aceleración, ya sea el motor carburado, diésel o con cualquier variante de inyección electrónica. Posteriormente llegar a la cámara de combustión, para mezclarse con el combustible fósil y, en el proceso de explosión producido por la chispa de la bujía en motores a gasolina o por la temperatura elevada que produce la compresión del aire en el interior del cilindro en los motores diésel. Los beneficios en teoría deberán ser inmediatos, con un mayor rendimiento en Km/Lts., en cualquier tipo de conducción y terreno, gases de escape más limpios y menos dañinos para el ambiente.

### 3.1.- CELDA ELECTROLÍTICA PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

#### Definición

Se denomina celda electrolítica al dispositivo utilizado para la descomposición mediante corriente eléctrica de sustancias ionizadas denominadas electrolitos.

Los electrolitos pueden ser ácidos, bases o sales.

Al proceso de disociación o descomposición realizado en la célula electrolítica se le llama electrólisis.

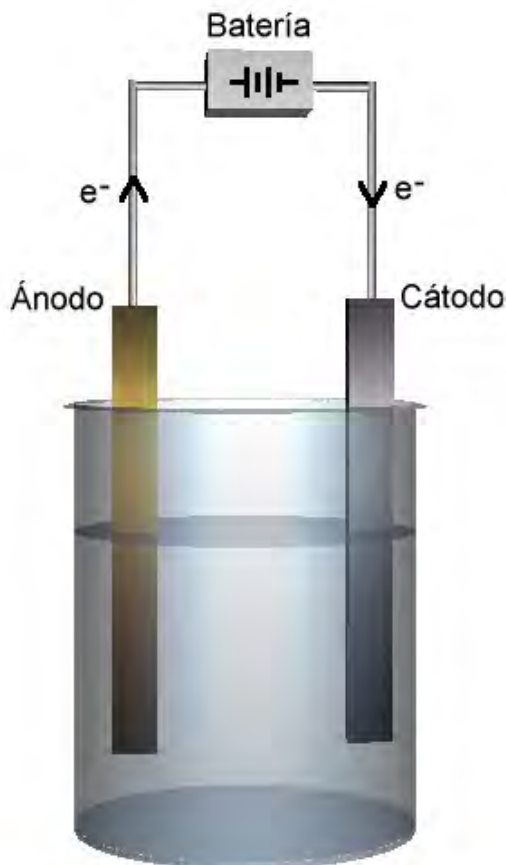
En la electrólisis se pueden distinguir tres fases:

**Ionización:** Es una fase previa antes de la aplicación de la corriente y para efectuar la sustancia a descomponer ha de estar ionizada, lo que se consigue disolviéndola o fundiéndola.

**Orientación:** En esta fase, una vez aplicada la corriente los iones se dirigen, según su carga eléctrica, hacia los polos (+) o (-), correspondiente.

**Descarga:** Los iones negativos o aniones ceden electrones al ánodo (-) y los iones positivos o cationes toman electrones del cátodo (+).

Para que los iones tengan bastante movilidad, la electrólisis se suele llevar a cabo en disolución o en sales. Salvo en casos como la síntesis directa del hipoclorito sódico los electrodos se separan por un diafragma para evitar la reacción de los productos formados.



**Figura 62.** Componentes básicos para el proceso de electrólisis.

A principios del siglo XIX, Faraday, científico inglés que descubrió que las soluciones acuosas de ciertas sustancias conducían la corriente eléctrica, mientras que el agua pura y las soluciones de otras no la conducían, Faraday llamó electrolitos a las sustancias cuyas soluciones acuosas conducen la corriente y no-electrolitos a las sustancias que no son descompuestas por la electricidad.

En 1830 Faraday comenzó sus experimentos para determinar los principios que relacionan la cantidad de material que se remueve o se deposita durante la electrólisis, entendiéndose que entre más tiempo se le aplique la corriente a la solución, más grande es la cantidad de iones separados, mientras que la masa que se acumula en el electrodo debe ser igual a la masa atómica del mismo electrodo, pero inversamente proporcional en las valencias entre ión y electrodo.

### 3.2.- ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La base teórica sobre la cual dispusimos la creación del dispositivo se fue recopilando desde los primeros intentos para el uso del hidrógeno. El desarrollo de tecnologías que tienen como base el hidrógeno, se han implementado desde el siglo XIX. En sus inicios dicha tecnología carecía de verdaderos sustentos tecnológicos, así como implementaciones para el desarrollo aplicado en la de energía convencional. Los primeros avances en una celda de hidrógeno, en estricto sentido, fueron realizados en 1838, cuando el científico Christian Friedrich Schönbein descubrió el principio del funcionamiento de la propia celda. Estas investigaciones fueron publicadas en enero del siguiente año en la revista "Philosophical Magazine", hecho por el cual pudo continuar con el avance en diversas investigaciones hasta el punto de desarrollar nitrocelulosa. Esto con la oxidación lenta del fósforo blanco y la electrólisis del agua.

Posteriormente, y con base en las investigaciones de Schönbein, Sir William Grove, un científico galés, pudo implementar el primer modelo de una célula de combustible, utilizando materiales similares a los usados para la célula de ácido fosfórico, pero no fue hasta 1940 cuando, Francis Thomas Bacon, desarrolló una celda doble. Usando dos unidades: la primera como fuente para la generación de hidrógeno, y la segunda para el uso propio de pila de combustible. Con esta tecnología logró utilizar la pila como una unidad reversible, es decir, que lo podía usar como electrolizador (unidad para realizar la electrólisis) y como pila de combustible.

El progreso de sus investigaciones fue en 1959, cuando desarrolló con éxito la primera célula estacionaria de combustible. En un principio aplicó los avances que había hecho anteriormente Grove, utilizando platino activado como los electrodos y ácido sulfúrico como el electrolito.

Posteriormente cambió los materiales, sustituyendo a los electrodos con níquel activado, y al electrolito con una solución acuosa de hidróxido de potasio. A pesar de estos avances, aunado a las investigaciones de Bacon, la compañía General Electric desarrolló la primera pila de membrana de intercambio de protones, unidad funcional que usaba el hidrógeno para la producción de energía eléctrica. Este aparato fue desarrollado para ser utilizado en las misiones espaciales Gemini de la NASA.

A partir de este hecho, las celdas de hidrógeno fueron utilizadas en los años noventa en programas espaciales, debido al alto costo que representaba su uso comercial. Sin embargo, en la década de los ochenta y noventa, las celdas de combustible se convirtieron en una opción real para uso más amplio. Gracias al desarrollo de innovaciones como el uso de un catalizador con menos platino, o electrodos de película fina, fue posible que los costos de las celdas bajaran, y con ello se impulsó la implementación de estos equipos en diversas y más prácticas aplicaciones.

Las investigaciones que se ciernen sobre este tema no son de un trasfondo caduco, por el contrario, representan grandes progresos para la tecnología, tanto espacial como la que se usa en nuestra cotidianidad. Así como avances en la comprensión de los propios procesos fisicoquímicos que se presentan en torno a estos dispositivos. En el año 2007, Gerhard Ertl, un físico alemán, fue condecorado con el premio Nobel de química debido a sus investigaciones en torno a cómo funcionan las pilas de combustible. Los inicios de sus investigaciones comenzaron en la década de los sesenta. Gerhard Ertl fue uno de los primeros científicos en ver y desarrollar el potencial de las nuevas técnicas surgidas a partir de los procesos implementados en la industria de los semiconductores en esta década. Las exploraciones que comenzó a hacer fueron referidas a un proceso conocido como Haber-Bosch, en el cual se extrae nitrógeno del aire para su inclusión en los fertilizantes artificiales.

Los experimentos de este físico alemán requirieron el uso de avanzados equipos para la realización de estudios en un vacío casi total, para cumplir objetivos como observar el comportamiento de las capas de átomos individuales y de las moléculas sobre la superficie de un metal extremadamente puro. Según el comunicado sobre las investigaciones de Gerhard Ertl, éstas son útiles “para la industria química y pueden ayudar a entender procesos tan variados como por qué se oxida el acero, cómo funcionan las pilas de combustible o cómo actúan los catalizadores en nuestros automóviles”.

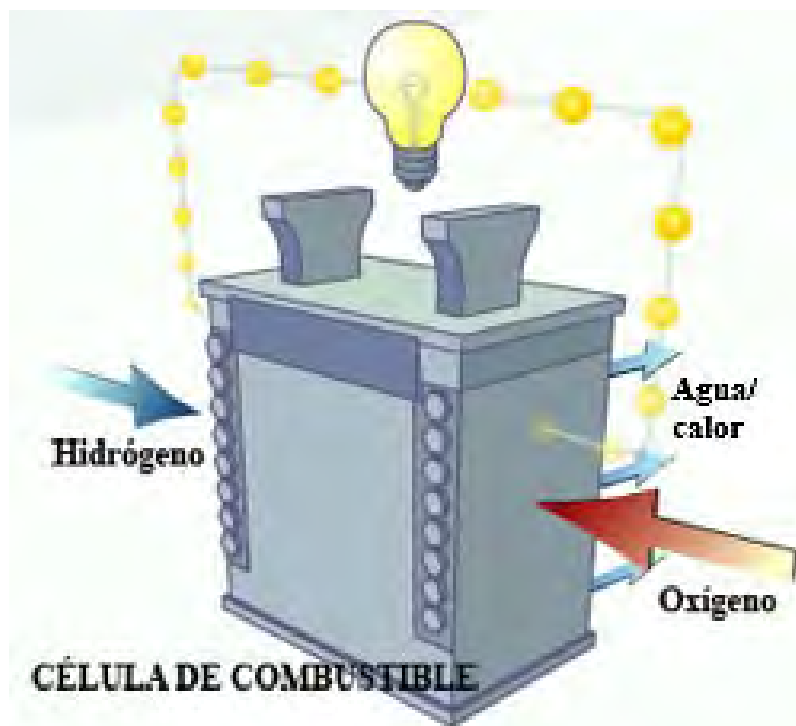
### **3.2.1.- TIPOS DE CELDAS DE HIDRÓGENO**

En las celdas de hidrógeno existen dos generalidades o tipos de las mismas:

La primera sólo constituye un implemento por el cual es posible obtener el hidrógeno. La segunda es útil para la transformación del hidrógeno en energía. Ambas pueden funcionar a partir de una misma fuente primaria, que es el agua. Sin embargo, estos dos implementos para la celda pueden complementarse y, por lo tanto, optimizar el proceso de obtención de energía.

Los dispositivos especializados en la transformación del hidrógeno en combustible pueden ser conocidos como celda, célula o pila de combustible, el cual se considera un módulo electroquímico. Debido a que es utilizado como fuente directa de energía, este aparato posee características similares a las pilas convencionales, con la diferencia de que las celdas de hidrógeno permiten el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos. Este dispositivo es capaz de producir electricidad a partir de una fuente externa de combustible y de oxígeno, así como hacer que sus electrodos sean catalíticos y relativamente estables. Uno de los ejemplos fundamentales e importantes de una celda de combustible es la celda de hidrógeno/oxígeno, que tienen como materia prima el agua y son usadas en misiones espaciales. Las ventajas que presenta este sistema es la alta densidad de corriente de intercambio de la reacción de hidrógeno. Desafortunadamente, la reacción del oxígeno tiene una baja densidad de corriente de intercambio. Sin embargo, una de las formas para inhibir esta dificultad es utilizando una superficie catalítica, con un área superficial amplia.

La celda de combustible consiste en dos electrodos separados por un electrólito. Dicha disposición de los dispositivos permite que el oxígeno pase sobre un electrodo y el hidrógeno sobre el otro. Cuando el hidrógeno es ionizado pierde un electrón y, al ocurrir esto, ambos (hidrógeno y electrón) toman diferentes caminos hacia el segundo electrodo. El hidrógeno migra hacia el otro electrodo a través del electrólito, mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor.



**Figura 63.** Funcionamiento de una célula de combustible.

Este proceso producirá agua, corriente eléctrica y calor útil. Para generar cantidades utilizables de corriente, las celdas de combustibles son "amontonadas" en un emparedado de varias capas.

El principio que se utiliza en una celda de combustible es generar electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente sin ninguna combustión. Entre las ventajas que ofrece esta tecnología es su constante reabastecimiento, es decir, la fuente por la cual se obtiene la materia prima para la producción de este tipo de energía no se agota ni requiere de una renovación posterior al inicio de su producción. Producirá energía en forma de electricidad y calor mientras se le provea de combustible. El único subproducto que se genera es agua 100% pura.

Esta celda de combustible ha demostrado ser muy útil para sistemas combinados de calor y energía. Dichos sistemas de calor disipado se utilizan, entre otras cosas, para edificios o para realizar trabajo. La eficiencia de una planta de estos sistemas puede alcanzar el ochenta por ciento. La potencia de las baterías de estas celdas ha alcanzado el orden de 10MW.

En segundo lugar se encuentra la celda especializada sólo en la obtención de hidrógeno, la cual también es conocida como célula electrolítica, debido al proceso de electrólisis que lleva a cabo, proceso que se explicará más adelante. En este dispositivo dos electrodos están en contacto con una disolución iónica en el que, gracias a las reacciones de oxidación-reducción que tienen lugar en su interior, se da un intercambio de energía. Estos electrodos son incididos por una corriente eléctrica externa. Esta célula es la encargada directa de generar hidrógeno, el cual se obtiene en su estado gaseoso, lo cual hace necesario su almacenamiento para posteriormente utilizarlo. El uso para el que se puede emplear, en el estado de agregación que se encuentra el hidrógeno, es como combustible, y como ya se ha mencionado antes, el hidrógeno es el mejor combustible que se haya encontrado.

Para la obtención de hidrógeno a partir de este tipo de celda, es necesario el uso de un proceso fisicoquímico conocido como electrólisis. Este proceso implica dos elementos: un electrolito, sustancia que contiene iones libres, los cuales se comportan como un medio conductor eléctrico; y un electrodo, que es una sustancia especializada en conducir electricidad y, por lo tanto, suministra o atrae electrones a un medio. La combinación de estos dos elementos, al encontrarse ambos en disolución y bajo la acción de una corriente eléctrica continua, induce reacciones de oxidación reducción no espontáneas.

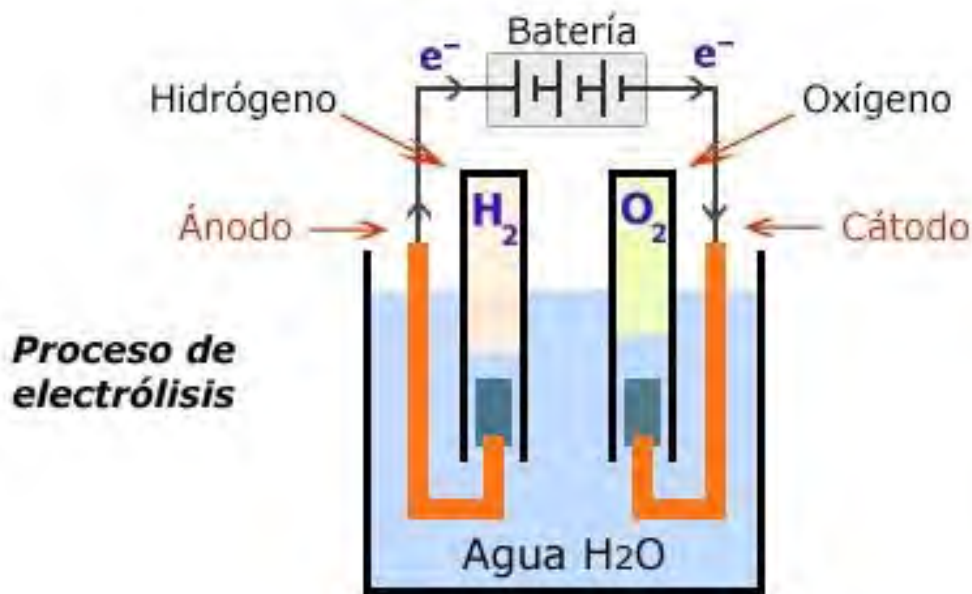


Figura 64. Proceso de electrólisis.

En el caso más específico, el proceso electrolítico que se lleva a cabo en una celda electrolítica, como la que se presenta en este experimento, es una electrólisis específica al agua. Ésta tiene como fin el descomponer el agua ( $H_2O$ ) en los gases oxígeno ( $O_2$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ) por medio de la corriente eléctrica propia de una electrólisis. En este proceso, se coloca una fuente de energía eléctrica, conectada a

dos electrodos, o dos platos (típicamente hechos de algún metal inerte, como el platino o el acero inoxidable), los cuales son puestos en el agua.

La electrólisis es un proceso fisicoquímico de descomposición de una o varias sustancias en iones por medio de una corriente eléctrica continua. Ésta fue descubierta accidentalmente por William Nicholson y Anthony Carlisle en 1800 mientras estudiaban el funcionamiento de las baterías. Para su desarrollo, la electrólisis necesita de dos electrodos conectados a una corriente directa de electricidad que pueda ser conducida por un electrolito.

Debido a la atención que llamó el proceso electrolítico en 1834, un científico inglés, conocido como Michael Faraday, intentó explicar y dar relaciones cuantificables y comprobables del fenómeno. Es por ello que en el mismo año, tras repetir el experimento, determinó dos leyes, las cuales explican las relaciones entre los fenómenos que se presentan en la electrólisis. Dichas leyes se conocen como las Leyes de Faraday para la electrólisis, para el funcionamiento de este dispositivo se tomó en cuenta la Primera ley de Faraday de la electrólisis, la cual dice que: **“la masa de los elementos separados por el paso de una corriente eléctrica directa a través de una sal disuelta o fundida es proporcional a la cantidad de carga eléctrica que pasa por el circuito (Atkins y Levine)”**.

La primera ley estipula que 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 ley propone que cuando la misma corriente circula durante el mismo tiempo, las cantidades de sustancia depositadas dependerán de su peso equivalente. La base funcional de la electrólisis es, como ya se ha mencionado, la disociación, es decir, la separación de la misma en moléculas más pequeñas.

De entre los elementos que componen al fenómeno se encuentran el electrolito, que básicamente es una sustancia que, al encontrarse disuelta o fundida, tiene la capacidad de conducir la corriente eléctrica. Éstos están formados por iones de diferentes cargas: aniones y cationes. Los aniones son iones los cuales han ganado uno o más electrones y, por lo tanto, poseen una carga negativa. Por otra parte, los cationes son iones que se forman al perder uno o más electrones y poseen una carga positiva. Los electrolitos, en la electrólisis, son los encargados de transmitir la corriente eléctrica en todo el sistema. Dependiendo de la magnitud de su constante de ionización, los electrolitos pueden ser considerados fuertes o débiles, es decir, la capacidad que tienen éstos de disociarse. Entre mayor sea la constante de ionización de un electrolito, mayor será la transferencia de energía eléctrica y la cantidad de producto final obtenido. Los electrolitos más fuertes suelen ser compuestos iónicos.

Por otra parte, los electrodos son los conductores eléctricos por los cuales se suministran o atraen los electrones a un medio definido. Normalmente se dividen en dos: los de carga negativa y los de carga positiva. Los electrodos de carga negativa se conocen como cátodos, éstos, en la electrólisis, se cargan de electrones cuando reciben energía de la corriente eléctrica y atraen a los cationes del electrolito,



neutralizándolos. Mientras que los electrodos de carga positiva se conocen como ánodos. Los ánodos, en el momento en que reciben la corriente eléctrica, pierden electrones, por lo que su estado de oxidación aumenta, atrayendo a los aniones del electrolito y neutralizándolos.

El resultado de la electrólisis del agua es una mezcla de hidrógeno diatómico y oxígeno en proporción que se asume de 2:1, misma proporción del agua, y es conocida como oxihidrógeno.

Cuando esta mezcla se enciende, la combustión produce agua y 142.35 kJ (34.116 kilocalorías) de calor por cada gramo de hidrógeno quemado. En este proyecto se toma en cuenta el calor, o la energía calorífica. No obstante, el concepto de calor debe entenderse como el medio por el que la energía se transfiere, ya que el calor se manifiesta debido a una diferencia de temperatura. La energía, en forma de calor, disipada por los distintos sistemas en experimentación, es una energía conocida como energía térmica. Esta energía es la que produce calor, esto debido a los movimientos aleatorios de átomos y moléculas de los sistemas. La obtención de este tipo de energía requiere la energía cinética de un sistema, ya que es una energía que inmediatamente produce calor.

### 3.2.2- TIPOS DE CELDAS ELECTROLÍTICAS

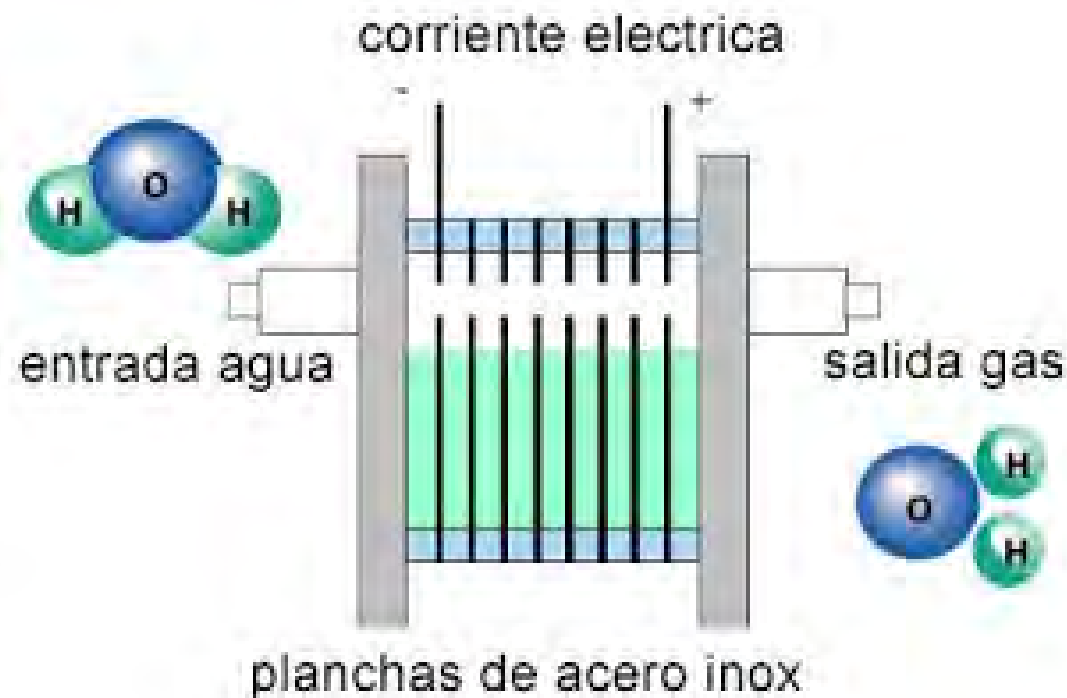
Con base a la información recabada, los antecedentes históricos y fundamentación teórica obtenida para este proyecto hemos llegado hasta este punto el cual es la construcción de nuestra celda electrolítica; existen dos tipos llamados “**celda seca**” y “**celda húmeda**”, de las cuales se obtiene el hidrógeno.

**La Celda húmeda (Wet Cell):** Se llaman húmedas porque la celda entera se sumerge en el bote de agua y queda completamente "húmeda". Las placas de acero no deben tocarse entre sí y algunas de conectaran al polo negativo otras al positivo y otras al neutro. Dependiendo del número de placas y la manera de conectarlas podemos realizar distintas configuraciones.



**Figura 65.** Celda Húmeda.

**La Celda Seca (Dry Cell):** Es un electrolizador, es decir, es un dispositivo utilizado para generar Gas Hidroxi mediante el principio de electrólisis del agua, este auto contiene la solución dentro de sí. Es un diseño más eficiente y de igual dificultad de construcción que una celda húmeda. La diferencia entre una celda seca y una húmeda es la circulación del electrolito. El agua pasa por el interior de la celda y sale convertida en gas como se muestra en la siguiente figura.



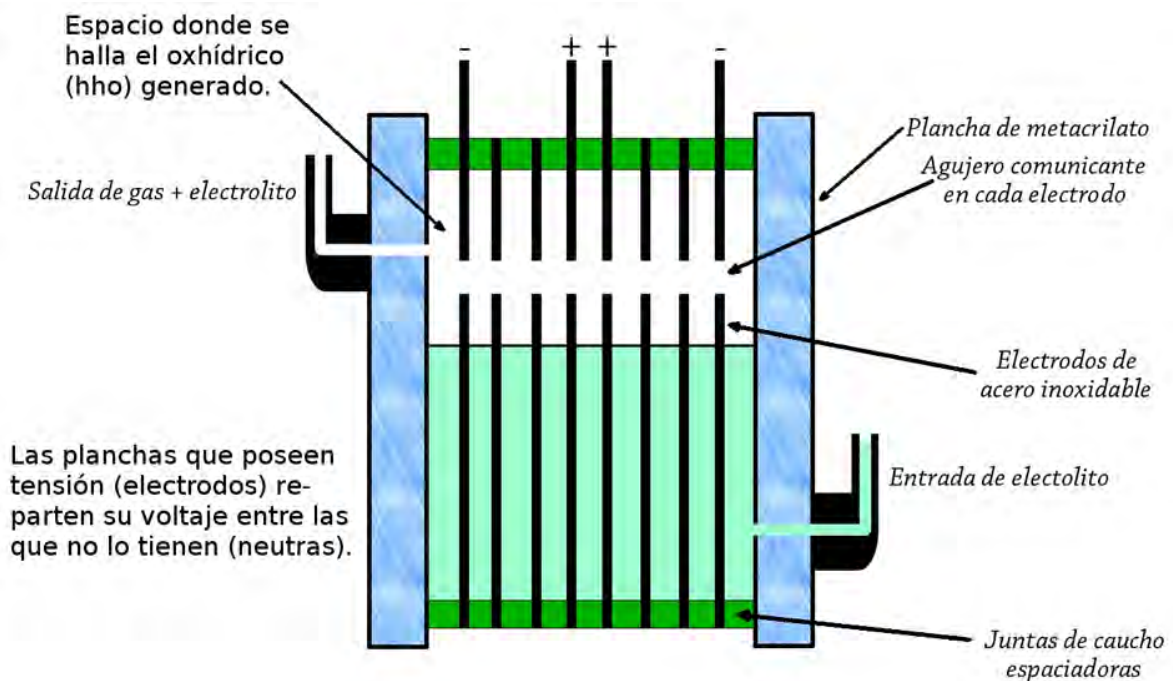
**Figura 66.** Celda Seca.

Para nuestro proyecto, hemos decidido usar un generador de tipo celda seca, ya que al inicio comenzamos con la construcción de una celda húmeda y tuvimos calentamiento excesivo en las placas, en la celda seca el aprovechamiento del agua es casi total y rinde a más baja temperatura, ya que los electrodos están expuestos, debido a esto la Celda Seca puede soportar una mayor cantidad de corriente eléctrica que se transforma en calor, pero que es disipado por las placas externas del electrodo al medio ambiente usando el aire que llega al auto, no así con la Celda Húmeda, pues ésta, por su diseño, no posee una capacidad de disipación de calor tan efectiva. Así, a mayor corriente en la celda, mayor generación de Gas Hidroxi.

### 3.3.- CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA (CELDA SECA)

La construcción de este generador es elaborado de manera no Industrial, así que los elementos designados los puede conseguir en gran parte en lugares normales de distribución. Existen otros Generadores más complejos, pero preferimos este para que todo aquel que esté interesado en adquirir y/o hacer el suyo propio pueda hacerlo.

Se trata de construir un generador de gas oxhídrico (el gas que se obtiene por la descomposición de las moléculas de agua en átomos de hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ )). Mediante una carga eléctrica haciendo uso de electrodos que los excitarán y generarán saltos de tensión, haciendo que las moléculas de dichos productos líquidos se separen en átomos de Hidrogeno y Oxigeno.



**Figura 67.** Componentes principales de una Celda Seca.

El gas producido hacia los cilindros del motor al cual queremos potenciar, el sitio más propicio es mediante el conducto de admisión de aire, esto hace que la mezcla del combustible tenga un mayor grado de eficiencia.

#### 3.3.1.- MEDIDAS DE PRECAUCIÓN

Antes de entrar en detalles de cómo construir la Celda Seca, Debemos de estar informados acerca de que procedimientos deben ser observados, al usarlo en su vehículo. Primeramente el gas hydroxi es muy inflamable y explosivo y debe tomar las medidas de precaución al trabajar en su vehículo, evitando que las conexiones eléctricas estén flojas o con aislaciones defectuosas. La conexión del gas, debe

estar bien asegurada y libre de fugas. Es importante y deseable que el gas se prenda dentro del motor y no fuera de él.

### **3.4.- MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA SECA**

A continuación mostraremos los elementos para la construcción del dispositivo generador de HHO.

#### **Materiales necesarios:**

- Placas de acero inoxidable
- O-rings
- Dos láminas de acrílico
- Tornillos con sus respectivas roscas y arandelas
- Acoples para manguera espina de pescado (si puede encontrarlos del material de teflón mejor)
- Uno o Dos depósitos de agua (pueden ser de pvc)
- Válvulas de seguridad (arresta-llamas), pero si vas a usar Burbujeadores no hay necesidad
- Un Relé de carga
- Abrazaderas para manguera o cinchos de nylon.
- Sosa cáustica (KOH) si pueden conseguirla al 90% de pureza mucho mejor.
- Agua destilada.
- Cable eléctrico calibre 12
- 2 tapas pvc 2"
- Tubo pvc 2"
- 2 conectores plásticos con rosca
- Pegamento para PVC, silicón o plastiacer de Devcon
- Manguera plástica o pvc de 1/2"
- Conectores de cable
- Mini tubería; codos de espiga y conectores "T" o "Y"
- Un conector de bronce para la manguera con hilo NPT (cónico)

#### **Herramientas empleadas:**

- Lijas, pulidoras y esponjas metálicas para pulir con taladro
- Taladro eléctrico
- Soporte vertical para el taladro o un taladro de columna (opcional)
- Brocas de distintos tipos y diámetros (Especiales para abrir acero inoxidable)
- Llaves fijas
- Mazo y martillo
- Reglas, escuadras y rotuladores para marcar y cortar
- Guantes y gafas de protección
- Generador

### 3.4.1.- DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES Y ARMADO DE LA CELDA

#### - Placas de Acero Inoxidable de la Mejor Calidad:

Se recomienda que la calidad sea 316, ya que ésta soporta la corrosión más que las demás, las láminas de acero inoxidable 304 también pueden servir, pero su desgaste es mucho más rápido, pero de igual manera sirve.

Utiliza 5 placas neutrales de 0.018 de espesor en pulgadas (0.48 mm), una positiva y una negativa. Las placas neutrales son para disminuir la aceleración de electrones entre placa y placa, reduciendo así altas temperaturas. Las placas neutrales no se conectan ni entre sí, ni a positivo ni negativo, son neutrales. El tamaño y el espesor y la separación entre placa y placa influyen en el funcionamiento de la celda, así como la calidad del material. En total tenemos 7 placas.

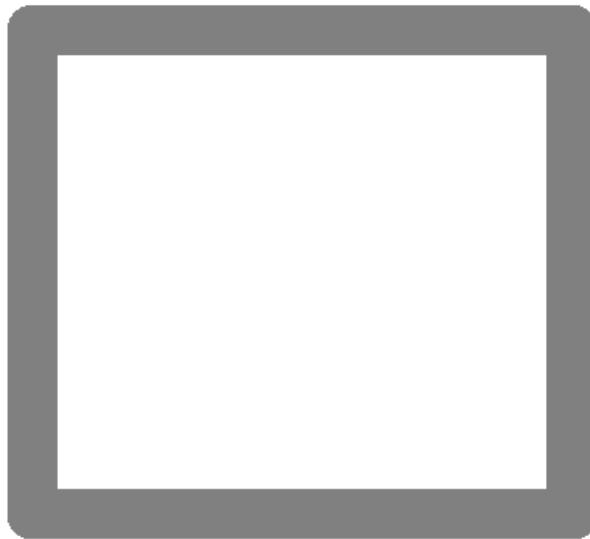


Figura 68. Placa de acero Inoxidable 316.

El tamaño de las placas es de 13 centímetros de ancho x 15 centímetros de largo. Estas medidas están relacionadas con la cantidad de energía por centímetro cuadrado a utilizarse, así como el espesor y la calidad del material para mayor eficiencia.

Se puede reducir el tamaño de estas placas, pero no aumentarlas, si se aumenta el tamaño hay que aumentar el voltaje de entrada. Si se reduce el tamaño, la temperatura de las placas se eleva y al reducir superficie se reduce la producción de gas. Para lograr producciones más altas con menos consumo energético con el fin de hacer funcionar un motor de combustión para automóvil, sólo con HHO como combustible, se requiere un sistema más sofisticado y más costoso que éste.

- **Juntas de Goma o Material Parecido que Soporte Altas Temperaturas y Fuertes Productos Químicos:** Las juntas son de 1.5 cm de ancho, en forma de marco, como se muestra en la siguiente figura, y de 1.2 mm de espesor.

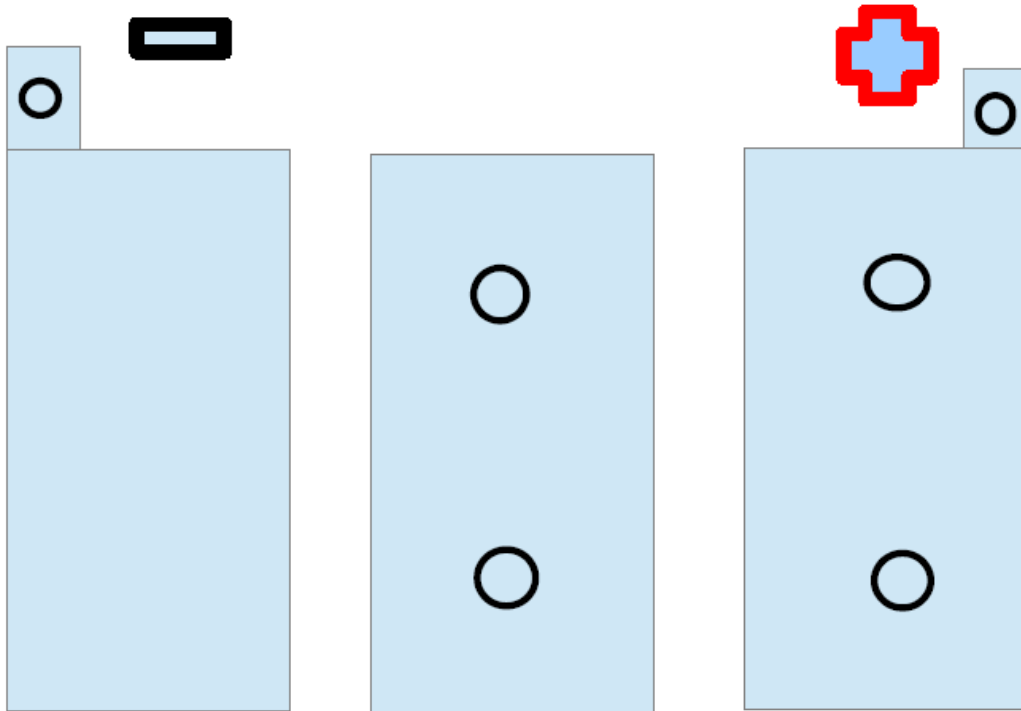


**Figura 69.** Junta de goma.

Estas juntas van entre placa y placa, y esta celda lleva 6 juntas.

**- Las placas son cortadas de la siguiente manera:**

- Las placas neutrales son diferentes de las positivas y negativas.
- Las placas neutrales y las positivas llevan agujeros en el centro de 5/16" de diámetro. Las negativas llevan sólo un agujero en la parte posterior izquierda.
- Las extensiones de metal de las placas positivas y negativas son para las conexiones eléctricas.
- Estas conexiones se logran con tornillos de ¼ de pulgada (6mm) con tuercas.
- Los cables que se utilizan tienen que ser de 6 mm como mínimo de espesor, de varios hilos.



**Figura 70.** Forma de corte de las placas, perforaciones e indicación de placas positivas, negativas y neutras.

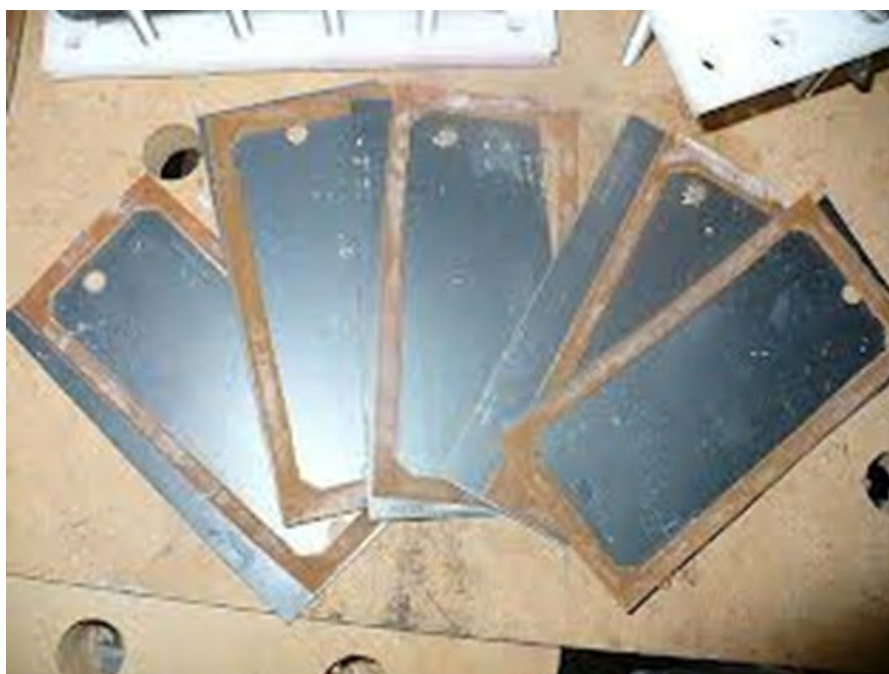
**NOTA:** Un cuidado adicional importante es lavar las placas muy bien con un solvente, antes de ensamblarlas, debido a que las marcas de los dedos, reducen drásticamente la superficie útil y, por tanto, la producción de gas de ellas.

Se debe usar guantes de goma al manipularlas y armar la celda, evitando en todo momento tocarlas con las manos desnudas.





**Figura 71.** Uso de guantes al manipular las placas.



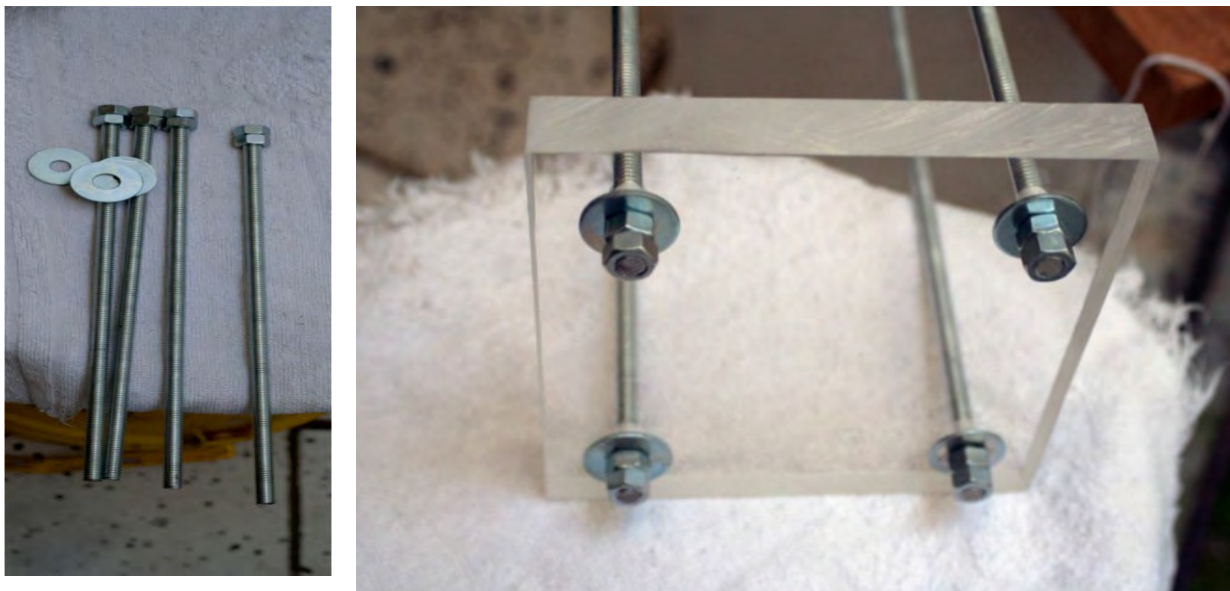
**Figura 72.** Placas de acero con sus respectivas juntas.

**- Prensas para las Placas:**

Para prensar las placas y las juntas pueden ser de nylon, acrílico, de aluminio o de hierro de 1.5 cm de espesor x 16 cm de ancho x 21 cm de largo. Estas planchas llevan 8 agujeros de 7 milímetros de diámetro.

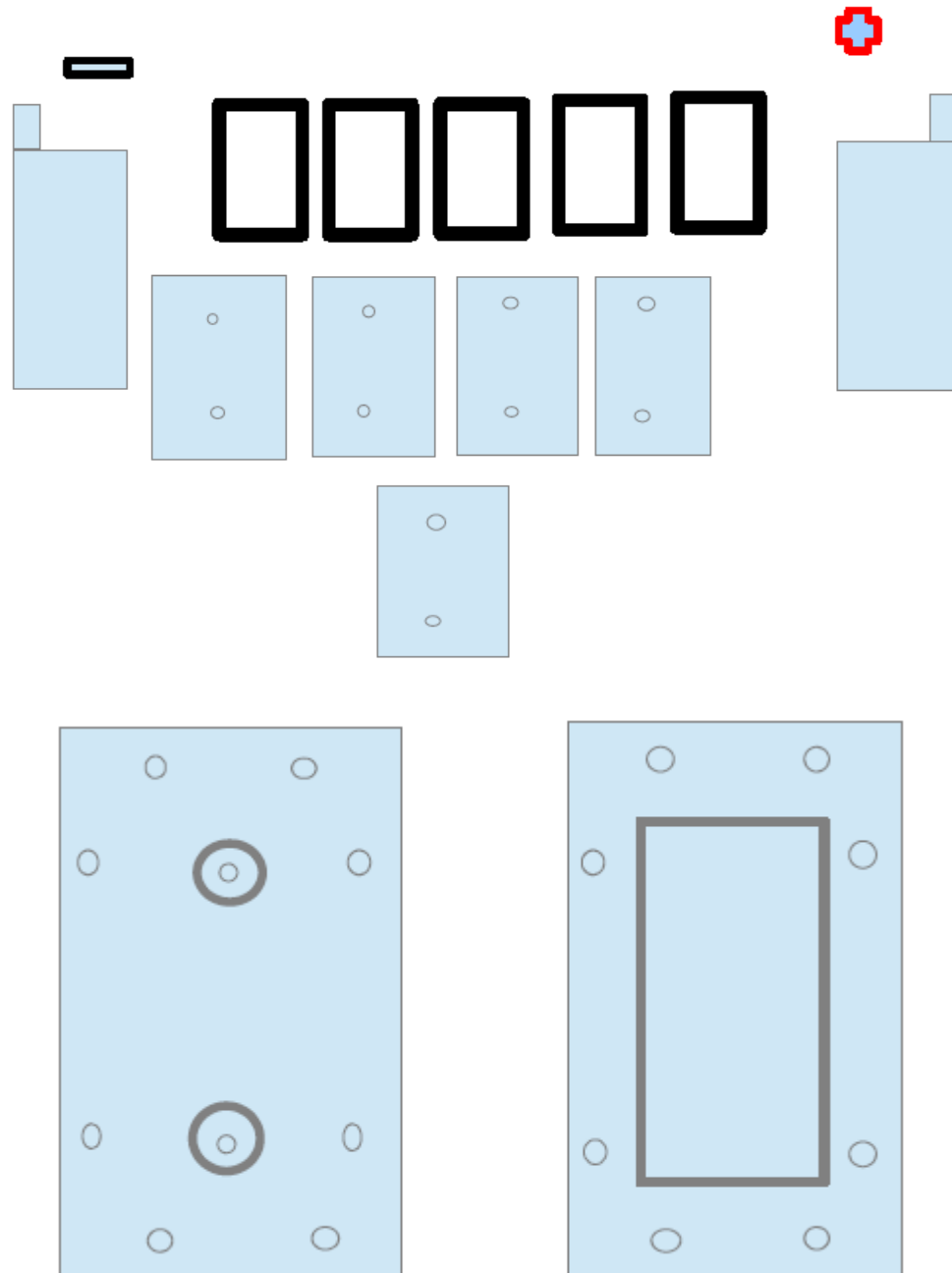


Estos agujeros son para tornillos pasantes con tuercas y arandelas de los dos lados para prensar las placas con sus juntas e impedir así el escape de agua o gas. Una de las planchas de prensa lleva 2 agujeros de 5/16" en el centro, marcadas con círculo rojo y azul. Estos agujeros deben de estar en línea con las placas de metal, son la entrada y salida de agua y gas. Recomendamos utilizar Las láminas de acrílico, ya que hacen un papel importante, al ser transparente podemos llevar un control de la cantidad que tiene el dispositivo cuando tiene el líquido, sirve de soporte de todo el módulo y es resistente al calor.



**Figura 73.** Tornillos pasantes con tuercas y arandelas.

Las Placas llevan agujeros, uno arriba y uno abajo, igual que como se ve en las imágenes siguientes. Entre placa y placa lleva una junta de goma que aguante temperatura de 1 milímetro de espesor. Estas placas y juntas son apretadas por dos planchas de nylon o acrílico de media pulgada de grueso con agujeros para tornillos. Los tornillos son de un 1/4" con tuerca y arandelas.



**Figura 74.** Cantidad total de Placas, Perforaciones y Juntas.

Ya con eso, procedemos a colocarle los acoples para manguera, en los agujeros donde serán los que entra el líquido y sale el gas, se sellan con alguna crema que soporte temperaturas altas, esto se hace para que no tenga ningún escape, sea hermético y la reacción y la potencia sean más efectivos.

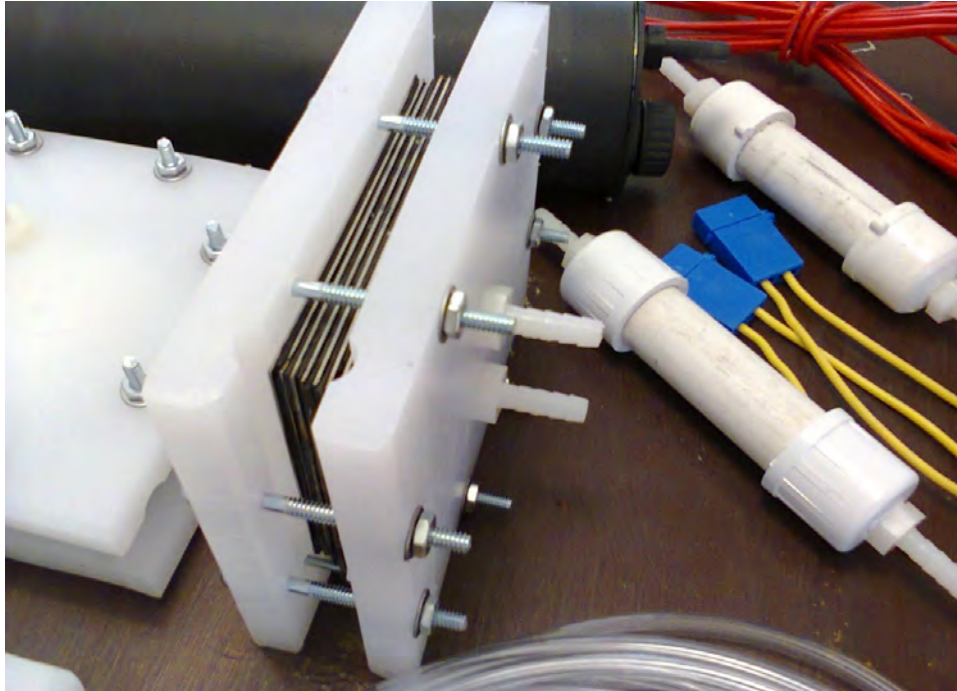


**Figura 75.** Conexiones para manguera tipo NPT macho (cónico).

Una vez ensambladas todas las piezas, nuestra celda se verá de la siguiente manera:



**Figura 76.** Celda terminada con acrílico.



**Figura 77.** Celda terminada con nylon.

- **Circulador de Agua:** Para completar esta parte de la celda se necesita un recipiente de plástico duro que aguante temperaturas altas con capacidad como mínimo de 2 litros. El recipiente debe tener una entrada con tapa hermética de rosca que no permita el escape de gas (los que se usan para reserva de radiadores de autos son eficientes). El recipiente tiene que tener 3 conexiones para manguera tipo NPT macho (cónico) de 6 mm. Estas conexiones se pueden aplicar haciendo agujeros y conectando pipetas de 6 mm, pueden ser metálicas o plásticas. La celda siempre debe estar por debajo del recipiente de agua. Al agua se le agrega 2 cucharadas pequeñas de soda o sosa cáustica en escamas o hidróxido de potasio, esto se hace con el fin de reducir la resistencia del agua como se ha mencionado con anterioridad.





Figura 78. Circulador o Depósito de agua.

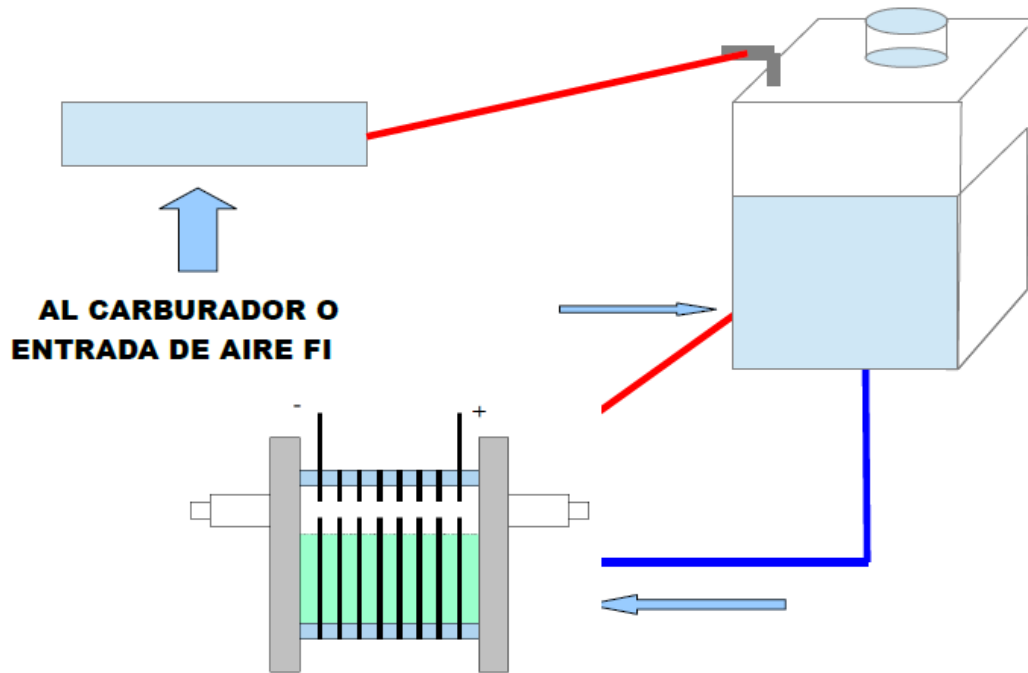


Figura 79. Instalación correcta de la Celda y el Circulador.

**Nota:** Al momento de la instalación de nuestros componentes y para la correcta circulación de agua, el circulador o depósito deberá estar instalado por encima de la celda así el agua contenida podrá llegar a la celda por efecto de la gravedad y regresar nuevamente al depósito pero ya con el gas. Posteriormente el gas obtenido circulara hacia la entrada de admisión de aire.

**- Arrestador de Flama o Arrestallamas:**

Este sistema trabaja en conjunto con la (s) celda (s) productoras de Hidrógeno, eliminado la posibilidad que se genere alguna explosión, ya que no hay que olvidar que el gas producido por las celdas es combustible y requiere el mismo cuidado y trato que cualquier elemento explosivo. Este dispositivo puede estar constituido por arena y vidrio molido en cantidades 2/3 de arena por 1/3 de vidrio.

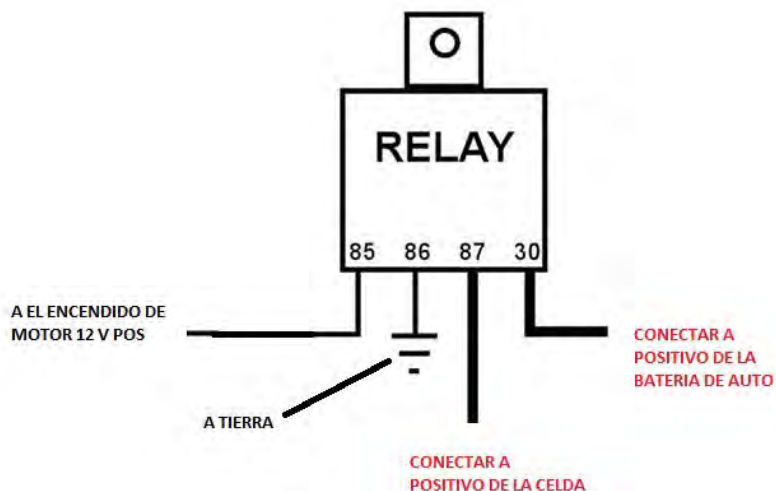


**Figura 80.** Arrestador de flama o Arrestallamas.

**- Conexión de la Celda:**

La celda debe producir gas sólo cuando el motor está en funcionamiento y desactivarse cuando el motor se detiene. La mejor manera de controlar esto es energizar la celda a través de un fusible independiente de 25 A, y un relé de 30 A, accionados por la llave de contacto. Idealmente debe ser instalado un interruptor en serie con la llave de contacto, en alguna consola instalada en el interior del vehículo y accionado manualmente unos 20 segundos después que el motor arranca y cortado 20 segundos o más antes de detener el motor, para asegurarse que el gas remanente en la superficie de la celda y el conducto de alimentación, se quema enteramente y no queda acumulado en la admisión del motor, después que éste se detiene.

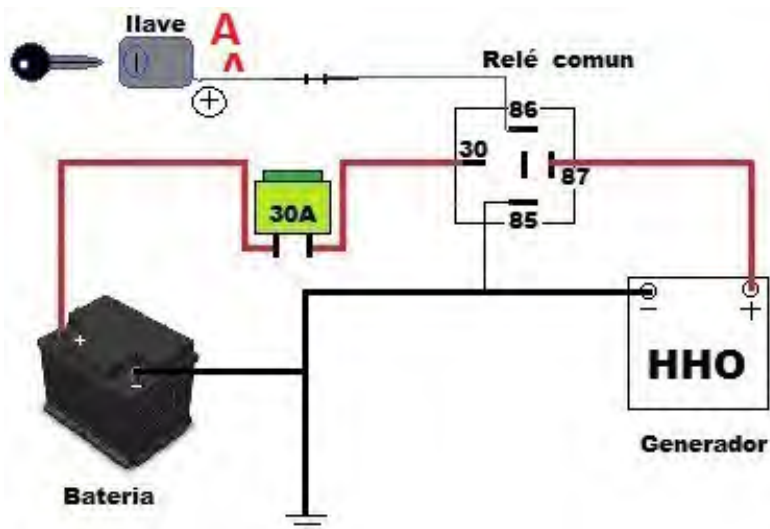
Si algún día se olvida de esto, la llave de encendido igual apagará la celda, evitando un riesgo muy alto, si la celda queda produciendo gas con el motor detenido.



**Figura 81.** Diagrama de conexión del relevador.

El fusible asimismo, evitará cualquier problema, si olvida agregar agua a la celda y el nivel de ella desciende mucho, concentrando el electrólito y, por consiguiente, aumentando el consumo eléctrico y sobrecargando las líneas, con el consecuente peligro de recalentarlas y quemarlas. Los alambres de cobre que alimentan la celda a través del relé, deben tener el diámetro adecuado para el consumo requerido, siendo una opción adecuada el N° 12 o un mínimo de calibre N° 10 , para un consumo no mayor de 15 A.

Puede instalar un diodo LED en la consola a bordo, para indicarle cuando la celda está inoperativa, conectándolo con una resistencia de unos 680  $\Omega$ . Y de ¼ Watts, a los dos contactos del fusible y esto le indicará cuando el fusible se quema, y la celda deja de funcionar, iluminando el LED.



**Figura 82.** Circuito de montaje de la celda y sus componentes eléctricos.

Harán falta terminales como las de la foto, de acuerdo a la conexión que desee hacer.



**Figura 83.** Se necesitarán terminales de este tipo de acuerdo a la conexión deseada.



**Figura 84.** En la figura se muestra la correcta instalación de la terminal eléctrica.





**Figura 85.**Conectores de bronce con hilo NPT cónico.

Una vez teniendo armada nuestra celda seca, el montaje normal, es cerca del carburador o cuerpo de aceleración, con una manguera de goma o plástico. La conexión debe ser hecha detrás de la mariposa o cuerpo de aceleración según sea el caso, debido a que deseamos que no esté circulando gas, dando vueltas por ahí por razones de seguridad. Usted puede perforar un orificio de  $\frac{1}{4}$ " en un lugar apropiado como por ejemplo: la tapa del filtro de aire o el tubo de admisión de aire, con hilo NPT (cónico) y poner un conector de bronce para la manguera del gas y puede aumentar la seguridad del montaje instalando otra válvula de un sentido en la manguera de gas, antes de esta conexión sí por el diseño de su compartimento del motor, o para evitar zonas de mucho calor, como el escape, y tiene que usar un tubo de conexión de 1 m o más, es preferible aumentar el diámetro a 10 o 12 m/m.

### **3.5.- PRUEBAS Y FUNCIONAMIENTO**

Una vez instalada nuestra celda con los componentes y medidas necesarios, debemos de tomar en cuenta las siguientes recomendaciones y pruebas pertinentes para obtener una mayor eficiencia en nuestra celda.

**1.- Corriente requerida por el generador de HHO.** ¿Cómo fluyen los amperes por el generador de hidrógeno? Esto es lo que el generador de HHO toma del sistema eléctrico del vehículo. Su alternador suministra corriente a la batería y otros dispositivos eléctricos. El consumo excesivo de corriente compromete el alternador y hace que el motor trabaje más, y éste quemará más gasolina. La corriente se deberá medir con un multímetro una vez instalada nuestra celda en nuestro auto, abriendo el circuito y con el motor encendido. En una celda de 7 placas no debe de sobrepasar los 10 amperes, ya que nos puede provocar una temperatura alta en donde el electrolito inicia la formación de espuma que subirá sobre las placas (reduce la eficiencia) y el electrolizador comienza a escupir espuma de electrolito. La eficiencia energética disminuye a medida que aumenta la corriente, si la superficie de las placas se mantiene igual. Para mantener la eficiencia energética, el mismo

incremento de la superficie de la placa debe ser en proporción con la corriente (mantener la misma densidad de corriente).

Podemos utilizar un PWM, que es modulador de ancho de pulso, es un dispositivo usado en la mayoría de los sistemas generadores para evitar el sobrecalentamiento controlando la corriente o limitándola. Un PWM tiene otros atributos, que tienen que ver con la creación de un tipo diferente de gas HHO llamado orto-hidrógeno. Sin embargo, no todos los moduladores de ancho de pulso pueden llegar a la frecuencia necesaria para lograr esto.

**2.- Voltaje.** El voltaje de la celda ideal sería de alrededor de 1.48v en cada placa o electrodos, El sistema eléctrico del vehículo produce desde 12,6 hasta 14,2 voltios. En automóviles convencionales y cualquier cosa por encima de 1.48v pierde eficiencia. La tensión o voltaje sólo es necesario para circular la corriente a través de la celda, no tiene relación con de la cantidad de gas producido. La sobretensión de la celda (por encima de 1.48V) se determina por los materiales de los electrodos, la densidad de corriente, la distancia entre electrodos y la conductividad del electrolito.

**3.- Distancia entre placas.** Cuanto más pequeña es la distancia entre electrodos más bajo será el voltaje de la celda. En la práctica, 3 mm distancia entre electrodos es bueno hasta cerca de 10A. Para usar 10-40A use una separación de 5-8 mm.

**4.- Electrolito.** El electrolito es esencial para un buen funcionamiento y la producción de HHO de nuestra celda, algunos electrolitos comunes y que podemos utilizar son bicarbonato de sodio, agua destilada y sosa caustica, esta última es la más recomendada, para obtener la dosis correcta en la celda, llene el depósito con agua hasta su nivel correcto y agregue lentamente sosa caustica (NaOH), posteriormente se debe de agitar para quedar mezclado con el agua de manera homogénea. La cantidad de NaOH es aproximadamente 1 parte de NaOH por 4 partes de agua, es más o menos el equivalente a 2 cucharadas de té colmadas por cada litro de agua.

**Nota:** antes de manejar este tipo de compuesto es fundamental tomar medidas de precaución. La sosa caustica puede irritar y dañar ciertas zonas del ojo (la córnea), y provocar quemaduras en la piel. Para ello es necesario utilizar guantes de látex y cubres bocas.

**5.- Pre-acondicionado y placas preparadas.** Estos son dos procesos diferentes y deben ser considerados en la construcción de esta celda. Las placas pre-acondicionadas deben ser lijadas en cruz y manipuladas con guantes para evitar la grasa y maximizar la producción de hidrógeno. Platos pre-acondicionados (casi ninguna empresa lo hace), se realiza durante días o semanas continuamente, hasta que las placas se limpian para alcanzar la máxima eficiencia y rendimiento. Los efectos de este proceso es importante, placas bien acondicionadas pueden requerir cientos de kilómetros de conducción, antes de que el generador esté funcionando en su nivel máximo. También este proceso ayuda a limpiar las placas de las suciedades iniciales del acero.

**6.- Producción de gas HHO litros por minuto (LPM).** Hay un gran debate no sólo en la forma de medir la producción de gas HHO de un generador de hidrógeno, sino también cuánto se necesita. Esto está muy sobrevalorado, la eficiencia real del

generador debe ser una prioridad mucho más alta que la cantidad de litros por minuto que el generador está produciendo. Por cualquier razón, parece ser que esto es la evaluación de nuestro sistema de HHO. En cuanto a la cantidad de gas HHO que se necesita en nuestra celda, dependerá del tamaño de su motor (0.5-0.75 LPM de HHO por cada litro de desplazamiento del motor).

Antes nada se tendrá que revisar todo el sistema como en mangueras, depósitos y el apriete correcto de los tornillos de nuestra celda, ya que si existe una fuga no podrá generar presión alguna. Una vez funcionando nuestra celda, la cantidad de gas generado se medirá con un caudalímetro, teóricamente el diseño propuesto debe de producir entre 1.5 y 2 L/min., dependiendo de los componentes utilizados, como el acero de la placas, electrolito, temperatura, voltaje y corriente. Para operaciones a presión debe utilizar tanque a prueba de presión (metálico). Si es necesario, almacenar gas HHO para un corto período de tiempo, ponga un globo grande en la salida del arrestallamas. El globo almacenará el gas a presión atmosférica y no va a ser muy peligrosa si se explota debido a una retro. Recuerde usar protección auditiva y ocular.

Con la producción de gas mencionada, un litro de compuesto de agua y electrolito tendrá una duración aproximada de 15 horas.

Algo muy importante que debemos de saber es que a ningún motor se le puede inyectar más de 2 litros por minuto de HHO sin ajustar el tiempo DPMS (después del punto muerto superior) o conocido por sus siglas en inglés como TDC. Se debe retrasar porque el HHO reacciona 10 veces más rápido a la chispa de la bujía que la gasolina con menor cantidad. También reacciona al comprimirse junto con oxígeno. En los vehículos modernos también debe de haber un ajuste, ya que éstos emplean sensores de oxígeno para decirle a la computadora del vehículo, si la mezcla aire/combustible es demasiado rica o muy pobre.

**A continuación daremos una explicación sobre el ajuste del sensor de oxígeno:**  
La ECU utiliza la información del sensor de O<sub>2</sub> para determinar si más o menos combustible debe añadirse a la mezcla a fin de mantener la proporción correcta.

Los motores de gasolina (a diferencia de los motores diesel) están diseñados para funcionar con una relación aire/combustible de 14,7 a 1. Cuando estas proporciones están siendo suministradas al motor, una cierta cantidad de oxígeno sin quemar será detectada en el escape por el sensor de O<sub>2</sub>, y esta información se retroalimenta a la computadora del vehículo. Si se detecta más oxígeno, la ECU piensa que la mezcla es muy pobre (poco combustible), y añade combustible a la mezcla. Del mismo modo, si se detecta menos oxígeno, la ECU piensa que la mezcla es demasiado rica (mucho combustible) y recorta el combustible que alimenta al motor.

Hay un gran problema con este escenario tan pronto como usted comience a agregar un dispositivo de ahorro de combustible viable. Para cada relación aire/combustible dado y quemado de manera más eficiente, el contenido de oxígeno en los gases de escape se elevará. Si tiene dos o más dispositivos de eficiencia instalados, el oxígeno estará aún más presente en el escape. El contenido de oxígeno aumenta a

medida que el combustible se quema de manera más eficiente para un número de razones. Lo cual sucede por:

a) Menor cantidad de combustible, se utiliza para producir una cantidad equivalente de potencia.

b) Menor cantidad de oxígeno que se consume para crear monóxido de carbono en los gases de escape. La conclusión es que hay más oxígeno en los gases de escape conforme la eficiencia de la combustión se incrementa.

Así que, ahora que hemos invertido tiempo y dinero para instalar uno o dos dispositivos para mejorar la eficiencia del combustible, y estamos obteniendo una quema de combustible más eficiente, ¿qué hace la computadora del vehículo?, enriquece la mezcla en un intento de obtener una lectura de oxígeno en los gases de escape igual a la anterior e ineficiente configuración. Esto entonces niega el ahorro de combustible de casi cualquier dispositivo eficiente, y en algunos casos realmente causará un aumento en el consumo de combustible, a pesar de tener un dispositivo de ahorro de combustible viable.

**La solución:** El manejo de esta situación es simple. La señal proveniente del sensor  $O_2$  necesita ser ajustada para compensar el aumento en la eficiencia del combustible que se está logrando. Básicamente, el aporte adicional de oxígeno en el escape engaña a la computadora con la idea de que la mezcla es demasiado pobre, haciéndola enriquecer (erróneamente) la mezcla. Tenemos que desengañar a la ECU de tal forma que nos siga dando la misma cantidad de gasolina que antes. Hacemos esto haciéndole creer que hay menos oxígeno en los gases de escape de lo que realmente hay. La cantidad de cambio en la señal tiene que ser fácilmente ajustable para acomodarse a los diferentes tipos de dispositivos de eficiencia que están disponibles.

El sensor de oxígeno produce diferentes voltajes para comunicar el contenido de oxígeno a la ECU. Cuando el sensor lee por debajo 0,45 voltios, eso significa mezcla pobre, y cuando lo lee por encima de 0.45 voltios, significa mezcla rica. Si conectan el multímetro al cable de señal del Sensor de Oxígeno y tierra, mientras el motor está funcionando, verán como el voltaje está en constante cambio, y probablemente verá voltajes en el rango de 0.2 a 0.8 Voltios o menos. En realidad, el voltaje está cambiando de aproximadamente 0,1 voltios a 1,0 voltios, aproximadamente, una o dos veces por segundo. Pero un multímetro digital no es lo suficientemente rápido como para demostrar esto. Deberá usar un osciloscopio para ver con precisión la senoidal que genera la señal del  $O_2$ .

El EFIE suma su voltaje al voltaje del sensor y desplaza el voltaje que la ECU recibe a la región de enriquecimiento de mezcla. Esto hace que la ECU proporcione menos gasolina. Mucha gente piensa que estamos tratando de engañar a la computadora con un EFIE, lo cual en realidad no es exacto. El oxígeno adicional en el escape, debido a una combustión más eficiente, es lo que está engañando a la computadora. Se está haciendo creer a la ECU que la mezcla es demasiado pobre, y ésta compensa mediante la adición de gasolina que no es necesaria. El EFIE está

desengañando a la computadora. Todo lo que queremos hacer es que nuevamente nos dé una relación aire/combustible de 14,7 a 1.

Cabe señalar que un dispositivo EFIE para manejar el sensor de oxígeno, por sí solo, no es un dispositivo de ahorro de combustible. Posiblemente podría ser usado para controlar la computadora del vehículo, y hacer la entrega de combustible al motor un poco más pobre, y esto podría dar un pequeño aumento en el kilometraje por litro, lo cual traerá una pérdida de potencia en proporción. Pero esto no es para lo que fue diseñado. Fue diseñado para complementar y, en algunos casos, hacer posible el aumento de rendimiento de la gasolina utilizando adicionalmente dispositivos de ahorro de combustible.

## CONCLUSIONES

En conclusión, al utilizar un Generador de Gas Hidroxi (HHO) o Celda Electrolítica (Celda Seca), como la que se ha propuesto en este proyecto, teóricamente y por las propiedades del Hidrógeno ya mencionadas a lo largo de este proyecto, deberá tener muy buenos beneficios, entre los que podemos mencionar se encuentran:

- Sustituir parte del combustible fósil por este gas, se ahorra combustible y se contamina menos, ya que el gas HHO, entre otras cosas, una vez al quemar (o explotar) hidrógeno, lo que hacemos no es más que volver a unir la molécula del agua y lo que obtenemos después de quemarlo es vapor de agua, que saldrá por el tubo de escape arrastrando metales pesados del combustible fósil.
- Reducción de ruidos y vibraciones.
- Limpieza del hollín del motor generado por la gasolina o diesel.
- Es amigable con el medio ambiente, reduciendo considerablemente la producción de gases nocivos.
- Nos puede ofrecer un ahorro de combustible de un 20% a un 30% y, a su vez, obtener un buen ahorro de dinero.

De esta forma consideramos que nuestra aportación es real con el proyecto propuesto para bien del usuario, del medio ambiente y del motor de combustión interna, al trabajar con una de tantas energías de carácter alternativo que hoy en día ya se puede disfrutar.

Finalmente, este proyecto solo abarca aspectos teóricos, construcción de la celda, funcionamiento, pruebas e instalación, no se llevaron a cabo pruebas de potencia, rendimiento y emisión de gases con la celda instalada en un motor de combustión interna, por lo que se deja abierta la posibilidad a realizar dichas pruebas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Motores de combustión interna. Análisis y aplicaciones, Edward F. Obert, CECSA, México, 1980.
- Funcionamiento de motores de combustión interna. Ing. wladyslaw r.pawlak. editorial de la universidad autónoma de nuevo león.
- Motores de combustión interna alternativos, autor: payri, editorial: reverté
- Libros de Ciencia y Tecnología N° 1 Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (Editor)
- “El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado. Una introducción al estudio del hidrógeno como vector energético.”; Mario Aguer Hortal, Ángel L. Miranda Barreras; Ediciones Díaz de Santos S.A.
- “Cuando se agote el petróleo. La economía del hidrógeno. La creación de la red energética mundial y la redistribución del poder en la Tierra”; Jeremy Rifkin; Paidós Estado y Sociedad 102.
- “Alternative Energy Demystified”; Stan Gibilisco; Editorial McGraw-Hill.

## MESOGRAFÍA

- Agencia internacional de la Energía: [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Asociación Americana de Hidrógeno: [www.clean-air.org](http://www.clean-air.org)
- Fuel Cells: [www.fuelcells.org](http://www.fuelcells.org)
- <http://hidrogenocomosolucion.wordpress.com/>
- <http://energialibre.freevar.com/pdfs/booster%20de%20hidrogen.pdf>
- [http://132.248.38.3/SEV/pagina\\_congreso/congreso\\_estudiantil/memoria/area1/quimica/5.9.pdf](http://132.248.38.3/SEV/pagina_congreso/congreso_estudiantil/memoria/area1/quimica/5.9.pdf)
- <http://www.inin.gob.mx/documentos/publicaciones/contridelinin/Cap%C3%ADtulo%2028.pdf>
- [www.motordehidrogeno.net](http://www.motordehidrogeno.net)