

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Análisis comparativo de la generación de potencia y emisiones de un motor de combustión interna alimentado por gasolina y con la instalación de una celda electrolítica

Trabajo de investigación presentado por Leonel Estuardo González Urlá para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala
2010

Análisis comparativo de la generación de potencia y emisiones de un motor de combustión interna alimentado por gasolina y con la instalación de una celda electrolítica

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Análisis comparativo de la generación de potencia y emisiones de un motor de combustión interna alimentado por gasolina y con la instalación de una celda electrolítica

Trabajo de investigación presentado por Leonel Estuardo González Urlá para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

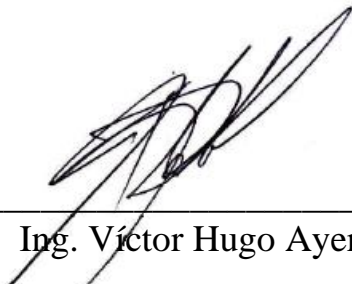
Guatemala
2010

Vo. Bo.:

(f) 

Ing. Otto Francisco Ayala Barrera

Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Víctor Hugo Ayerdi

(f) 

Ing. Raúl Loarca

(f) 

Ing. Otto Francisco Ayala Barrera

| Fecha de aprobación: Guatemala, 7 de diciembre del 2010.

PREFACIO

El motivo por el cual decidí desarrollar este proyecto como trabajo de graduación fue mi gran interés por el medio ambiente, y tratar de dar una solución práctica a la disminución de contaminantes generados por la combustión de los hidrocarburos quemados por el motor de combustión interna los cuales son responsables de numerosas enfermedades pulmonares, mientras que otros, como el monóxido de carbono en altas concentraciones, aumenta la probabilidad de sufrir un infarto.

Quiero dar las gracias al Ing. Otto Ayala por aceptar ser asesor de este trabajo de graduación y ayudar de forma directa a la elaboración del mismo, aportando todo su conocimiento teórico y práctico sobre el tema. De igual manera quiero agradecer a todas las personas que estuvieron de forma directa o indirecta ayudando a la elaboración del mismo.

ÍNDICE

	Página
PREFACIO	iv
ÍNDICE	v
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN	xi

Capítulos

I.	Introducción	1
II.	Componentes y características de operación del motor de combustión interna	20
III.	Ciclos del motor.....	29
IV.	Combustibles y combustión	36
V.	Contaminantes y sus efectos.....	42
VI.	Electroquímica,.....	47
VII.	Materiales, manufactura e instalación de celda electrolítica en vehículo.....	63
VIII.	Resultados.....	74
IX.	Conclusiones.....	76
X.	Recomendaciones.....	78
XI.	Bibliografía.....	79
XII.	Apéndice.....	90

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
4.1 Comparación de algunos combustibles alternativos contra los combustibles tradicionales basados en petróleo usados en la industria del transporte	32
4.2 Temperatura de ignición para varias sustancias combinadas con aire atmosférico	34
5.1 Monóxido de carbono y sus efectos en la salud.....	39
5.2 Hidrocarburos no quemados y sus efectos en la salud.....	41
5.3 Óxidos nitrosos y sus efectos en la salud.....	42
7.1 Lista de materiales	53
8.1 Datos técnicos del vehículo.....	64
8.2 Potencia y torque antes y después de la instalación.....	66
8.3 Calculo de eficiencia mecánica de la transmisión a las llantas.....	66
8.4 Potencia y torque al freno antes y después de la instalación	67
8.5 BSP, OPD y BMEP antes y después de la instalación.....	67
8.6 Resultados prueba control y prueba experimental de desempeño.....	68
8.7 Resultados prueba control y experimental de emisiones.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Corte de sección transversal de un motor de cuatro tiempos convencional mostrando los componentes: (A) Block, (B) Eje de levas, (C) Cámara de combustión, (D) Biela, (E) Porta cigüeñal, (F) Eje cigüeñal, (G) Cilindro, (H) Múltiple de escape, (I) Culata, (J) Múltiple de admisión, (K) Carter, (L) Pistón, (M) Anillos de pistón, (N) Varillas de empuje, (O) Bujía, (P) Válvulas, (Q) Camisas de agua.....	3
2.2 Posiciones principales del pistón y volumen disponibles dentro del cilindro, B= diámetro de cilindro, S= carrera, s= posición del pistón, Vc= volumen libre, Vd= volumen desplazado, TDC= top dead center (punto muerto superior), BDC= bottom dead center (punto muerto inferior).....	6
2.3 Ciclos de operación de un motor de cuatro tiempos encendido por chispa. (a) Tiempo de admisión, (b) Tiempo de compresión, (c) Tiempo de combustión, (d) Tiempo de potencia, (e) Final de potencia e inicio de escape, (f) Tiempo de escape.....	9
2.4 La curva superior consiste en los tiempos de compresión y potencia y el área representa el trabajo indicado. La curva inferior representa el trabajo negativo del tiempo de admisión y de escape. Este es llamado trabajo indicado de bombeo.....	10
2.5 Curvas de potencia y torque de un motor L35 V6 de General Motors. el motor tiene una relación de compresión de 9.2:1, una velocidad máxima de 5600 RPM, una potencia máxima de 200 hp (149 kW) @ 4400 RPM y un torque máximo de 255 lbf-ft (436 N-M) @ 2800 RPM.....	15
3.1 Ciclos real e ideal en motores de encendido por chispa y sus diagramas P-v.....	22
3.2 Condiciones de aire estándar para un ciclo de Otto ideal, 6-1-2-3-4-5-6.....	23
3.3 Eficiencia térmica indicada como función de la relación de compresión para un motor de encendido por chispa.....	27

Figura	Página
3.4 Ciclo Otto estándar, mostrando el proceso 4-7 experimentado por el escape durante el proceso de “blowdown”	28
7.1 Secciones de PVC de 15 cm y 3” de diámetro (secciones color naranja) Unidas entre sí por una unión para PVC (sección media de la carcasa), en la Parte inferior se muestra un tapón pegado para evitar fugas.....	47
7.2 Detalle de platinas de acero inoxidable.....	48
7.3 Detalle de platina sujeta a electrodo y tirante de acero inoxidable para Sujetar a electrodo.....	48
7.4 Detalle de tornillos cortos y separación entre ellos y las platinas.....	49
7.5 Detalle de adaptación de tapón.....	49
7.6 Detalle de tapón para ajuste de tapadera de polímero.....	50
7.7 Tapadera de polímero.....	50
7.8 Detalle de tapadera de polímero, vista superior.....	50
7.9 Muestra de tornillos sin cabeza unidos a tirantes de acero inoxidable.....	51
7.10 Detalle de tornillos y codo de cobre unidos a tapa de polímero.....	51
7.11 Reducción de 1” a 3/4”.....	52
7.12 Descripción de la brisca reducción que existe en el fitting.....	52
7.13 Detalle de las secciones de PVC, junta media, tapa inferior y complemento de la parte superior ya pegadas.....	54
7.14 Detalle de unión entre electrodos y tirantes.....	55
7.15 Separación y aislamiento de platinas.....	56
7.16 Detalle de agujeros para unir la tapadera con la carcasa.....	56

Figura	Página
7.17 Detalle de oring instalado.....	56
7.18 Empaque de belumoide en tapadera.....	57
7.19 Celda armada.....	57
7.20 Instalación de celda en la parte delantera del vehículo así como vista del sistema de seguridad.....	58
7.21 Detalle de instalación eléctrica en celda electrolítica.....	59
7.22 Vehículo listo para la prueba en el dinamómetro.....	60
7.23 Lectura de potencia y torque entregados por dinamómetro.....	60
7.24 Sistema de seguridad de la parte trasera y sonda para medir índice de Emisiones.....	61
7.25 Sistema de seguridad de la parte delantera del vehículo.....	61
7.26 Problemas por calentamiento en líneas eléctricas.....	62
7.27 Deformación presentada en la carcasa de la celda después de Calentamiento.....	63
7.28 Deformación presentada en la trampa de agua después de calentamiento.....	63
8.1 Resultados prácticos en dinamómetro mostrando los resultados antes de la instalación como RunFile_001 y los resultados luego de la instalación como RunFile_002.....	71
12.1 Celda instalada en vehículo.....	85
12.2 Limpieza de depósitos de carbono en gargantas de inyector.....	85
12.3 Diseño y dimensiones de cilindro.....	86
12.4 Diseño y dimensiones de electrodos de celda electrolítica.....	87

Figura	Página
12.5 Diseño y dimensiones de tapón de PVC.....	88
12.6 Diseño y dimensiones de fitting de cobre.....	89
12.7 Diseño y dimensiones de tapa parte superior.....	90

RESUMEN

Este trabajo de graduación muestra los resultados de un análisis cuantitativo y cualitativo de un motor de combustión interna al cual se le instaló una celda electrolítica (generador HHO), para ver como esta afecta el desempeño de este. También se buscó crear una referencia teórica fundamentada en un proceso técnico y científico para este tipo de modificación al motor, la cual actualmente es prácticamente nula.

Se inició realizando una prueba control del índice de emisiones de gases de escape y el desempeño del motor (potencia y torque). Se investigó sobre los elementos teóricos que afectan el desempeño del motor así como un análisis del ciclo de Otto y termoquímico para saber que temperaturas críticas tenemos dentro del motor para que no se de la auto ignición de los gases a inyectar. Finalmente se construyó e instaló una celda electrolítica, posteriormente a la instalación se corrió nuevamente una prueba de índice de emisiones y desempeño del motor. Los datos fueron comparados con la prueba control para así proceder a la interpretación de resultados.

Se creó una base teórica que sustenta científicamente el uso de los generadores HHO como una modificación que permite la disminución de emisiones en los motores sin afectar significativamente el desempeño de los mismos. Con la prueba de control y práctica se obtuvieron resultados que apoyan la idea que el inyectar gases productos de la electrólisis en un motor puede lograr un cambio significativo en el rendimiento del vehículo.

I. INTRODUCCIÓN

La finalidad de este trabajo de graduación es que el lector conozca sobre un sistema que puede reducir significativamente las emisiones nocivas hacia el medio ambiente generadas por un motor de combustión interna.

Se realizó un análisis comparativo de la generación de potencia y emisiones de un motor de combustión interna alimentado por gasolina y con la instalación de una celda electrolítica, obteniendo así un aumento en la potencia del motor de hasta un 43% y una reducción en la emisión de gases nocivos al medio ambiente de 53%. Logrando así afirmar la hipótesis propuesta.

También se logró elaborar una base teórica que sustenta científicamente el uso de los generadores HHO como una modificación que permite disminuir notablemente la producción de contaminantes hacia la atmósfera así como el aumento en el desempeño del motor.

El lector se dará cuenta que la utilización de un dispositivo de este tipo también ayuda al buen funcionamiento del motor puesto que, los depósitos de carbono que se forman debido a una combustión incompleta pueden llegar a desaparecer en un gran porcentaje con la adición de hidrógeno a la mezcla.

A. Objetivos

1. General

Analizar, de manera científica y técnica los motores de combustión interna (MCI) con celdas electrolíticas, y recopilar información científica que respalde y documente la iniciativa de modificar un MCI que funcione con dicha celda.

2. Específicos

- Aportar evidencia técnica y científica de la implementación de generadores HHO en motores de combustión interna.
- Determinar de manera científica las emisiones generadas por el motor antes y después de la implementación del sistema.

- Comparar el desempeño de un MCI previo a utilizar el sistema de combustible alternativo y al utilizado.
- Identificar las ventajas y desventajas técnicas de esta modificación.

II. COMPONENTES Y CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

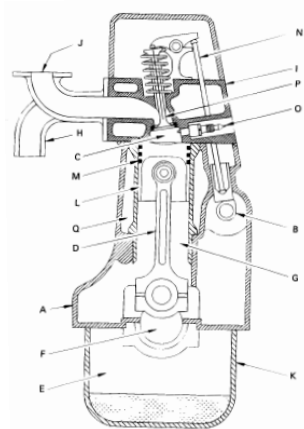
A. Diseño y estructura del motor de combustión interna

El motor de combustión interna (MCI) por definición es aquel que realiza la combustión en el mismo lugar donde transforma la energía calorífica, tiene la función de transformar la energía química contenida en el combustible a potencia mecánica, esto último es lo que se conoce como la fuerza desarrollada por el motor.

Para cumplir con este objetivo, la generalidad de los motores de uso actual en los vehículos de carretera hace uso de una estructura que alberga y hace un eficiente uso del mecanismo reciprocante de manivela, biela y corredera. Cuando el motor de combustión interna hace uso de este mecanismo, las partes que lo componen reciben un nombre distinto que identifican la aplicación particular que se le ha dado a este mecanismo en la industria automotriz.

El motor se divide esencialmente en tres partes y en cada una de estas partes hay mecanismos independientes que se asocian con ellas por considerárseles un conjunto operacional. Los componentes pueden observarse en la figura 2.1 del corte de sección transversal de un motor de cuatro tiempos convencional. Estas partes son:

Figura 2.1. Corte de sección transversal de un motor de cuatro tiempos convencional mostrando los componentes: (A) Block, (B) Eje de levas, (C) Cámara de combustión, (D) Biela, (E) Porta cigüeñal, (F) Eje cigüeñal, (G) Cilindro, (H) Múltiple de escape, (I) Culata, (J) Múltiple de admisión, (K) Carter, (L) Pistón, (M) Anillos de pistón, (N) Varillas de empuje, (O) Bujía, (P) Válvulas, (Q) Camisas de agua.



- A. **Block:** cuerpo del motor en el cual están contenidos los cilindros, hecho normalmente de hierro fundido o aluminio. En muchos motores antiguos las válvulas y los puertos de válvula estaban contenidos dentro del block. Los motores enfriados por agua incluyen una serie de camisas de agua fundidas junto a los cilindros y en los motores enfriados por aire la parte exterior del block tiene fundidas una serie de aletas para disipar el calor.
- B. **Eje de levas:** es el encargado de abrir y cerrar las válvulas de admisión y escape en la cabeza de la cámara de combustión dentro de los cilindros. Cada leva empuja la válvula que vence la resistencia del resorte, permitiendo así la apertura durante un intervalo y en un instante predeterminado. El eje de levas está hecho generalmente de hierro fundido o acero forjado, las superficies de las levas son endurecidas para permitir un tiempo de vida adecuado. Dependiendo de la localización de las válvulas respecto del eje de levas podrían requerirse varillas de empuje adicionales para transmitir el movimiento que deben tener las válvulas.
- C. **Cámara de combustión:** es el espacio que queda en el cilindro entre la corona del pistón y la culata y es donde ocurre la combustión. El tamaño de la cámara de combustión se encuentra cambiando constantemente desde un volumen mínimo cuando el pistón se encuentra en su punto muerto superior (PMS) hasta un máximo cuando el pistón alcanza su punto muerto inferior (PMI). Algunos motores tienen cámaras de combustión abiertas lo cual consiste de una cámara por cada cilindro.
- D. **Biela:** es la encargada de conectar el pistón con el eje cigüeñal que se encuentra en constante rotación. Usualmente construidas de acero, aleaciones forjadas o aluminio.
- E. **Porta cigüeñal:** parte del block que contiene al eje cigüeñal, por lo general el porta cigüeñal es el mismo carter.
- F. **Eje cigüeñal:** gira cuando el pistón se mueve de arriba hacia abajo, convierte la fuerza recíproca del pistón en un movimiento giratorio. Por lo regular son fabricados de acero forjado, mientras que algunos otros son fabricados de acero fundido.

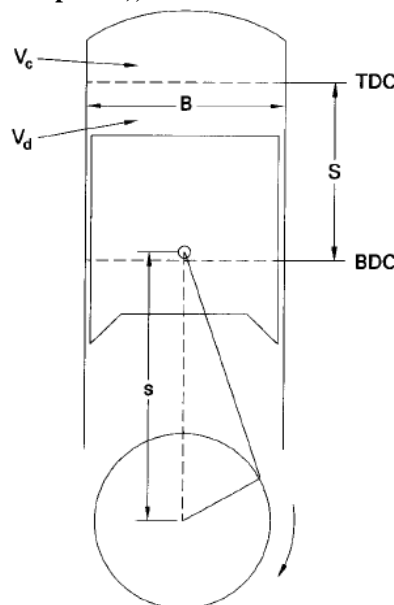
- G. **Cilindro:** cilindros circulares en el block del motor en los cuales el pistón hace su movimiento recíprocante de arriba hacia abajo. Es aquí donde la mezcla de aire combustible se quema.
- H. **Múltiple de escape:** sistema de tuberías encargadas de transportar los gases de escape fuera de los cilindros del motor, usualmente fabricados de hierro fundido.
- I. **Culata o cabeza de cilindros:** es la parte que cierra el final de los cilindros, usualmente contiene parte del volumen libre de la cámara de combustión. Esta generalmente va pernada al block del motor y está hecha de aluminio. La culata contiene la bujía en los motores encendidos por chispa (SI) y los inyectores en los encendidos por compresión (CI). La mayoría de motores modernos contienen las válvulas en la culata y algunos otros el eje o ejes de levas.
- J. **Múltiple de admisión:** sistema de tuberías encargadas de conducir la mezcla hacia el cilindro.
- K. **Carter:** se utiliza como recipiente de aceite del motor en el caso de los motores con carter húmedo y como cubierta del block. Los motores con carter seco tienen un contenedor de aceite separado del motor y el carter funciona solamente como cubierta del block.
- L. **Pistón:** es el que recibe la presión de los gases y puede hacer un movimiento recíprocante de vaivén (arriba hacia abajo) dentro del cilindro.
- M. **Anillos de pistón:** evitan que la mezcla se escape de la cámara de combustión y que el aceite lubricante pase a la misma. Estos son los responsables también que las paredes del cilindro permanezcan siempre bien lubricados.
- N. **Varillas de empuje:** mecanismo que sirve como enlace entre el eje de levas y las válvulas cuando estas se encuentran a la cabeza y el eje de levas se encuentra en el porta cigüeñal. Muchas varillas de empuje tienen a lo largo de ellas orificios por los que circula aceite como parte del sistema de lubricación presurizado que tienen.
- O. **Bujía o candela:** encargadas de encender la mezcla dentro de la cámara de combustión por medio de un arco eléctrico, se calibran con relación a los electrodos (en motores carburados la relación es de 0.032 a 0.035” y en inyectados es aproximadamente de 0.043 a 0.045”).

- P. **Válvulas:** ya sean de admisión o escape son las encargadas de introducir la mezcla dentro del cilindro (admisión) y descargar los gases quemados (escape).
- Q. **Camisas de agua:** a través de estas fluye refrigerante para mantener las paredes del cilindro libres de sobrecalentamiento. El refrigerante utilizado por lo general es una mezcla de agua con etilenglicol.

B. Funcionamiento del motor de combustión interna

El MCI transforma la energía calorífica de los gases en expansión dentro del cilindro en un movimiento recíprocante del pistón. De esta forma el pistón la transfiere por medio de la biela hacia el eje cigüeñal dándole un movimiento rotacional continuo. Las principales posiciones del pistón dentro del cilindro se encuentran esquematizadas en la figura 2.2.

Figura 2.2. Posiciones principales del pistón y volumen disponibles dentro del cilindro, B= diámetro de cilindro, S= carrera, s= posición del pistón, Vc= volumen libre, Vd= volumen desplazado, TDC= top dead center (punto muerto superior), BDC= bottom dead center (punto muerto inferior).



La posición del pistón determina el volumen disponible dentro del cilindro, y es debido a esta variación de volumen que se logra la transformación de energía. El volumen disponible dentro del cilindro llega a ser el máximo cuando el pistón se ubica en el punto más bajo de su recorrido llamado **punto muerto inferior** (PMI) y es mínimo cuando el pistón alcanza el punto más alto o **punto muerto superior** (PMS). Al volumen

mínimo se le llama volumen libre o del espacio muerto V_c , al volumen máximo se le llama volumen total V_t , y a la diferencia entre el volumen total y el volumen libre se le llama como volumen desplazado V_d .

A la relación de volúmenes que existe en el interior del cilindro al estar el pistón en el PMI y en el PMS se le conoce como **relación de compresión** (R_c) es decir, $R_c = \text{máximo volumen disponible en el cilindro} / \text{mínimo volumen disponible en el cilindro}$. Mientras mayor es la relación de compresión del motor se tiene más potencia. La relación de compresión se puede calcular de la siguiente manera:

$$R_c = (V_d + V_c) / V_c \quad \text{Ecc. 2.1}$$

Al recorrido desde el PMS hasta el PMI o viceversa se le conoce como ciclo del motor o carrera, y se conocen tres posibles: (a) Corta; cuando el diámetro del cilindro es mayor que la carrera y se utiliza para tener una mayor potencia. (b) Larga; cuando el diámetro del cilindro es menor que la carrera y se utiliza para tener mayor torque y (c) Cuadrada; cuando el diámetro del cilindro es del mismo tamaño de la carrera y se utiliza para tener una combinación de potencia y torque, esta última por lo general la encontramos en todos los vehículos de ciudad.

Después de analizar los volúmenes involucrados en un motor de combustión interna, debemos analizar los ciclos que determinan la transformación y transmisión de la totalidad de energía almacenada en el combustible hacia el eje cigüeñal en forma de energía mecánica. La mayoría de los motores de combustión interna, ya sean encendidos por chispa o compresión, operan ya sea en un ciclo de cuatro tiempos o en uno de dos tiempos, siendo el ciclo de operación de cuatro tiempos el más usado para el tránsito vehicular de carretera. En este ciclo de operación cada cilindro necesita de cuatro desplazamientos completos de su pistón para completar un ciclo de potencia del motor. Estos son:

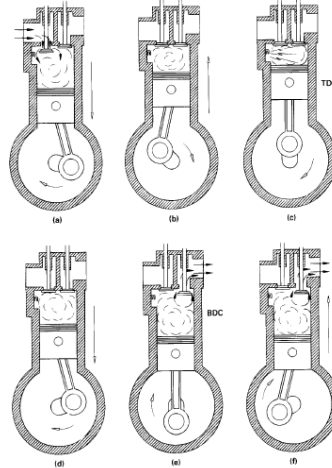
1. **Tiempo de admisión:** el pistón viaja desde su PMS hasta su PMI. Ambas válvulas están previamente cerradas, pero un poco antes de que el pistón inicie su desplazamiento, la válvula de admisión se abre. El desplazamiento del pistón dentro del cilindro produce un vacío que permite el ingreso de la mezcla

aire/combustible (en el caso de motores de encendidos por chispa) o de aire (en el caso de los motores encendidos por compresión), a la cámara de combustión. La válvula de admisión se cierra después de que la carrera termina.

2. **Tiempo de compresión:** mantiene ambas válvulas cerradas, el pistón se desplaza desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior que comprime el gas dentro del cilindro. La mezcla aire/combustible se ha comprimido de una octava a una novena parte de su volumen original. Tanto en motores de encendido por chispa como en motores de encendido por compresión, la combustión se inicia por lo general un poco antes de que el pistón termine la carrera de compresión.
3. **Tiempo de potencia:** comienza con el pistón en su PMS y termina con el pistón en su PMI, ambas válvulas continúan cerradas. Los gases combustibles dentro de la cámara de combustión continúan quemándose y expandiéndose, por lo que la presión interior del cilindro llega a ser muy alta, empujando y acelerando al pistón. Esta es la carrera donde se genera la potencia del motor. A medida que el pistón se aproxima al punto muerto inferior, la válvula de escape se abre para permitir que los gases residuales de la combustión comiencen a salir del cilindro, con esto la presión también disminuye.
4. **Tiempo de escape:** el pistón se desplaza desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior. Con la válvula de escape totalmente abierta los gases continúan saliendo por sí solos hasta ir igualando la presión en el exterior, los gases restantes son empujados hacia afuera por el pistón conforme éste se mueve hacia el punto muerto superior. Un poco antes de que el pistón llegue al punto muerto superior la válvula de admisión comienza a abrirse nuevamente, iniciando así el traslape valvular, en donde por un corto período de tiempo las válvulas de admisión y escape se encuentran abiertas simultáneamente. Al final de la carrera de escape la válvula de escape se cierra y puede iniciarse un nuevo ciclo.

El ciclo de potencia del motor se ejecuta en 720° de ángulo de giro del cigüeñal, es decir 2 vueltas completas, por lo que se requiere de media vuelta o 90° de ángulo de giro del cigüeñal para ejecutar cada carrera del pistón. Los ciclos anteriormente mencionados son ilustrados en la figura 2.3.

Figura 2.3. Ciclos de operación de un motor de cuatro tiempos encendido por chispa. (a) Tiempo de admisión, (b) Tiempo de compresión, (c) Tiempo de combustión, (d) Tiempo de potencia, (e) Final de potencia e inicio de escape, (f) Tiempo de escape.



C. Características de operación

En esta sección analizaremos las características de operación de un motor reciprocante de combustión interna. Esto incluye los parámetros mecánicos de salida como trabajo, torque y potencia; los requerimientos de entrada como aire, combustible y combustión; eficiencias, etc.

1. **Trabajo:** Es una interacción de energía no provocada por una diferencia de temperatura entre un sistema y sus alrededores, en un motor reciprocante de combustión interna este trabajo es generado por los gases que se encuentran en la cámara de combustión. El trabajo es el resultado de una fuerza actuando a través de una distancia. Esto es, la fuerza realizada por la presión de gas en el pistón en movimiento produce el trabajo en un MCI.

$$W = \int F dx = \int P A_p dx \quad \text{Ecc. 2.2}$$

Donde

P = Presión en la cámara de combustión

A_p = Área contra la cual ataca la presión

x = Distancia que se mueve el pistón

Puesto que los motores son por lo general multi cilíndricos, es conveniente analizar los ciclos del motor por unidad de masa de gas m en el cilindro. Para realizar

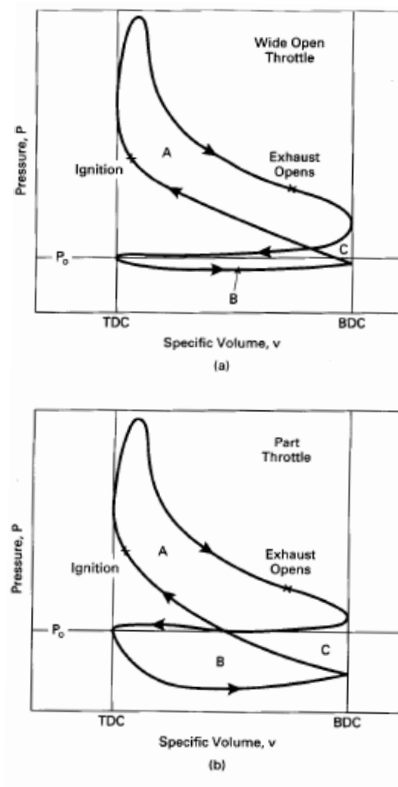
esto, el volumen V es remplazado por el volumen específico v y el trabajo por el trabajo específico, teniendo así:

$$w = \frac{W}{m} \quad v = \frac{V}{m} \quad \text{Ecc. 2.3}$$

$$w = \int P dv \quad \text{Ecc. 2.4}$$

El trabajo específico w es equivalente al área bajo la curva de las líneas de proceso en un diagrama P - v , como lo muestra la figura 2.4.

Figura 2.4. La curva superior consiste en los tiempos de compresión y potencia y el área representa el trabajo indicado. La curva inferior representa el trabajo negativo del tiempo de admisión y de escape. Este es llamado trabajo indicado de bombeo.



Si representamos como P a la presión dentro de la cámara de combustión, entonces la ecuación anterior y el área presentada en la figura 2.4 representan el trabajo dentro de la cámara de combustión.

Este trabajo es llamado **trabajo indicado**. El trabajo entregado por el eje cigüeñal es menor que el trabajo indicado, esto debido a la fricción mecánica y a cargas parasitas del motor como lo son la bomba de aceite, súper cargador, el compresor del aire

acondicionado, el alternador, etc. De esto tenemos que el trabajo disponible en el eje cigüeñal es llamado **trabajo al freno**, y se obtiene de la siguiente manera:

$$w_b = w_i - w_f \quad \text{Ecc. 2.5}$$

Donde

W_i = trabajo específico indicado generado dentro de la cámara de combustión

W_f = pérdida de trabajo específico debido a fricción y cargas parasitas

Las unidades de medida del trabajo específico son kJ/kg o BTU/lbm.

La relación entre el trabajo al freno en el eje cigüeñal y el trabajo indicado en la cámara de combustión definen la **eficiencia mecánica** del motor:

$$\eta_m = \frac{w_b}{w_i} = \frac{W_b}{W_i} \quad \text{Ecc. 2.6}$$

2. **Presión efectiva media:** De la figura 2.4 se puede observar que la presión en el cilindro del motor está cambiando continuamente durante el ciclo. Una presión promedio o **presión media efectiva** (mep) es definida como:

$$w = (mep)\Delta v \quad \text{Ecc. 2.7}$$

O

$$mep = \frac{w}{\Delta v} = \frac{W}{V_d} \quad \text{Ecc. 2.8}$$

Donde

$\Delta v = v_{PMI} - v_{PMS}$

W = trabajo de un ciclo

w = trabajo específico de un ciclo

V_d = volumen desplazado

La presión media efectiva es un buen parámetro para comparar motores porque es independiente de las dimensiones del motor y la velocidad. Si utilizamos el torque para hacer comparaciones un motor grande siempre lucirá mejor. Si utilizamos la potencia la velocidad se vuelve muy importante.

Se pueden definir varios tipos de presión media efectiva dependiendo del trabajo que se esté utilizando. Si utilizamos el trabajo al freno se obtiene la **presión media efectiva al freno**:

$$bmep = \frac{w_b}{\Delta_v} \quad \text{Ecc. 2.9}$$

El trabajo indicado da la presión media efectiva indicada:

$$imep = \frac{w_i}{\Delta_v} \quad \text{Ecc. 2.10}$$

Y la presión media efectiva por fricción:

$$fmep = \frac{w_f}{\Delta_v} \quad \text{Ecc. 2.11}$$

Las siguientes ecuaciones relacionan algunos de los conceptos anteriores:

$$bmep = \eta_m * impe \quad \text{Ecc. 2.12}$$

$$bmep = imep - fme \quad \text{Ecc. 2.13}$$

Donde

η_m = eficiencia mecánica del motor

3. **Torque y potencia:** El torque es un buen indicador de la habilidad del motor para generar trabajo. Se define como la fuerza actuante por unidad de distancia y tiene unidades de N-m o lbf-ft. El torque τ se relaciona con el trabajo de la siguiente manera:

$$2\pi * \tau = W_b = (bmep) * \frac{V_d}{n} \quad \text{Ecc. 2.14}$$

Donde

W_b = trabajo al freno de una revolución

V_d = volumen desplazado

n = numero de revoluciones por ciclo

Para un motor de cuatro tiempos con dos revoluciones por ciclo tenemos:

$$\tau = \frac{(bmep)*V_d}{4\pi} \quad \text{Ecc. 2.15}$$

En estas ecuaciones, $bmep$ y el trabajo al freno W_b son utilizados puesto que el torque es medido en la salida del eje cigüeñal.

Los motores de automóviles modernos tienen valores máximos de torque por desplazamiento en el rango de 80 a 110 N-m/L, con algunos en el rango máximo de 140 N-m/L. Esto da valores máximos de torque de 200 a 400 N-m, usualmente a velocidades de 4000 a 6000 RPM. Al punto donde se genera el mayor valor de torque se le llama

torque máximo al freno (MBT). Motores encendidos por compresión por lo general tienen valores mayores de torque que los encendidos por chispa.

La potencia se define como la taza de trabajo del motor. Si n = número de revoluciones por ciclo y N = velocidad del motor, tenemos:

$$\dot{W} = \frac{WN}{n} \quad \text{Ecc. 2.16}$$

$$\dot{W} = 2\pi N\tau \quad \text{Ecc. 2.17}$$

$$\dot{W} = \left(\frac{1}{2n}\right)(mep)A_p\bar{U}_p \quad \text{Ecc. 2.18}$$

Donde

W = trabajo por ciclo

A_p = Área de la cara de todos los pistones

\bar{U}_p = Velocidad promedio del pistón

Dependiendo de la definición de trabajo o mep utilizado en la ecuación anterior la potencia puede ser definida como potencia al freno, potencia indicada neta o potencia de fricción. También:

$$\dot{W}_b = \eta_m \dot{W}_i \quad \text{Ecc. 2.19}$$

$$\dot{W}_b = \dot{W}_i - \dot{W}_f \quad \text{Ecc. 2.20}$$

Donde η_m es la eficiencia mecánica del motor.

La potencia es, por lo general, medida en kW, pero los caballos de fuerza (hp) también son comunes:

$$1 \text{ hp} = 0.7457 \text{ kW} = 2545 \text{ BTU/hr} = 550 \text{ ft-lbf/sec}$$

$$1 \text{ kW} = 1.341 \text{ hp}$$

Ambos, torque y potencia son funciones de la velocidad del motor. El valor del torque aumenta mientras la velocidad del motor aumenta. Mientras la velocidad del motor aumenta, el valor de torque alcanza su valor máximo y luego empieza a decrecer como se muestra en la figura 2.5. La explicación del porqué el torque disminuye es simple, el motor es incapaz de ingerir una carga completa de aire a altas velocidades. La potencia indicada se aumenta con la velocidad, mientras que la potencia al freno se incrementa al máximo y luego disminuye a velocidades altas, esto es porque las pérdidas

por fricción aumentan con la velocidad y se convierten en el factor dominante a velocidades muy altas. Para la mayoría de los motores de automóviles, la potencia al freno máxima ocurre en el rango de 6000 a 7000 RPM, cerca de una y media veces la velocidad del torque máximo.

Una cantidad mayor de potencia puede ser generada incrementando el desplazamiento, mep y/o velocidad. Incrementar el desplazamiento aumenta la masa del motor y ocupa más espacio, siendo estas dos contradictorias a las tendencias del diseño de los automóviles. Por esta razón, los motores modernos son más pequeños pero marchan a altas velocidades y por lo general son turbo cargados o súper cargados para aumentar su mep.

Otras formas que usualmente se utilizan para clasificar los motores son las siguientes:

Potencia específica	$SP = \frac{\dot{W}_b}{A_p}$	Ecc. 2.21
---------------------	------------------------------	-----------

Entrega por desplazamiento	$OPD = \frac{\dot{W}_b}{V_d}$	Ecc. 2.22
----------------------------	-------------------------------	-----------

Volumen específico	$SV = \frac{V_d}{\dot{W}_b}$	Ecc. 2.23
--------------------	------------------------------	-----------

Peso específico	$SW = \frac{\text{peso del motor}}{\dot{W}_b}$	Ecc. 2.24
-----------------	--	-----------

Donde

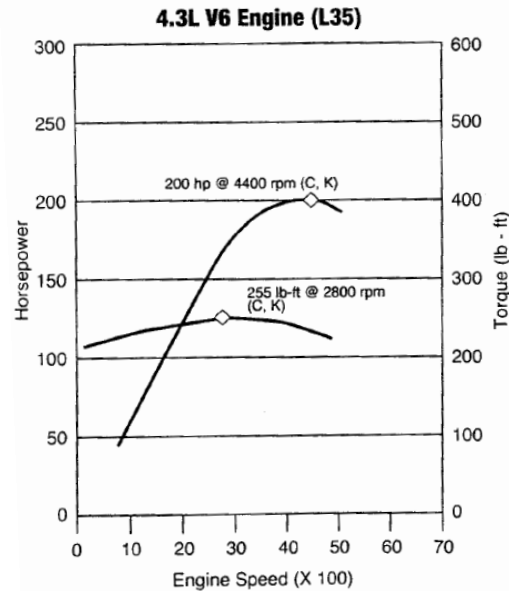
\dot{W}_b = potencia al freno

A_p = Área de la cara de todos los pistones

V_d = Volumen desplazado

Estos parámetros son importantes para motores utilizados en vehículos para transporte tales como barcos, automóviles y aeroplanos especiales, etc., donde mantener el peso en lo mínimo es necesario. Para grandes motores estacionarios, el peso no es un factor importante.

Figura 2.5. Curvas de potencia y torque de un motor L35 Vortec V6 de General Motors. El motor tiene una relación de compresión de 9.2:1, una velocidad máxima de 5600 RPM, una potencia máxima de 200 hp (149 kW) @ 4400 RPM y un torque máximo de 255 lbf-ft (436 N-m) @ 2800 RPM.



4. **Relación aire-combustible y combustible-aire:** La entrada de energía a un motor Q_{in} proviene de la combustión de un hidrocarburo. Aire es utilizado como suministro de oxígeno, necesario para esta reacción química. Para que una reacción de combustión ocurra, la cantidad apropiada de aire (oxígeno) y combustible debe estar presente.

La relación Aire-Combustible (AF) y Combustible-Aire (FA) son parámetros utilizados para describir la relación de mezcla. De lo anterior tenemos:

$$AF = m_a/m_f = \dot{m}_a/\dot{m}_f \quad \text{Ecc. 2.25}$$

$$FA = m_f/m_a = \dot{m}_f/\dot{m}_a = 1/AF \quad \text{Ecc. 2.26}$$

Donde

m_a = masa de aire

\dot{m}_a = flujo másico de aire

m_f = masa de combustible

\dot{m}_f = flujo másico de combustible

La relación AF ideal o estequiométrica para muchos motores a gasolina es muy próxima a 15:1, relaciones aire-combustible menores a 6 se dice que es una mezcla rica para sostener la combustión y una relación mayor a 25 es muy pobre. Un vehículo

operara por lo regular con una mezcla rica cuando acelera o se encuentra frío el motor, esto porque las mezclas ricas tienen una mejor ignición. Cuando se maneja a bajas cargas, los vehículos por lo regular son operados en mezclas pobres esto para ahorrar combustible. La entrada de combustible de un motor, inyectores o carburador, deben ser capaces de regular la cantidad apropiada de combustible para cualquier condición de operación y cualquier tasa de flujo. Por lo regular los motores a gasolina tienen un AF en el rango de 12 a 18 dependiendo de las condiciones de operación. Motores a chispa con una mezcla pobre pueden tener un AF tan alto como 25 a 40, pero necesitan admisiones especiales y mezclas adecuadas para una buena ignición.

Los motores encendidos por compresión tienen típicamente relaciones AF en los rangos de 18 a 70, lo cual aparenta estar fuera de los límites donde la combustión es posible. La combustión ocurre porque el cilindro en un motor encendido por compresión, a diferencia de uno encendido por chispa, tiene una no muy homogénea mezcla aire-combustible, donde la reacción ocurre solamente en las regiones en donde la mezcla de combustible existe, otras regiones son o muy ricas o muy pobres.

La relación de equivalencia Φ es definida como la relación actual de combustible-aire o estequiométrica combustible-aire:

$$\phi = \frac{(FA)_{act}}{(FA)_{stoich}} = (AF)_{stoich}/(AF)_{act} \quad \text{Ecc. 2.27}$$

En algunos casos, las relaciones AF y FA son dadas en relaciones molares. Esto es mucho menos común y AF y FA deben siempre ser consideradas como relaciones de masa. En algunos casos se utiliza el valor de lambda (λ) en lugar de utilizar la relación de equivalencia, el valor lambda es el recíproco de la relación de equivalencia, esto es:

$$\lambda = \frac{1}{\phi} = \frac{(FA)_{stoich}}{(FA)_{act}} = \frac{(AF)_{act}}{(AF)_{stoich}} \quad \text{Ecc. 2.28}$$

Para mezclas pobres tenemos: $\Phi < 1, \lambda > 1$

Para mezclas estequiométrica tenemos: $\Phi = \lambda = 1$

Para mezclas ricas tenemos: $\Phi > 1, \lambda < 1$

5. **Consumo específico de combustible:** El consumo específico de combustible (sfc por sus siglas en Inglés) se define como:

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{W} \quad \text{Ecc. 2.29}$$

Donde

\dot{m}_f = flujo másico de combustible hacia el motor

W = potencia del motor

La potencia al freno da el consumo específico de combustible al freno:

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{W_b} \quad \text{Ecc. 2.30}$$

La potencia indicada da el consumo específico de combustible indicado:

$$isfc = \frac{\dot{m}_f}{W_i} \quad \text{Ecc. 2.31}$$

De lo anterior obtenemos que:

$$\eta_m = \frac{W_b}{W_i} = \frac{isfc}{bsfc} \quad \text{Ecc. 2.32}$$

Donde

η_m = eficiencia mecánica del motor

El consumo específico de combustible al freno disminuye conforme la velocidad del motor aumenta, alcanza un mínimo, y luego aumenta a altas velocidades. El consumo de combustible aumenta a altas velocidades esto debido a las altas pérdidas por fricción. A bajas velocidades del motor, puesto que se tiene un mayor tiempo por ciclo aumenta la pérdida por calor y también el consumo de combustible aumenta.

El consumo específico al freno generalmente disminuye por el tamaño del motor, siendo mejor (mas bajo) para motores muy grandes.

El consumo específico de combustible es generalmente dado en unidades gm/kW-hr o lbm/hp-hr.

Para vehículos de transporte es común utilizar el término economía del combustible en términos de la distancia manejada por unidad de combustible, tal como millas por galón (mpg). En unidades del Sistema Internacional es común utilizar el inverso de esto, teniendo así L/100 km. Para disminuir la contaminación del aire y la pronta disminución de los combustibles fósiles se han creado regulaciones demandando mejoras en la economía del consumo de combustible.

6. **Eficiencias del motor:** El tiempo disponible para la combustión en un motor es demasiado corto, ocasionando que no todas las moléculas de combustible encuentren una molécula de oxígeno con la cual combinarse, o la temperatura dentro de la cámara de combustión no sea la adecuada. Ocasionando así, que una pequeña fracción de combustible no reaccione y que salga con los gases de escape. La **eficiencia de combustión** η_c se define como la cantidad de combustible que se quema. Valores típicos de eficiencias están en el rango de 0.95 a 0.98 cuando el motor está operando adecuadamente. Para un ciclo del motor y un cilindro, el calor adherido es:

$$Q_{in} = m_f Q_{HV} \eta_c \quad \text{Ecc. 2.33}$$

Para estado estable

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_f Q_{HV} \eta_c \quad \text{Ecc. 2.34}$$

Y la eficiencia térmica es

$$\eta_t = W/Q_{in} = \dot{W}/\dot{Q}_{in} = \dot{W}/\dot{m}_f Q_{HV} \eta_c = \eta_f/\eta_c \quad \text{Ecc. 2.35}$$

Donde

W = trabajo de un ciclo

\dot{W} = potencia

m_f = masa de combustible para un ciclo

\dot{m}_f = flujo másico de combustible

Q_{HV} = poder calorífico de combustible

η_f = eficiencia de combustible

La eficiencia térmica puede ser dada como indicada o al freno, dependiendo si se utiliza la potencia indicada o la potencia al freno.

La eficiencia mecánica del motor se puede determinar de la siguiente forma:

$$\eta_m = (\eta_t)_b / (\eta_t)_i \quad \text{Ecc. 2.36}$$

La eficiencia térmica indicada puede estar en los rangos de 40% a 50%, con eficiencias térmicas al freno generalmente cerca de 30%. Algunos motores grandes encendidos por compresión pueden tener eficiencias térmicas al freno mayores a 50%.

La eficiencia del combustible se puede obtener de la siguiente manera:

$$\eta_f = \frac{W}{m_f Q_{HV}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_f Q_{HV}} \quad \text{Ecc. 2.37}$$

$$\eta_f = \frac{1}{(sfc) Q_{HV}} \quad \text{Ecc. 2.38}$$

7. **Eficiencia volumétrica:** Uno de los procesos más importantes que gobiernan cuanta potencia y desempeño se puede obtener del motor es obtener la máxima cantidad de aire que entra al cilindro durante cada ciclo. Más aire significa que más combustible puede ser quemado y más energía puede ser convertida en potencia de salida. Obtener un volumen relativamente pequeño de combustible líquido dentro del cilindro es mucho más fácil que obtener un gran volumen de aire gaseoso necesario para reaccionar con el combustible.

En otras palabras, es la relación que existe entre la cantidad de mezcla aire-combustible que entra al cilindro en el tiempo de admisión y la cantidad requerida para llenar el cilindro a presión atmosférica dada en porcentaje.

Sin embargo debido al corto tiempo del ciclo disponible y las restricciones de flujo puestas por el filtro de aire, sistema de inyección, múltiple de admisión y válvulas de admisión, menos de esta cantidad ideal de aire entra al cilindro. Podemos expresar la **eficiencia volumétrica** de la siguiente forma:

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_a V_d} \quad \text{Ecc. 2.39}$$

$$\eta_v = \frac{n \dot{m}_a}{\rho_a V_d N} \quad \text{Ecc. 2.40}$$

Donde

m_a = masa de aire dentro del motor (o cilindro) para un ciclo

\dot{m}_a = flujo másico de aire dentro del motor

ρ_a = densidad del aire a condiciones atmosféricas fuera del motor

V_d = volumen desplazado

N = velocidad del motor en RPM

n = número de revoluciones por ciclo (para un motor de cuatro tiempos $n = 2$)

Los valores estándar de presión y temperatura del aire pueden ser utilizados para obtener la densidad del aire:

$$P_o \text{ (estándar)} = 101 \text{ kPa} = 14.7 \text{ psia}$$

$$T_o \text{ (estándar)} = 298 \text{ K} = 25^\circ\text{C} = 537^\circ\text{R} = 77^\circ\text{F}$$

$$\rho_a = \frac{P_o}{RT_o} \quad \text{Ecc. 2.41}$$

Donde

P_o = presión del aire de alrededores

T_o = temperatura del aire de alrededores

R = constante de los gases para el aire = $0.287 \text{ kJ/kg-K} = 53.33 \text{ ft-lbf/lbm-}^\circ\text{R}$

En condiciones estándar la densidad del aire es $\rho_a = 2.181 \text{ kg/m}^3 = 0.0739 \text{ lbm/ft}^3$.

Cuando la eficiencia volumétrica es medida experimentalmente, se pueden hacer correcciones de temperatura y humedad cuando se presentan otras condiciones que las estándar. Algunas veces la densidad del aire es evaluada en el múltiple de admisión inmediatamente después que el aire entra al cilindro. Las condiciones presentes en este punto serán de mayor temperatura y menor presión comparada con las condiciones atmosféricas.

III. CICLOS DEL MOTOR

A. Suposiciones de aire estándar

En los ciclos de potencia del gas, el fluido de trabajo se encuentra todo el tiempo den fase gaseosa. Ejemplos comunes de dispositivos que operan en ciclos de gas están los automóviles encendidos por chispa, por compresión, las turbinas de gas convencionales, etc. Todos los mencionados anteriormente obtienen energía directamente de la quema de combustible dentro de las fronteras del sistema, entiéndase para los motores de combustión interna dentro de la cámara de combustión.

A causa de este proceso de combustión y a los cambios en temperatura y presión, el fluido de trabajo cambia de ser una mezcla de aire-combustible a únicamente productos de combustión (N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O , etc.) durante el curso del ciclo.

Si se considera que en el aire predomina el nitrógeno, que es sometido a extremas condiciones en la cámara de combustión prácticamente sin reaccionar químicamente, el fluido de trabajo se asemeja mucho al aire todo el tiempo.

Aunque las máquinas de combustión interna operan en un ciclo mecánico, el fluido de trabajo no se somete a un ciclo termodinámico completo. Es lanzado fuera de la máquina en algún punto del ciclo en lugar de regresarlo al estado inicial. Trabajar en un ciclo abierto es la característica de todas las máquinas de combustión interna. (Cengel, 2003:444)

Los ciclos de potencia de gases reales son bastante complejos. Para llevar el análisis a un nivel manejable, se utilizan las siguientes aproximaciones, conocidas como las suposiciones de aire estándar. (Cengel, 2003:444)

1. El fluido de trabajo es aire que circula de modo continuo en un circuito cerrado y siempre se comporta como un gas ideal. (Cengel, 2003:444)
2. Todos los procesos que integran el ciclo son internamente reversibles. (Cengel, 2003:444)
3. El proceso de combustión es sustituido por un proceso de adición de calor desde una fuente externa. (Cengel, 2003:444)

4. El proceso de escape es sustituido por un proceso de rechazo de calor que regresa el fluido de trabajo a su estado inicial. (Cengel, 2003:444)

Es común utilizar el supuesto, con fines de simplificar el análisis, que el aire tiene calores específicos constantes a temperatura ambiente (25°C). Cuando se utiliza este punto de vista, las suposiciones de aire estándar reciben el nombre de suposiciones de aire frío estándar. (Cengel, 2003:444)

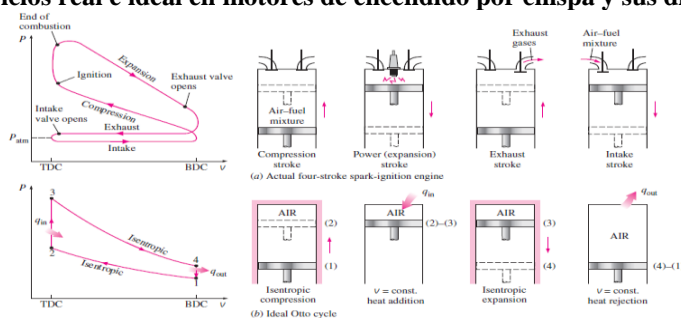
Al utilizar las suposiciones anteriormente listadas, se simplifica considerablemente el análisis. Este modelo simplificado permite analizar de manera cuantitativa la influencia de los parámetros principales (trabajo, torque, potencia, eficiencia, etc.) en el desempeño de las máquinas reales.

B. Ciclo Otto de potencia

1. **Historia:** El ciclo de Otto es el ciclo ideal para las máquinas recíprocas de encendido por chispa. Reciben ese nombre en honor a Nikolaus A. Otto, quien en 1876, en Alemania, construyó una exitosa máquina de cuatro tiempos utilizando el ciclo propuesto por Frenchman Beau de Rochas en 1862. En la mayoría de las máquinas de encendido de chispa el émbolo ejecuta cuatro tiempos completos (dos ciclos mecánicos) dentro del cilindro, y el cigüeñal completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico. (Cengel, 2003:445)

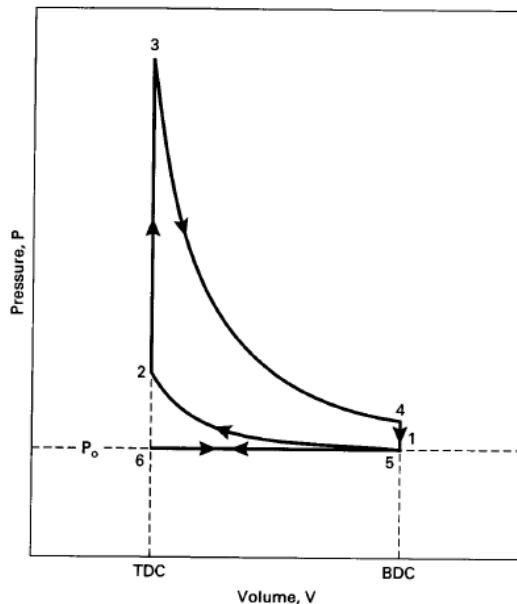
Estas máquinas reciben el nombre de máquinas de combustión interna de **cuatro tiempos**. Un diagrama esquemático de cada tiempo, así como el diagrama P-v para una máquina de encendido de chispa de cuatro tiempos real se presenta en la figura 3.1. (Cengel, 2003:445)

Figura 3.1. Ciclos real e ideal en motores de encendido por chispa y sus diagramas P-v.



2. **Características de operación:** En la figura 3.1 podemos ver el ciclo de potencia de Otto para un motor de cuatro tiempos, encendido por chispa, naturalmente aspirado y trabajando con la válvula de estrangulamiento totalmente abierta. Este es el ciclo con el cual muchos motores de automóviles trabajan y para su análisis éste se aproximará a las condiciones de aire estándar mostradas en la figura 3.2.

Figura 3.2. Condiciones de aire estándar para un ciclo de Otto ideal, 6-1-2-3-4-5-6.



La admisión en el ciclo de Otto es un proceso a presión constante (proceso 6-1, figura 3.2) y comienza con el pistón en su PMS, y con una presión un poco menor que la atmosférica debido a pérdidas en el flujo de aire de admisión, para fines prácticos en cualquier análisis que se realice se utilizará una presión de 100 kPa., para el flujo de aire de admisión.

La temperatura de aire durante la admisión, punto 1, regularmente se encuentra de 25°C a 35°C más caliente que el aire de los alrededores, esto debido a que el aire se calienta mientras pasa por el múltiple de admisión.

Seguido de la admisión se encuentra la compresión, la cual en el ciclo de Otto es una compresión Isentrópica que va desde el PMI hasta el PMS (proceso 1-2, figura 3.2). Ésta se aproxima a la realidad de un motor, exceptuando el principio y final del ciclo. En un motor real, el principio del ciclo se ve afectado por la válvula de admisión que no se

encuentra totalmente cerrada hasta ligeramente después del PMI. Durante la compresión, no solamente hay un incremento de la presión sino también existe un incremento substancialmente considerable de la temperatura debido a esta. El final de la compresión se ve afectada por la llama de la bujía antes del PMS.

Seguido de la compresión viene la adición de calor a volumen constante (proceso 2-3) con el pistón situado en el PMS. Esto reemplaza el proceso de combustión en un motor real, que ocurre cerca de las condiciones de volumen constante. En un motor real, la combustión inicia un poco después del PMS, alcanza su velocidad máxima cerca del PMI y finaliza un poco antes del PMS.

Durante la combustión, una gran cantidad de energía es agregada al aire dentro del cilindro. Esta energía eleva la temperatura del aire a valores muy elevados, dando así temperaturas pico en el punto 3. Este incremento en la temperatura durante el proceso da también como resultado un aumento en la presión, por lo tanto se obtienen picos de presión en el punto 3.

Estos altos valores de presión y entalpía dentro del sistema en el PMS ocasionan el ciclo de potencia (o ciclo de expansión) que sigue al proceso de combustión (proceso 3-4). La alta presión en la corona del pistón lo fuerza hacia el PMI y produce la salida de trabajo y potencia del motor. El ciclo de potencia de un motor real es muy aproximado al proceso Isoentrópico del ciclo de Otto. En un motor real, el inicio de la carrera de potencia se ve afectada por la última parte del proceso de combustión. El final de la carrera de potencia se ve afectada por la válvula de escape que se abre después del PMI. Durante el ciclo de potencia, los valores de la temperatura y presión dentro del cilindro disminuyen mientras el volumen aumenta del PMS al PMI.

3. **Análisis termodinámico del ciclo de Otto:** De la figura 3.2 tenemos:

Proceso 6-1: Admisión de aire a presión constante P_o , válvula de admisión abierta y la válvula de escape cerrada: (Pulkrabek, 2004:90)

$$P_1 = P_6 = P_0 \quad \text{Ecc. 3.1}$$

$$w_{6-1} = P_0(v_1 - v_6) \quad \text{Ecc. 3.2}$$

Donde

$P_1 = P_6 = P_0 =$ presión inicial
 $v_1 =$ volumen específico en el punto 1
 $v_6 =$ volumen específico en el punto 6
 $w_{6-1} =$ trabajo realizado del punto 6 al 1

Proceso 1-2: Tiempo de compresión isentrópica, todas las válvulas cerradas:
 (Pulkrabek, 2004:90)

$$T_2 = T_1(v_1/v_2)^{k-1} = T_1(V_1/V_2)^{k-1} = T_1(r_c)^{k-1} \quad \text{Ecc. 3.3}$$

$$P_2 = P_1(v_1/v_2)^k = P_1(V_1/V_2)^k = P_1(r_c)^k \quad \text{Ecc. 3.4}$$

$$q_{1-2} = 0 \quad \text{Ecc. 3.5}$$

$$w_{1-2} = (P_2 v_2 - P_1 v_1)/(1 - k) = R(T_2 - T_1)/(1 - k) \quad \text{Ecc. 3.6}$$

$$w_{1-2} = (u_1 - u_2) = c_v(T_1 - T_2) \quad \text{Ecc. 3.7}$$

Donde

$T_2 =$ temperatura en el punto 2

$T_1 =$ temperatura en el punto 1

$v_2 =$ volumen específico en el punto 2

$k =$ relación de calores específicos, $k = c_p/c_v = 1.35$

$P_2 =$ presión en el punto 2

$R_c =$ relación de compresión

$q_{1-2} =$ adición de calor del punto 1 al 2

$w_{1-2} =$ trabajo realizado del punto 1 al 2

$R =$ constante de los gases

$u_1 =$ energía interna del punto 1

$u_2 =$ energía interna del punto 2

$c_v =$ calor específico a volumen constante

$V_1 =$ volumen en el punto 1

$V_2 =$ volumen en el punto 2

Proceso 2-3: Adición de calor a volumen constante (combustión), todas las válvulas cerradas: (Pulkrabek, 2004:91)

$$v_3 = v_2 = v_{PMS} \quad \text{Ecc. 3.8}$$

$$w_{2-3} = 0 \quad \text{Ecc. 3.9}$$

$$Q_{2-3} = Q_{in} = m_f Q_{HV} \eta_c = m_m c_v (T_3 - T_2) \quad \text{Ecc. 3.10}$$

$$Q_{2-3} = (m_a + m_f) c_v (T_3 - T_2) \quad \text{Ecc. 3.11}$$

$$Q_{HV} \eta_c = (AF + 1) c_v (T_3 - T_2) \quad \text{Ecc. 3.12}$$

$$q_{2-3} = q_{in} = c_v (T_3 - T_2) = (u_3 - u_2) \quad \text{Ecc. 3.13}$$

$$T_3 = T_{max} \quad \text{Ecc. 3.14}$$

$$P_3 = P_{max} \quad \text{Ecc. 3.15}$$

Donde

$v_3 = v_2 = v_{PMS} =$ volumen específico en el punto 3

$w_{2-3} =$ trabajo realizado del punto 2 al 3

$Q_{2-3} =$ Calor total transferido del estado 2 al 3

m_f = masa de combustible
 Q_{HV} = valor calorífico
 η_c = eficiencia de combustión
 m_m = masa de mezcla aire-combustible
 AF = relación aire-combustible
 q_{2-3} = adición de calor del punto 2 al 3
 T_3 = temperatura en el punto 3, temperatura máxima del sistema
 P_3 = presión en el punto 3, presión máxima del sistema
 u_3 = energía interna del punto 3

Proceso 3-4: Tiempo de expansión o potencia isentrópica, todas las válvulas cerradas: (Pulkrabek, 2004:91)

$$q_{3-4} = 0 \quad \text{Ecc. 3.16}$$

$$T_4 = T_3(v_3/v_4)^{k-1} = T_3(V_3/V_4)^{k-1} = T_3(1/r_c)^{k-1} \quad \text{Ecc. 3.17}$$

$$P_4 = P_3(v_3/v_4)^k = P_3(V_3/V_4)^k = P_3(1/r_c)^k \quad \text{Ecc. 3.18}$$

$$w_{3-4} = (P_4v_4 - P_3v_3)/(1 - k) = R(T_4 - T_3)/(1 - k) \quad \text{Ecc. 3.19}$$

$$w_{3-4} = (u_3 - u_4) = c_v(T_3 - T_4) \quad \text{Ecc. 3.20}$$

Donde

q_{3-4} = adición de calor del punto 3 al 4
 T_4 = temperatura en el punto 4
 v_4 = volumen específico en el punto 4
 V_3 = volumen en el punto 3
 V_4 = volumen en el punto 4
 P_4 = presión en el punto 4
 w_{3-4} = trabajo realizado del punto 3 al 4
 u_4 = energía interna en el punto 4

Proceso 4-5: Rechazo de calor a volumen constante, válvula de escape abierta y válvula de admisión cerrada: (Pulkrabek, 2004:91)

$$v_5 = v_4 = v_1 = v_{PMI} \quad \text{Ecc. 3.21}$$

$$w_{4-5} = 0 \quad \text{Ecc. 3.22}$$

$$Q_{4-5} = Q_{out} = m_m c_v (T_5 - T_4) = m_m c_v (T_1 - T_4) \quad \text{Ecc. 3.23}$$

$$q_{4-5} = q_{out} = c_v (T_5 - T_4) = (u_5 - u_4) = c_v (T_1 - T_4) \quad \text{Ecc. 3.24}$$

Donde

v_5 = volumen específico en el punto 5
 w_{4-5} = trabajo realizado del punto 4 al 5
 Q_{4-5} = rechazo de calor total del punto 4 al 5

Proceso 5-6: Tiempo de escape a presión constante P_o , válvula de escape abierta y válvula de admisión cerrada: (Pulkrabek, 2004:91)

$$P_5 = P_6 = P_o \quad \text{Ecc. 3.25}$$

$$w_{5-6} = P_o(v_6 - v_5) = P_o(v_6 - v_1) \quad \text{Ecc. 3.26}$$

Donde

$P_5 = P_6 = P_o$ = presión inicial, ciclo nuevo

w_{5-6} = trabajo realizado del punto 5 al 6

Eficiencia térmica del ciclo de Otto: (Pulkrabek, 2004:92)

$$(\eta_t)_{Otto} = |w_{net}|/|q_{in}| = 1 - (q_{out}/q_{in}) \quad \text{Ecc. 3.27}$$

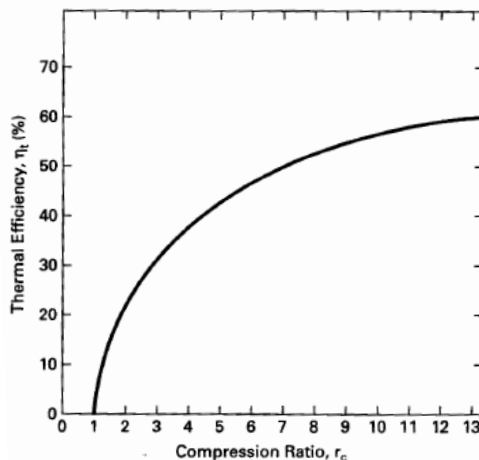
$$(\eta_t)_{Otto} = 1 - [c_v(T_4 - T_1)/c_v(T_3 - T_2)] \quad \text{Ecc. 3.28}$$

$$(\eta_t)_{Otto} = 1 - [(T_4 - T_1)/(T_3 - T_2)] \quad \text{Ecc. 3.29}$$

$$(\eta_t)_{Otto} = 1 - (1/r_c)^{k-1} \quad \text{Ecc. 3.30}$$

Solamente la relación de compresión es necesaria para determinar la eficiencia térmica en un ciclo Otto. Mientras la relación de compresión aumenta, la eficiencia térmica aumenta como se ve en la figura 3.3, esta eficiencia es llamada **eficiencia térmica indicada**. (Pulkrabek, 2004:92)

Figura 3.3. Eficiencia térmica indicada como función de la relación de compresión para un motor de encendido por chispa.



4. **Proceso de escape:** El proceso de escape consiste en dos etapas: el proceso “blowdown” y el tiempo de escape. Cuando la válvula de escape abre cerca del final del tiempo de expansión (punto 4, figura 3.4), los gases que se encuentran a una elevada temperatura son expuestos de repente a un decremento de presión dando como resultado lo que se conoce como el proceso “blowdown”. Un gran porcentaje de los gases abandona la cámara de combustión durante este proceso, llevados por el diferencial de presión que se genera mientras la válvula de escape está abierta. Cuando la presión sobre

la válvula de escape finalmente se estabiliza, el cilindro aún se encuentra con gases de escape dentro de él a una presión igual a la del múltiple de escape, aproximadamente igual a una atmósfera. Estos gases luego son empujados fuera del cilindro a través de la válvula de escape que aún se encuentra abierta por el pistón mientras este viaja de su PMI al PMS durante el proceso de escape. (Pulkrabek, 2004:101)

La temperatura de los gases de escape se reduce expansivamente cuando la presión es reducida de repente durante el proceso de “blowdown”. Sin embargo esta expansión no es reversible, la relación isentrópica de los gases ideales entre presión y temperatura sirve como buen modelo para aproximar la temperatura de escape T_7 en el proceso isentrópico hipotético 4-7 de la figura 3.4. De acuerdo con este modelo tenemos: (Pulkrabek, 2004:101)

$$T_7 = T_4 \left(\frac{P_7}{P_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = T_3 \left(\frac{P_7}{P_3} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad \text{Ecc. 3.31}$$

$$T_7 = T_4 \left(\frac{P_{ex}}{P_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = T_4 \left(\frac{P_0}{P_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad \text{Ecc. 3.32}$$

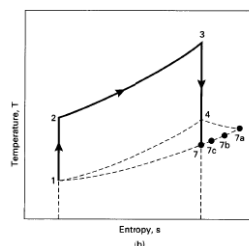
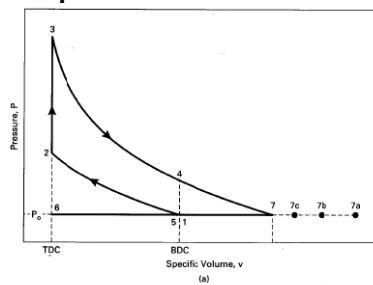
Donde

$$P_7 = P_{ex} = P_0$$

P_{ex} = presión de escape, la cual por lo general puede ser considerada como la presión de los alrededores.

P_7 es la presión en el sistema de escape y por lo regular está muy cercana a una atmósfera.

Figura 3.4. Ciclo Otto estándar, mostrando el proceso 4-7 experimentado por el escape durante el proceso de “blowdown”



Al finalizar el tiempo de escape, aún se encuentra un porcentaje de gases residuales dentro de la cámara de combustión. Estos gases residuales se mezclan con la nueva carga de aire-combustible; y son llevados a un nuevo ciclo. El residual de gases se expresa de la siguiente forma: (Pulkrabek, 2004:103)

$$X_r = \frac{m_{ex}}{m_m} \quad \text{Ecc. 3.33}$$

Donde m_{ex} es la masa de los gases residuales llevados durante el nuevo ciclo y m_m es la masa de la mezcla dentro del cilindro durante todo el ciclo. Valores comunes de gases residuales pueden ir de 3% a 7%. (Pulkrabek, 2004:103)

El valor de X_r puede ser calculado de la siguiente manera:

$$X_r = \left(\frac{V_6}{v_7}\right) / \left(\frac{V_4}{v_4}\right) = \left(\frac{V_6}{v_7}\right) / \left(\frac{v_4}{v_7}\right) = \left(\frac{1}{r_c}\right) \left(\frac{v_4}{v_7}\right) \quad \text{Ecc. 3.34}$$

$$= \left(\frac{1}{r_c}\right) \left[\frac{\left(\frac{RT_4}{P_4}\right)}{\left(\frac{RT_7}{P_7}\right)} \right] \quad \text{Ecc. 3.35}$$

$$X_r = (1/r_c)(T_4/T_{ex})(P_{ex}/P_4) \quad \text{Ecc. 3.36}$$

IV. COMBUSTIBLES Y COMBUSTIÓN

A. Combustibles

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. La mayoría de los combustibles conocidos se componen principalmente de hidrógeno y carbono. Reciben el nombre de combustibles hidrocarburos y se denotan por la fórmula general C_nH_m . Los combustibles hidrocarburos existen en todas las fases, y algunos ejemplos son el carbón, la gasolina y el gas natural.

Los combustibles que actualmente son utilizados en los motores de combustión interna se hacen a partir del petróleo. El petróleo crudo tiene muchas y diferentes clases y tamaños de moléculas de hidrocarburo. Las más pequeñas están en forma gaseosa, como las del gas natural y gas licuado de petróleo (LPG). Las moléculas de tamaño grande son de gasolina. Las moléculas aún más grandes forman el combustible diesel, aceite para calefacción y la kerosina. Las moléculas de mayor tamaño son la base para el aceite lubricante.

La mayor parte de los combustibles hidrocarburos líquidos son una mezcla de numerosos hidrocarburos y se obtienen del petróleo crudo mediante destilación. Los hidrocarburos más volátiles se vaporizan primero, formando lo que se conoce como gasolina. Los combustibles menos volátiles que se obtienen durante la destilación son el queroseno, el diesel y el combustóleo. La composición de un combustible particular depende de la fuente de petróleo crudo.

Aunque los combustibles hidrocarburos líquidos son mezclas de muchos hidrocarburos diferentes, por conveniencia suelen considerarse como un solo hidrocarburo. Por ejemplo, la gasolina se trata como **octano** C_8H_{18} , y el diesel como **dodecano** $C_{12}H_{26}$. Otro hidrocarburo líquido común es el **alcohol metílico** CH_3OH , al que también se le llama metanol y se usa en algunas mezclas de gasolina. El gas natural combustible hidrocarburo gaseoso, que es una mezcla de metano y cantidades más pequeñas de otros gases, algunas veces se trata como **metano** CH_4 , por simplicidad.

Los combustibles más comúnmente usados en los motores de combustión interna son una mezcla de muchos compuestos diferentes de hidrocarburos que se obtienen al refinar el petróleo crudo, estos se diferencian entre sí por la estructura de sus moléculas. La estructura y la magnitud de las moléculas, así como la relación numérica de sus átomos de hidrógeno y de carbono determinan el comportamiento de los combustibles en el momento de quemarse en el motor. Cada átomo de carbono puede combinarse con cuatro de hidrógeno. El petróleo crudo contiene cuatro familias de hidrocarburos:

1. **Los alcanos o parafinas:** son moléculas saturadas de hidrógeno de unión simple y cadena abierta, lo que significa que no puede agregarse más hidrógeno. Esta estructura lineal en forma de cadena es lo que las caracteriza, y son el principal componente del petróleo. Su representación química es (C_nH_{2n+2}) . Estas largas moléculas son relativamente inertes y no son muy apropiadas para un motor de combustión. Los alcanos son cadenas largas de moléculas no tienen características adecuadas para usarse como gasolina. Las moléculas de cadenas pequeñas sí son apropiadas y pueden obtenerse separando las grandes por destilación. (Ríos, 1999:22)
2. **Los cicloalcanos o naftenos:** los naftenos son hidrocarburos con estructura de anillo, son insaturados ya que el anillo puede romperse y agregarse más hidrógeno. Su representación química es (C_nH_{2n}) . (Ríos, 1999:23)
3. **Las olefinas:** son hidrocarburos de cadena abierta que contienen una doble unión y por lo tanto son insaturados. Las olefinas son un componente valioso de la gasolina por su resistencia a la detonación en el motor. Se presentan en poca cantidad en el petróleo pero se pueden transformar convirtiendo las moléculas grandes en moléculas pequeñas mediante desdoblamiento o “cracking”. Su representación química es (C_nH_{2n}) . (Ríos, 1999:23)
4. **Los aromáticos:** el bloque de construcción para los hidrocarburos aromáticos es la estructura de anillo de benceno. Esta estructura anular es muy estable y acomoda grupos adicionales de $-CH_2$ en cadenas laterales y no por expansión en el anillo. Su representación química es (C_nH_{n-6}) . (Ríos, 1999:23)

El petróleo tiene pocos aromáticos, y dado que proporciona a la gasolina cualidades muy valiosas tales como alta potencia y resistencia a la detonación en el motor, la gasolina destilada son parcialmente convertidas en hidrocarburos aromáticos en el proceso de reformado. El combustible que resulta tiene un olor aromático y de allí proviene su nombre. Sin embargo, a partir del creciente interés en el deterioro del aire ambiental, los aromáticos en el combustible vienen regulados por normas estrictas. (Ríos, 1999:23)

Los vehículos son una fuente importante de contaminantes del aire, tales como óxidos nítricos, monóxido de carbono e hidrocarburos, así como de dióxido de carbono (gas de efecto invernadero), y por ende existe un creciente cambio en la industria del transporte para sustituir los combustibles tradicionales basados en petróleo (como la gasolina y el combustible diesel) por combustibles alternativos de quema limpia más amigables con el ambiente, como el gas natural, alcoholes (etanol y metanol), gas licuado de petróleo (LPG) e hidrógeno. El uso de autos eléctricos también está al alza. En la tabla No. 4.1 se presenta una comparación de algunos combustibles alternativos para la transportación a gasolina. Advierta que el contenido energético por unidad de volumen de los combustibles alternativos es más bajo que el de la gasolina o el diesel, y por tanto el rango de conducción de un vehículo con tanque lleno será menor cuando se opere con un combustible alternativo. (Cengel, 2003:682)

Tabla No. 4.1. Comparación de algunos combustibles alternativos contra los combustibles tradicionales basados en petróleo usados en la industria del transporte.

Combustible	Contenido Energético, kJ/L	Equivalente en gasolina *, L/L de gasolina
Gasolina	31 850	1
Diesel ligero	33 170	0.96
Diesel pesado	35 800	0.89
LPG (gas licuado de petróleo, principalmente propano)	23 410	1.36
Etanol (o alcohol etílico)	29 420	1.08
Metanol (o alcohol metílico)	18 210	1.75
CNG (gas natural comprimido, principalmente metano, a 200 atm)	8 080	3.94
LNG (gas natural licuado, principalmente metano)	20 490	1.55

* Cantidad de combustible cuyo contenido energético es igual a la energía contenida en 1 L de gasolina.

B. Combustión

Una reacción química durante la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía recibe el nombre de **combustión**. El oxidante empleado con mayor frecuencia en los procesos de combustión es el oxígeno contenido en el aire atmosférico, por obvias razones: es gratis y se consigue fácilmente. El oxígeno puro O_2 , se emplea como oxidante sólo en algunas aplicaciones especializadas, como el corte y la soldadura, donde no se puede utilizar aire. En consecuencia, son pertinentes unas cuantas palabras acerca de la composición del aire.

En una base molar o de volumen, el aire seco está compuesto por 20.9% de oxígeno, 78.1% de nitrógeno, 0.9% de argón y pequeñas cantidades de dióxido de carbono, helio, neón e hidrógeno. En el análisis de los procesos de combustión, el argón en el aire se trata como nitrógeno, en tanto que los gases que existen en cantidades muy pequeñas se descartan. De modo que el aire seco puede considerarse aproximadamente como 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno en números molares. Por consiguiente, cada mol de oxígeno que entra a una cámara de combustión será acompañado por $0.79/0.21 = 3.76$ mol de nitrógeno, es decir: (Cengel, 2003:683)



Durante la combustión el nitrógeno se comporta como un gas inerte y no reacciona con otros elementos químicos más que para formar una muy pequeña cantidad de óxidos nítricos. Pero aun en ese caso la presencia de nitrógeno influye de manera considerable en el resultado de un proceso de combustión, pues el nitrógeno suele entrar a una cámara de combustión en grandes cantidades a temperaturas bajas y salir a temperaturas considerablemente altas, absorbiendo una gran proporción de la energía química liberada durante la combustión. (Cengel, 2003:683)

El aire que entra a una cámara de combustión contiene algo de vapor de agua (o humedad), que también es digno de consideración. En casi todos los procesos de combustión, la humedad en el aire puede tratarse como un gas inerte, como nitrógeno. Sin embargo, a temperaturas muy altas un poco de vapor de agua se descompone en H_2 y O_2 , así como en H , O y OH . Cuando los gases de combustión se enfrían por debajo de la

temperatura de punto de rocío del vapor de agua, una parte de la humedad se condensa. Es importante predecir la temperatura del punto de rocío debido a que las gotas de agua suelen combinarse con el dióxido de azufre que puede estar presente en los gases de combustión, formando ácido sulfúrico, el cual es muy corrosivo.

Durante un proceso de combustión los componentes que existen antes de la reacción reciben el nombre de **reactivos**, y los componentes que existen después de la reacción se denominan **productos**. (Cengel, 2003:684)

Debe mencionarse que poner un combustible en estrecho contacto con el oxígeno no es suficiente para iniciar la combustión. El combustible debe llevarse arriba de su **temperatura de ignición** para iniciar la combustión. Las temperaturas de ignición mínimas aproximadas de varias sustancias al ser mezcladas con el aire atmosférico son presentadas en la tabla No. 4.2.

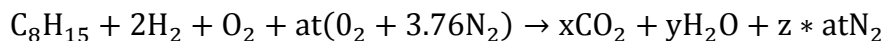
Tabla No. 4.2. Temperatura de ignición para varias sustancias combinadas con aire atmosférico.

Sustancia	Temperatura °C
Gasolina	260
Carbono	400
Hidrógeno	580
Monóxido de carbono	610
Metano	630

Además, las proporciones del combustible y del aire deben estar en un nivel adecuado para que comience la combustión, una cantidad utilizada en el análisis de procesos de combustión para cuantificar las cantidades correctas de combustible y aire es la **relación aire-combustible**.

A manera de ejemplificar lo hablado anteriormente supondremos que dentro de la cámara de combustión de nuestro vehículo se quema 1 kmol de gasolina (C_8H_{15}), 2 kmol de hidrógeno (H_2) y 1 kmol de oxígeno (O) asimismo supondremos que los productos contienen únicamente CO_2 , H_2O y N_2 . Balancearemos la ecuación y encontraremos la relación aire-combustible.

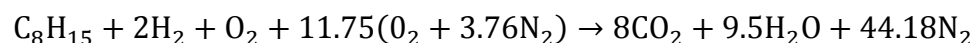
Tenemos que la ecuación sin balancear es la siguiente:



Por el **principio de la conservación de la masa** sabemos que: la masa total de cada elemento se conserva durante una reacción química. Entonces:

$$\begin{aligned} \text{C:} & \quad 8 = x \\ \text{H:} & \quad 15 + 4 = 2y \rightarrow y = 9.5 \\ \text{O}_2: & \quad 1 + at = x + 1/2y \rightarrow at = 8 + 9.5(1/2) - 1 = 11.75 \\ \text{N}_2: & \quad 3.76*at = z*at \rightarrow z = 3.76 \end{aligned}$$

La ecuación balanceada queda:



La relación aire-combustible la obtenemos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} AC &= \frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{combust}}} = \frac{(NM)_{\text{aire}}}{(NM)_{\text{C}} + (NM)_{\text{H}_2}} \\ AC &= \frac{11.75(4.76)(28.97)}{8(12) + 7.5(2)} \\ AC &= 14.59 \approx 15 \text{ kg aire / kg combustible} \end{aligned}$$

C. Procesos de combustión teóricos y reales

Para un análisis sencillo, muchas veces conviene estudiar los procesos de combustión bajo el supuesto que estos se realizan de una forma completa, esto quiere decir que todo el carbono, hidrógeno y azufre (si lo hubiera) del combustible se transforma en CO_2 , H_2O Y SO_2 respectivamente.

Una de las razones obvias y más comunes de que no exista una combustión completa es la falta de oxígeno, pero no es la única. El exceso de oxígeno también puede ocasionar que dentro de la cámara de combustión no se realice una combustión completa, esto debido al limitado tiempo que las partículas de oxígeno se encuentran en contacto con las del combustible para lograr una mezcla adecuada dentro de la cámara de combustión.

El oxígeno es atraído con más fuerza hacia el hidrógeno que hacia el carbono. Por consiguiente, el hidrógeno en el combustible normalmente se quema por completo, formando H_2O , aun cuando haya menos oxígeno del necesario para la combustión

completa. Una parte del carbono, sin embargo, termina como CO o como simples partículas de C (hollín) en los productos. (Cengel, 2003:684)

La mínima cantidad de aire necesario para tener una combustión completa es llamada cantidad de **aire estequiométrico** o **teórico**. Es por ello que al mezclar el combustible con la cantidad de aire teórico este se quemará por completo. Un proceso de combustión con menos cantidad de aire que el teórico está condenado a ser incompleto.

En los procesos de combustión reales es una práctica común emplear más aire que la cantidad estequiométrica, con el fin de aumentar las oportunidades de combustión completa o para controlar la temperatura de la cámara de combustión. La cantidad de aire en exceso de la cantidad estequiométrica se llama **exceso de aire**. La cantidad de exceso de aire suele expresarse en términos del aire estequiométrico como **aire de exceso porcentual** o **aire teórico porcentual**.

Cantidades menores de aire que la cantidad estequiométrica reciben el nombre de **deficiencia de aire**, y se expresan a menudo como **deficiencia de aire porcentual**. La cantidad de aire utilizada en procesos de combustión se expresa también en términos de la *razón de equivalencia*, la cual es la proporción entre la relación combustible-aire real y la relación combustible-aire estequiométrica.

V. CONTAMINANTES Y SUS EFECTOS

Las emisiones vehiculares son sustancias indeseables producidas durante el proceso de combustión de los automóviles, que llegan a convertirse en contaminantes del aire. Si se tuvieran las condiciones ideales y se lograra desarrollar la combustión completa del combustible, se tendrían únicamente agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) como productos directos en los gases residuales.

Actualmente existen nuevas tecnologías que nos permiten acercarnos cada vez mas a un proceso completo de combustión, sin embargo existen aún limitantes que no permiten que el proceso se logre completamente. Estas limitantes pueden comprenderse evidenciando las dos causas principales que originan las emisiones: la combustión incompleta que ocurre durante el proceso de combustión en el motor y la evaporación del combustible en alguna de las etapas de manipuleo dentro del automóvil.

Una tercera causa es la composición del combustible utilizado, ya que hay que tomar en cuenta que los hidrocarburos no se consumen en estado puro, sino que pueden contener disueltos otros tipos de sustancias.

Estas tres causas originan las emisiones contaminantes más importantes producidas por los automóviles, siendo éstas: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos nitrosos (NO_x), partículas en suspensión (TPS) y dióxido de azufre (SO_2). Las dos últimas son consecuencia de la composición del combustible.

A. Comportamiento de los gases contaminantes

Los gases contaminantes como el monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos nitrosos, tienen un comportamiento que es completamente dependiente de la mezcla aire-combustible y los parámetros de operación del motor, ya sean motores encendidos por compresión o por chispa. En cualquier caso, las limitantes técnicas de operación de los motores están en relación con la fracción del combustible administrado, que pudo ser eficientemente quemado durante el proceso de combustión. Por lo tanto, el comportamiento de los gases de escape variará considerablemente respecto de qué tan

cerca se está de lograr una combustión completa en todo instante.

En teoría, si se lograra tener una relación aire-combustible de 14.7:1 o mayor, se podría quemar todo el combustible dentro del cilindro. Durante la operación del motor esto no ocurre así, aunque se tenga un exceso de aire siempre ocurrirá la combustión incompleta en alguna forma, con la consecuente producción de emisiones.

A continuación se presentan los principales contaminantes anteriormente mencionados y los efectos en la salud que cada uno causa así como sus orígenes en la atmósfera. Estos contaminantes representan claramente un peligro al bienestar de los seres humanos, plantas y animales.

1. **Monóxido de carbono (CO):** Es producido por una combustión incompleta debido a un insuficiente suministro de oxígeno a la cámara de combustión, y es debido a esto que frecuentemente se le utiliza como parámetro para la determinación de la mezcla. Si la mezcla aire-combustible se enriquece (hay menos oxígeno del necesario y más combustible), la cantidad de emisiones de CO aumentará. Si por el contrario la mezcla se empobrece (más oxígeno del necesario y menos combustible), la cantidad de emisiones disminuirá hasta que la cantidad de CO formada sea despreciable, aunque nunca sea inexistente. La formación de CO está relacionada directamente con la incapacidad de formar dióxido de carbono (CO₂) y viceversa. Mientras más CO₂ se produzca, menos CO se formará.

Los principales obstáculos que impiden que todo el CO se convierta en CO₂ son:

- La formación de monóxido de carbono (CO) se da rápidamente, pero la subsecuente oxidación en dióxido de carbono (CO₂) toma un tiempo mayor, por lo que no podrá completarse la reacción durante los cortos intervalos de tiempo de que se dispone en la carrera del pistón. (Ríos, 1999:41)
- Ocurre una combustión irregular de la mezcla debido a una distribución irregular del combustible en la cámara de combustión. (Ríos, 1999:41)
- Las temperaturas alrededor de las paredes del cilindro son lo suficientemente bajas, por lo que no permiten que ocurra la combustión en las áreas del cilindro que son cercanas a estas superficies. La temperatura de la llama

desciende de repente tan bajo en estas zonas que la llama se apaga debido a la dispersión de calor, incluso antes de que pueda alcanzar cada una de las superficies fronterizas. Estas zonas reciben el nombre de **zonas de extinción**. (Ríos, 1999:41)

Los principales efectos que el Monóxido de carbono presenta para la salud se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Monóxido de carbono y sus efectos en la salud.

Contaminante:	Monóxido de carbono (CO).
Descripción:	Es un gas incoloro e inodoro, no es irritante, lo que lo hace mucho más peligroso.
Origen en la Atmósfera:	Producto de la combustión incompleta en automóviles Diesel y gasolina, plantas de generación de energía y fábricas.
Efectos sobre la salud:	Impide el intercambio de oxígeno en la sangre, afectando principalmente el sistema cardiovascular y nervioso. Bajas concentraciones han generado efectos adversos en personas con problemas cardíacos y una disminución en la capacidad de ejercitarse entre individuos jóvenes y hombres sanos. Altas concentraciones afectan la percepción, la capacidad de pensar, deterioro del juicio, fatiga, desmayos, visión borrosa y disminuye los reflejos; este envenenamiento puede causar la muerte. Además, afecta el crecimiento fetal en mujeres embarazadas. Junto con otros contaminantes fomenta enfermedades de personas con problemas respiratorios y circulatorios. Una exposición severa puede tener secuelas como desórdenes neuro psiquiátricos.
Observaciones:	En los automóviles es producido por un mal afinamiento del motor y mezcla rica, es decir, falta de oxígeno.

2. **Hidrocarburos (HC):** Estos son combustibles que no llegan a ser quemados que permanecen en un estado gaseoso y que son arrojados a la atmósfera. La parte de hidrocarburos en los gases de escape es considerablemente menor a la parte de CO, por esto los hidrocarburos se miden en partículas por millón (ppm). Como con el CO, si la gasolina fuera quemada en la cámara de combustión, el gas HC no sería emitido en el escape, pero en la realidad el HC siempre se produce en este caso también. Su ocurrencia se debe a varios factores:

- Por combustión incompleta, mientras más rica sea la mezcla, la cantidad de hidrocarburos aumentará. Conforme la mezcla se aproxima al valor ideal con el parámetro lambda (λ) en 1.0, la cantidad de hidrocarburos tenderá hacia un

valor mínimo. Si por el contrario, la mezcla se empobrece demasiado la cantidad de hidrocarburos volverá a aumentar en vez de descender. Esto ocurre debido a que la falta de combustible causa una lenta propagación de la llama dentro del cilindro, con el resultado de que el combustible escapará de la cámara de combustión antes de que pueda ser completamente quemado. Esto se demuestra al tenerse valores casi inexistentes de CO y la aparición de oxígeno en los gases de escape. (Ríos, 1999:41)

- Por escape del cilindro, durante el corto tiempo en que las válvulas de admisión y escape están abiertas un poco de HC es extraído de la cámara de combustión por la válvula de escape antes de que se quemara. Esto se llama **escape de gases del cilindro por traslape**. (Ríos, 1999:41)
- Al igual que con la formación de CO, la temperatura de la llama desciende de repente en las llamadas zonas de extinción previniendo que la mezcla aire-combustible de esas zonas se encienda. El combustible no quemado o parcialmente quemado de estas zonas escapan del cilindro cuando el pistón comienza a moverse durante la carrera de escape. (Ríos, 1999:41)
- La mayor proporción de hidrocarburos que se emite a la atmósfera no proviene de las limitaciones en la cámara de combustión, sino del punto de evaporación de los combustibles, en donde si las circunstancias termodinámicas son favorables se evaporarán ya sea del tanque de combustible o durante su recorrido en la admisión. (Ríos, 1999:42)

Los principales efectos que los Hidrocarburos presentan para la salud se presentan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Hidrocarburos no quemados y sus efectos en la salud.

Contaminante:	Hidrocarburos (HC).
Descripción:	Los hidrocarburos no quemados están constituidos por diferentes combinaciones de hidrógeno y carbono. Son la causa del mal olor en los gases de escape en los vehículos automotores.
Origen en la Atmósfera:	Son el resultado tanto de la combustión incompleta de los combustibles hidrocarburos, como también por la evaporación que se da en los tanques de combustible. No sólo se da en automóviles sino también en procesos industriales.
Efectos sobre la salud:	Irrita los revestimientos de los órganos de la respiración. Irrita los ojos, produce cansancio y una tendencia a toser. Puede tener un efecto cancerígeno o mutativo, causando enfermedades pulmonares.
Observaciones:	En los automóviles se produce por fallas de ignición y fallas internas en el motor. Es responsable en parte de la formación de smog fotoquímico.

3. **Óxidos nitrosos (NO_x):** El nitrógeno en condiciones normales es estable. A altas temperaturas y altas concentraciones de oxígeno, el nitrógeno reacciona con el oxígeno formando monóxido de nitrógeno (NO). El 95% de los óxidos nitrosos encontrados en los gases de escape son monóxidos de nitrógeno, el cual se combina con el oxígeno en la atmósfera para formar dióxido de nitrógeno (NO₂). Por lo tanto la temperatura máxima alcanzada en la cámara de combustión y la relación aire-combustible son los factores que tienen el mayor efecto sobre la concentración del NO_x formado durante la combustión. Estos dos factores influyen en el comportamiento de los óxidos nitrosos en la forma siguiente:

- La mayor concentración de NO_x es producida en una relación aire-combustible de 16:1. Si esta relación aumentara o disminuyera entonces la concentración de NO_x bajaría repentinamente. Al hacer la mezcla más rica, habrá menos oxígeno disponible, impidiendo la formación de los óxidos nitrosos; al hacer la mezcla más pobre, la combustión se hará más lenta previniendo que la temperatura de la llama en la cámara de combustión llegue a su máximo nivel. (Ríos, 1999:42)
- Al avanzar o retardar la sincronización de encendido, se cambia la máxima temperatura alcanzada en la cámara de combustión. Cuando la mezcla aire-combustible se encuentra cerca de la relación teórica 14.7:1, la concentración

de NO_x aumenta notoriamente debido a la alta temperatura de combustión a medida que avanza la sincronización de encendido. (Ríos, 1999:42)

Los principales efectos que los Óxidos nitrosos presentan para la salud se presentan en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Óxidos nitrosos y sus efectos en la salud.

Contaminante: Óxidos nitrosos (NO_x)	
Descripción:	Estos óxidos pueden tener alguna de las siguientes composiciones moleculares: NO , NO_2 , N_2O , N_2O_3 , etc. El motor produce casi exclusivamente monóxido de nitrógeno (NO) que es un gas incoloro, inodoro e insípido. En su salida, el NO reacciona con el oxígeno del aire produciendo dióxido de nitrógeno (NO_2), que es un gas venenoso, de color marrón claro y de olor penetrante.
Origen en la Atmósfera:	Es un efecto secundario de una deficiente combustión. El aire que provee el oxígeno para la combustión también provee nitrógeno, del cual una cierta cantidad reacciona con el oxígeno para formar diferentes óxidos de nitrógeno. Este contaminante proviene de los automóviles, fábricas, plantas de refinamiento de petróleo y plantas de generación de energía.
Efectos sobre la salud:	Causa irritación en los ojos, nariz y garganta. Si la irritación es fuerte causa tos, dolores de cabeza, vértigo y daño en los pulmones, aumentando la susceptibilidad a infecciones respiratorias, principalmente en niños de edad escolar y en personas con problemas asmáticos. También se les conoce por causar cefalitis. De todos los óxidos nitrosos existentes, el dióxido de nitrógeno es el más dañino ya que constituye un veneno activo.
Observaciones:	El nitrógeno es poco reactivo, pero si se alcanzan altas temperaturas dentro de la cámara de combustión, se favorecerá la producción de óxidos nitrosos.

VI. ELECTROQUÍMICA

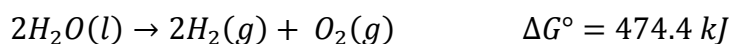
La electroquímica es la rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química. Los procesos electroquímicos son reacciones redox (oxidación-reducción) en donde la energía liberada por una reacción espontánea se convierte en electricidad o la energía eléctrica se aprovecha para inducir una reacción química no espontánea. (Chang, 2003:766)

A. Electrólisis

En la electrólisis se utiliza la energía eléctrica para inducir una reacción química que no es espontánea. Este proceso se lleva a cabo en un dispositivo que se conoce como celda electrolítica. La electrólisis se basa en los mismos principios en que se fundamentan los procesos que se realizan en las celdas electroquímicas.

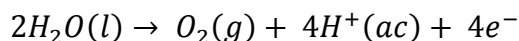
B. Electrólisis del agua

El agua contenida en un vaso en condiciones atmosféricas (1atm y 25°C), no se descompone de manera espontánea en hidrógeno y oxígeno gaseoso porque el cambio de energía libre estándar de la reacción es una cantidad positiva grande:

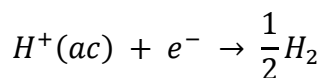


Sin embargo esta reacción se puede inducir en una celda electrolítica, la cual conforma un par de electrodos de un metal inerte, como el platino, sumergidos en agua. Cuando los electrodos se conectan a una fuente de voltaje, no sucede nada porque en el agua pura no hay suficientes iones para que lleven una buena cantidad de corrientes eléctrica; (a 25°C, en el agua pura sólo existe una cantidad de $1E^{-7}$ moles/L de iones H^+ y $1E^{-7}$ moles/L de iones OH^- .)

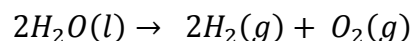
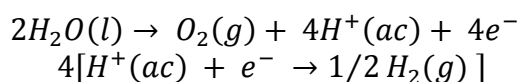
Por otro lado, la reacción se llevará a cabo rápidamente en una disolución de de algún electrolito (ácido sulfúrico H_2SO_4 , hidróxido de potasio KOH, bicarbonato de sodio $NaHCO_3$) porque tiene suficiente cantidad de iones para conducir electricidad. De inmediato empiezan a aparecer burbujas de gas en los dos electrodos. El proceso que tiene lugar en el ánodo es:



Mientras que en el cátodo se tiene:



La reacción global está dada por:



C. Determinación del amperaje de una celda

El motor de combustión interna consume aproximadamente 6.61 Km/l (25 Km/gal), asumiendo una velocidad promedio de desplazamiento de 75 Km/h, se determinaran la cantidad de amperios requeridos por la celda electrolítica para satisfacer por lo menos la mitad de la demanda de combustible del motor, en hidrógeno gaseoso. Luego se determinara la cantidad de oxígeno producido con ese amperaje.

Determinación del consumo de litros de combustible consumidos en una hora:

$$75 \frac{km}{h} * \frac{1}{6.61} \frac{l}{km} \cong 11.34 \frac{l}{h}$$

Cantidad de hidrógeno requerida:

$$\frac{11.34}{2} = 5.67 \frac{l}{h} H_2(g)$$

Masa de hidrógeno requerida:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$n = \frac{1 \text{ atm} * 5.67 \text{ l}}{(.0821 \text{ l} \cdot \text{atm}/\text{K} \cdot \text{mol})(298\text{K})}$$

$$n = 0.232 \text{ mol } H_2$$

$$.232 \text{ mol} * 2.016 \frac{g}{mol} = 0.467g H_2$$

Cantidad de coulombs necesarios:

$$0.232 \text{ mol } H_2 * \frac{2 \text{ mol } e^-}{1 \text{ mol } H_2} * \frac{96500 \text{ C}}{1 \text{ mol } e^-} = 44,776 \text{ C}$$

Cantidad de amperios requeridos:

$$44,776 \text{ C} * \frac{1 \text{ A} \cdot \text{s}}{1 \text{ C}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 12.44 \text{ A}$$

Determinación del oxígeno producido:

$$44,776 \text{ C} * \frac{1 \text{ mol } e^-}{96500 \text{ C}} * \frac{1 \text{ mol } O_2}{4 \text{ mol } e^-} * \frac{32 \text{ g } O_2}{1 \text{ mol } O_2} = 3.712 \text{ g } O_2$$

Volumen de oxígeno producido:

$$V = \frac{nRT}{P}$$

$$V = \frac{(3.712 \text{ g} / 32.00 \text{ g/mol}^{-1})(0.0821 \text{ l} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol})(298\text{K})}{1 \text{ atm}}$$

$$V = 2.836 \text{ l } O_2$$

Estas cantidades de hidrógeno y oxígeno se determinaron a partir del supuesto que el motor utilizado consume una cantidad promedio de 11.34 l/h de combustible. Ahora los cálculos se realizarán con una cantidad más exacta, ésta es los amperios que se sabe que el alternador del vehículo es capaz de producir sin comprometer la carga que el vehículo necesita para funcionar correctamente. Esta cantidad es 25 A.

Cantidad de coulombs necesarios:

$$25 \text{ A} * 1 \text{ h} * 3600 \frac{\text{s}}{1 \text{ h}} * \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ A} * \text{s}} = 90,000 \text{ C}$$

Masa de hidrógeno requerida:

$$90,000 \text{ C} * \frac{1 \text{ mol } e^-}{96500 \text{ C}} * \frac{1 \text{ mol } H_2}{2 \text{ mol } e^-} * 2.016 \frac{\text{g } H_2}{\text{mol } H_2} = 0.94 \text{ g } H_2$$

Volumen de oxígeno producido:

$$V = \frac{nRT}{P}$$

$$V = \frac{(0.94 \text{ g} / 2.016 \text{ g/mol}^{-1})(0.0821 \text{ l} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol})(298\text{K})}{1 \text{ atm}}$$

$$V = 11.4 \text{ l } H_2$$

Determinación del oxígeno producido:

$$90,000 \text{ C} * \frac{1 \text{ mol } e^-}{96500 \text{ C}} * \frac{1 \text{ mol } O_2}{4 \text{ mol } e^-} * \frac{32 \text{ g } O_2}{1 \text{ mol } O_2} = 7.46 \text{ g } O_2$$

Volumen de oxígeno producido:

$$V = \frac{(7.46 \text{ g} / 32.00 \text{ g/mol}^{-1})(0.0821 \text{ l} \cdot \text{atm}/\text{K} \cdot \text{mol})(298\text{K})}{1 \text{ atm}}$$

$$V = 5.7 \text{ l } O_2$$

VII. MATERIALES, MANUFACTURA E INSTALACIÓN DE CELDA ELECTROLÍTICA EN VEHÍCULO

A. Materiales necesarios para construcción de celda electrolítica

La construcción de la celda electrolítica se inicio cortando dos secciones de tubo PVC de 15 cm. de longitud y 3" de diámetro, posteriormente estas dos secciones fueron pegadas a una unión de PVC, con el fin de reducir esfuerzos dentro del tubo para darle un refuerzo a la parte media del mismo, debido a que la unión es de un espesor mayor. En el extremo inferior, se colocó un tapón pegado con adhesivo especial para PVC, teniendo el cuidado que quedara totalmente sellado para lograr una total hermeticidad para evitar fugas de agua en el sistema de la celda. Los arreglos realizados se muestran en la figura 7.1.

Figura 7.1. Secciones de PVC de 15cm y 3" de diámetro (secciones color naranja) unidas entre sí por una unión para PVC (sección media de la carcasa), en la parte inferior se muestra un tapón pegado para evitar fugas



Teniendo ya la carcasa de la celda, se paso a cortar dos platinas de acero inoxidable de 10 1/4" de largo X 1 1/8" de ancho X 1/8" de espesor, a las cuales a 1 1/2" del extremo se les perforó un agujero de 1/4", el cual fue utilizado para sujetar cada una de las platinas a los electrodos por los cuales pasa la corriente eléctrica. El detalle de lo anterior se muestra en las Figuras 7.2 y 7.3 respectivamente.

Figura 7.2. Detalle de platinas de acero inoxidable



Figura 7.3. Detalle de platina sujeta a electrodo y tirante de acero inoxidable para sujetar a electrodo



La sujeción de las platinas con los electrodos se logro con la ayuda de dos tirantes de acero inoxidable los cuales son dos tenedores de 4" de largo. A cada uno se le perforó un agujero para poder sujetarlos a las platinas con tornillos cortos de $\frac{1}{4}$ " de diámetro tal y como se muestra en la figura 7.3 y 7.4.

Figura 7.4. Detalle de tornillos cortos y separación entre ellos y las platinas



Ya teniendo armada la parte exterior e interior se procedió a la fabricación de la tapa superior de la celda, para lo cual se utilizó un tapón para PVC con forma octagonal, que se adaptó a la geometría de la celda. El procedimiento consistió en cortar la cabeza del tapón para que quedara plano para poder adaptar una tapadera de polímero con las mismas dimensiones. Estas adaptaciones se llevaron a cabo en el Taller de Metal Mecánica y en el Laboratorio CNC de la Universidad Del Valle. Las adaptaciones realizadas y la tapadera hecha en el los distintos Laboratorios de la Universidad se muestran en las figuras 7.5, 7.6, 7.7 y 7.8.

Figura 7.5. Detalle de adaptación de tapón



Figura 7.6. Detalle de tapón para ajuste de tapadera de polímero



Figura 7.7. Tapadera de polímero



Figura 7.8. Detalle de tapadera de polímero, vista superior



Teniendo ya la tapadera de polímero, se procedió a perforar tres agujeros, dos de $\frac{1}{4}$ " y uno de $\frac{3}{4}$ "; por los agujeros de $\frac{1}{4}$ " pasan tornillos sin cabeza, los cuales sirven como conductores eléctricos hacia las platinas de acero inoxidable, y en el agujero de $\frac{3}{4}$ " fue instalado un codo de cobre por donde pasan los gases hidrógeno y oxígeno que son conducidos hacia el motor.

El detalle de los arreglos descritos anteriormente se muestra en las siguientes figuras 7.9 y 7.10 respectivamente:

Figura 7.9. Muestra de tornillos sin cabeza unidos a tirantes de acero inoxidable



Figura 7.10. Detalle de tornillos y codo de cobre unidos a tapa de polímero



Ya teniendo la carcasa y la tapadera de la celda, se diseñó y fabricó en los Laboratorios de la Universidad un fitting de cobre que va de 1" a $\frac{3}{4}$ ". Este fitting fue necesario fabricarlo ya que la reducción que va de la celda a la trampa de agua y de la trampa de agua al motor es de dimensiones muy grandes y difíciles de encontrar en el mercado local; de haberse encontrado el precio hubiera sido muy elevado por la naturaleza de sus dimensiones. El fitting fabricado se muestra en las figuras 7.11 y 7.12.

Figura 7.11. Reducción de 1" a $\frac{3}{4}$ "



Figura 7.12. Descripción de la brisca reducción que existe en el fitting.



La trampa de agua es un sistema de seguridad que consiste en una manguera de 1" de diámetro llena de agua instalada inmediatamente después de la celda, con el fin de prevenir cualquier tipo de explosión que hiciera regresar los gases hacia la celda en forma de fuego. El detalle de la trampa de agua se muestra en la sección de instalación de celda.

En la tabla 7.1 se muestra a detalle la lista de materiales necesaria para la fabricación de la celda electrolítica descrita anteriormente.

Tabla 7.1. Lista de materiales

Número	Cantidad	Descripción
1	5 m	cable 10 AWG
2	2 partes	De tubo PVC de 3" de diámetro y 5 7/8" de largo
3	1	Adaptador PVC de 3".
4	1	Tapa de PVC de 3"
5	2	Platinas de acero inoxidable de 10 1/4" X 2 1/8 X 1/8"
6	2	Tirantes de acero inoxidable de 4" de largo
7	12"	De tubo transparente de 1" de diámetro
8	2	Tornillos sin cabeza de 1/4" x 3" de largo
9	6	Tuercas de acero inoxidable de 1/4"
10	4	Arandelas de acero inoxidable de 1/4"
11	1	Tubo de pegamento para PVC
12	1	Oring de 3/16" de espesor
13	1	Cinta de aislar
14	1	Codo de cobre de 3/4"
15	5 m	De manguera plástica de 1/4"
16	1	Rollo de teflón
17	1	Relay de 30 ^a
18	1	Switch on/off
19	1	Fusible de 30 ^a
20	4	lts de agua desmineralizada
21	1	lb de KOH

B. Armado de celda

Teniendo todas las partes listas, el siguiente paso fue el armado de la celda. Como se mencionó anteriormente, al momento de tener las dos secciones de PVC, éstas fueron pegadas a la unión con un adhesivo especial, que también se utilizó para pegar el tapón de la parte inferior y el complemento de la parte superior. Se esperaron 15 minutos para que el adhesivo seicara totalmente; pasado este tiempo se procedió a llenar el cilindro con agua para revisar que no existiera ninguna fuga por las uniones, con la objetivo de no estar abriendo la celda ya en funcionamiento para estar llenándola a su nivel, que es aproximadamente litro y medio de agua. La figura 7.13 muestra el detalle de las partes unidas.

Figura 7.13. Detalle de las secciones de PVC, junta media, tapa inferior y complemento de la parte superior ya pegadas.



A continuación, se preparó la tapa de la celda junto con los electrodos y las platinas de acero inoxidable, por los agujeros de $\frac{1}{4}$ " perforados a la tapa se pasaron dos tornillos sin cabeza por los cuales pasaría la electricidad que sirvió para disociar el hidrógeno y el oxígeno del agua, en la parte central de la misma se instaló un codo de cobre por el cual pasan los gases producto de la electrólisis. Ya teniendo lista la tapa con

los tornillos se pasó a instalar las platinas, éstas fueron unidas a los electrodos por medio de dos tirantes de acero inoxidable con la ayuda de cuatro tuercas, como se puede observar en la figura 7.14.

Figura 7.14. Detalle de unión entre electrodos y tirantes.



En la figura anterior se puede observar que en las puntas de los tirantes se enrolló cinta de aislar, esta medida de seguridad se tomó para aislar las puntas de los tirantes para que no llegara a existir algún tipo de arco eléctrico entre ellas mismas que pudiera ocasionar daños, tanto al alternador del carro como a la celda. Así mismo, en la luz que queda entre los tornillos que sujetan los tirantes a las platinas como se muestra en la figura 7.4, se colocó cinta de aislar así como una pieza de baquelita, que es un aislante; esto con dos fines, el primero mantener totalmente aisladas las dos platinas y el segundo que no existiera contacto y se mantuviera constante la separación de 1" que existe entre ellas. Ver figura 7.15.

Ya teniendo la carcasa y la tapadera lista, se dio paso a la fabricación de un empaque hecho de belumoide, material utilizado para la construcción de empaques en la industria automotriz, así como a la instalación de un oring a la tapadera; con la finalidad de disminuir cualquier tipo de fuga que pudiera existir. Cabe mencionar, que la tapadera fue unida a la carcasa por medio de cuatro tornillos métricos de 1 mm de diámetro. El detalle de los agujeros, oring y empaque se muestran en las figuras 7.16, 7.17 y 7.18 respectivamente.

Figura 7.15. Separación y aislamiento de platinas.



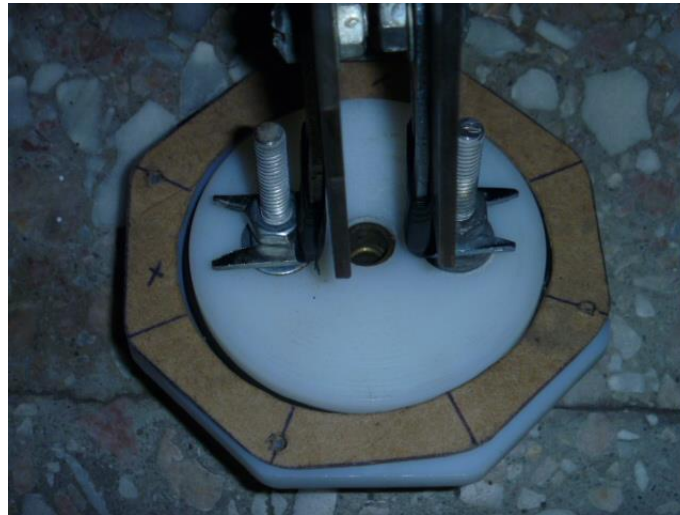
Figura 7.16. Detalle de agujeros para unir la tapadera con la carcasa



Figura 7.17. Detalle de oring instalado



Figura 7.18. Empaque de belumoiide en tapadera.



El paso final del armado fue cerrar la celda con todas las partes unidas e instalarla en el vehículo, la figura 7.19 muestra la celda totalmente armada.

Figura 7.19. Celda armada



C. Instalación de celda en vehículo

La instalación de la celda en el vehículo como se puede observar en la figura 7.20 se realizó en la parte delantera con la ayuda de dos abrazaderas; una vez colocada la celda

en su lugar se procedió a armar el sistema de seguridad o trampa de agua que se muestra en la misma figura.

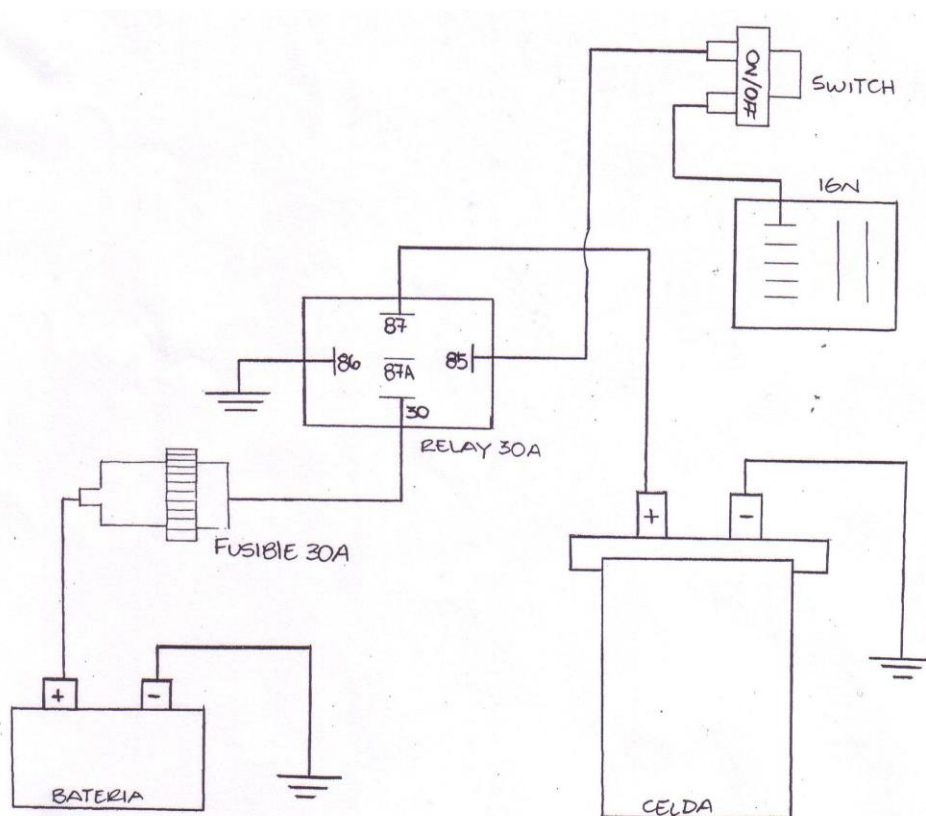
Figura 7.20. Instalación de celda en la parte delantera del vehículo así como vista del sistema de seguridad



Como se puede observar en la figura anterior, en la parte superior de la trampa de agua hay un fitting, como los descritos anteriormente, por el cual salen los gases hacia el motor del vehículo, conducidos por una manguera de $\frac{3}{4}$ ", instalada a todo lo largo de la parte interior del capo del carro.

El funcionamiento de la celda se logro instalando la celda a la batería del vehículo como lo muestra la figura 7.21. Esta figura muestra como de la batería se conecta una línea directa a tierra y otra que va hacia un fusible de 30A el cual va conectado directamente hacia la entrada No. 30 del relay instalado. Las siguientes dos entradas 85 y 86 fueron utilizadas para conectar corriente al switch on/off y para hacer la conexión a tierra del relay respectivamente. Posteriormente la entrada que quedó libre del switch fue conectada a la caja de fusibles del vehículo, específicamente al fusible de ignición de este, esto con el fin de que la celda únicamente produjera hidrógeno y oxígeno cuando el vehículo estuviera encendido. Ya teniendo esta conexión se procedió a conectar la entrada 87 del relay al polo positivo de la celda electrolítica y el polo negativo de la misma fue conectado a tierra, cerrando así el circuito.

Figura 7.21. Detalle de instalación eléctrica en celda electrolítica



Durante la instalación de la celda electrolítica el único problema que se presentó fue la adaptación de las tuberías hacia los inyectores, ya que la geometría dentro del vehículo era bastante complicada para adaptar la tubería.

Ya teniendo instalado todo el sistema, se dio paso a las pruebas en el dinamómetro como se observa en la figura 7.22, esta prueba consistía en colocar el vehículo en un rodillo que permitía el movimiento de las llantas y acelerar a fondo para que así una computadora captara las lecturas de potencia y torque que estaban siendo transmitidas por él rodillo como se puede ver en la figura 7.23. Así mismo, en la figura 7.24 se puede observar el sistema de seguridad instalado por parte de los señores donde se realizó dicha prueba en la parte trasera del vehículo, este sistema consistía en dos straps anclados al piso del taller y sujetos directamente al chasis del carro en esta misma figura se puede observar la sonda colocada en el escape del vehículo para medir el índice de emisiones que este producía; y en la figura 7.25 se ve el mismo sistema de seguridad para la parte delantera. Estas pruebas tuvieron una duración aproximada de una hora, no mostrando ningún tipo de problemas al momento de la realización de las mismas.

Figura 7.22. Vehículo listo para la prueba en el dinamómetro



Figura 7.23. Lectura de potencia y torque entregados por dinamómetro



Figura 7.24. Sistema de seguridad de la parte trasera y sonda para medir índice de emisiones



Figura 7.25. Sistema de seguridad de la parte delantera del vehículo



Durante la práctica el funcionamiento de la celda fue el esperado. El problema principal fue al momento de tratar de calcular el consumo de combustible por galón, esto se iba a realizar camino a San Lucas Sacatepéquez. Al momento de encender la celda, el funcionamiento fue el esperado y si se sintió el aumento en el desempeño del motor. Conforme el recorrido fue aumentando el desempeño fue disminuyendo, ocasionado por

una falla en el vehículo. Se determinó que la falla fue en el alternador y que se debió a que en el momento de hacer la mezcla de agua destilada con electrolito, las cantidades no fueron las adecuadas y por esta razón la demanda de amperios requerida por la celda fue mayor a la del diseño.

Al momento de revisar el vehículo, lo primero que se pudo observar fue que el agua dentro de la celda se calentó hasta el punto de ebullición, ya que por los electrodos de acero inoxidable estaba pasando una cantidad mayor de amperios y por esta razón el calentamiento fue excesivo. Al abrir el capó del carro las líneas estaban totalmente quemadas y también el relay que se le había instalado, esto se puede ver en la figura 7.26.

Figura 7.26. Problemas por calentamiento en líneas eléctricas.



Como se mencionó anteriormente, el calentamiento ocasionó que el agua de la celda se evaporara y condensara en la línea que iba hacia el motor; se hubieran ocasionando daños serios al motor del vehículo, sí el agua condensada hubiera llegado y entrado en éste. El calentamiento generado por la falta de agua en la celda ocasiono la deformación total de la carcasa de la celda así como de la trampa de agua, los daños son presentados en las figuras 7.27 y 7.28 respectivamente.

Figura 7.27. Deformación presentada en la carcasa de la celda después de calentamiento



Figura 7.28. Deformación presentada en la trampa de agua después de calentamiento



Las líneas rojas de la figura 7.27 hacen referencia a la deformación sufrida por la carcasa de la celda.

VIII.RESULTADOS

Los datos técnicos del motor fueron obtenidos de la enciclopedia automotriz Mitchell y se presentan a continuación en la tabla No. 8.1.

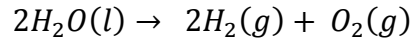
Tabla No. 8.1.⁽⁴⁾ Datos técnicos del vehículo

Modelo y marca del vehículo	1991 Isuzu Trooper
Cilindros	6 en V
Litros	2.8 L
Bore	88.9 mm
Stroke	75.9 mm
r_c	8.9:1
hp @ RPM	125 @ 4800
τ ft*lb @ RPM	150 @ 2400

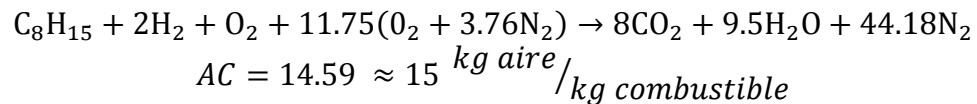
A. Resultados teóricos

Los resultados a continuación presentados son parte del análisis termodinámico realizado a partir de los datos de la tabla No. 8.1.

Del capítulo 6 sabemos que la reacción que tiene lugar en la electrólisis es:



Del capítulo 4 tenemos que la ecuación balanceada de combustión (suponiendo combustión completa) y la relación aire-combustible son respectivamente:



El trabajo indicado neto para un cilindro durante un ciclo es:

$$W_{i,net} = W_{1-2} + W_{3-4} = -0.173 + 0.930 = 0.757kJ$$

Sabiendo que el modelo del vehículo es antiguo vamos a asumir una eficiencia mecánica $\eta_m = 80\%$, para así poder calcular el trabajo al freno para un cilindro:

$$W_b = \eta_m W_i = 0.8 * 0.757 = 0.6056kJ$$

Potencia al freno a 4800 RPM

$$\dot{W}_b = \left(\frac{4800}{60}\right) * 0.5 * 0.6056 * 6$$

$$= 145.3kW = 194hp$$

Torque a 4800 RMP

$$\tau = \frac{\dot{W}_b}{2\pi N} = \frac{145.3}{2\pi \left(\frac{4800}{60}\right)}$$

$$= 0.289kN * m = 289N * m$$

$$= 213ft * lbf$$

Potencia al freno a 2400 RPM

$$\dot{W}_b = \left(\frac{2400}{60}\right) * 0.5 * 0.6056 * 6$$

$$= 72.67kW = 97.45hp$$

Torque a 2400 RPM

$$\tau = \frac{\dot{W}_b}{2\pi N} = \frac{72.67}{2\pi \left(\frac{2400}{60}\right)}$$

$$= 0.289kN * m = 289N * m$$

$$= 213ft * lbf$$

Presión efectiva media al freno:

$$bme_p = \eta_m(imep) = 0.8 * 1621.23 = 1296.98kPa = 188.11psi$$

Potencia específica media al freno a
4800 RPM

$$BSP = \frac{\dot{W}_b}{A_p}$$

$$A_p = \left(\frac{\pi}{4}\right) (8.89) * 6 = 372.43cm^2$$

$$BSP = \frac{143.3}{372.43} = 0.385kW/cm^2$$

Entrega por desplazamiento a 4800 RPM

$$OPD = \frac{\dot{W}_b}{V_d} = \frac{145.3kW}{2.8L} = 51.89kW/L$$

Potencia específica media al freno a
2400 RPM

$$BSP = \frac{\dot{W}_b}{A_p}$$

$$A_p = \left(\frac{\pi}{4}\right) (8.89) * 6 = 372.43cm^2$$

$$BSP = \frac{72.67}{372.43} = 0.195kW/cm^2$$

Entrega por desplazamiento a 2400 RPM

$$OPD = \frac{\dot{W}_b}{V_d} = \frac{72.67kW}{2.8L} = 24.95kW/L$$

B. Resultados prácticos

Luego de realizar las respectivas pruebas control se dio paso al encendido de la celda electrolítica instalada previamente. Al momento de la puesta en marcha; se dio un margen de 20 minutos para la producción de hidrógeno y oxígeno. Esto dio cabida a la

carga de la línea que conduce dichos gases a los inyectores del motor con el propósito de lograr una estabilización en la mezcla hacia los cilindros y lograr resultados más significativos.

Pasados 20 minutos, se procedió a la prueba comparativa para demostrar si el dispositivo de este tipo, logra reducir las emisiones de gases hacia el medio ambiente y lograr un aumento en el desempeño del motor.

Con base a los datos obtenidos en las pruebas realizadas en el dinamómetro, antes y después de instalada la celda electrolítica, se obtuvieron los resultados tabulados en la tabla No. 8.2 respectivamente para la potencia y el torque:

Tabla No. 8.2. Potencia y torque antes y después de la instalación

RPM	Potencia antes de instalación, hp	Torque antes de instalación, ft-lbf	Potencia después de instalación, hp	Torque después de instalación, ft-lbf
2400	45	98.1	44	97
4800	52.5	57.5	69	75
5048	47.52	49.44	68.11	70.86

En relación a los resultados anteriores sabemos que la eficiencia mecánica en las llantas del vehículo estará dada por la formula $\eta_m = \frac{\dot{W}_{b,pr\acute{a}ctico}}{\dot{W}_{b,te\acute{o}rico}}$, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla No. 8.3. Cálculo de eficiencia mecánica de la transmisión a las llantas

RP M	POTENCIA PRÁCTICA, hp	TORQUE PRÁCTICO, ft-lbf	POTENCIA TEÓRICA, hp	TORQUE TEÓRICO, ft-lbf	η_m, al la potencia, %	η_m, al torque, %	Promedio
2400	45	98.1	97.45	213.16	46	46	46
4800	52.5	57.5	194.91	213.16	27	27	27
5048	47.52	49.44	204.98	213.16	23	23	23

Con los resultados anteriores y sabiendo que la potencia al freno va a estar dada por la ecuación $\dot{W}_{freno} = \frac{\dot{W}_{pr\acute{a}ctico}}{\eta_m}$ tenemos los siguientes resultados:

Tabla No. 8.4. Potencia y torque al freno antes y después de la instalación

RPM	Potencia antes de instalación, hp	Torque antes de instalación, ft-lbf	Potencia después de instalación, hp	Torque después de instalación, ft-lbf
2400	97.62	212.80	95.45	210.42
4800	194.77	213.31	255.98	278.24
5048	204.93	213.21	293.72	305.58

Sabemos que existen tres formas de clasificar los motores de combustión interna dependiendo su desempeño las cuales son: la potencia específica al freno (BSP), la entrega por desplazamiento (OPD) y la presión media efectiva al freno (BMEP). Estos tres datos nos serán de utilidad para realizar un análisis comparativo sobre el desempeño realizado por el motor antes y después de la instalación de la celda electrolítica. Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla No. 8.5 estos fueron obtenidos por medio de las ecuaciones 2.15, 2.21 y 2.22.

Tabla No. 8.5. BSP, OPD y BMEP antes y después de la instalación

Potencia a las llantas antes de instalación, kW	Torque a las llantas antes de instalación, kN-m	BSP antes de instalación, kW/cm²	OPD antes de instalación, kW/L	BMEP antes de instalación, kPa
72.79	0.288	0.20	26.00	1294.11
145.24	0.289	0.39	51.87	1297.21
152.82	0.289	0.41	54.58	296.57
Potencia a las llantas después de instalación, kW	Torque a las llantas después de instalación, kW	BSP después de instalación, kW/cm²	OPD después de instalación, kW/L	BMEP después de instalación, kPa
71.17	0.285	0.19	25.42	1279.59
190.88	0.377	0.51	68.17	1692.02
219.03	0.414	0.59	78.22	1858.32

Los resultados de la potencia y torque máximos antes y después de instalado el sistema se muestran en la tabla No. 8.6 respectivamente, registrando así valores a plena carga (WOT):

Tabla No. 8.6. Resultados prueba control y prueba experimental de desempeño

Desempeño	Hp	Ft-lb	RPM
Potencia antes de instalación	64.19		De 3800 a 4150
Torque antes de instalación		101.74	De 2900 a 3400
Potencia después de instalación	69.07		De 4300 a 5000
Torque después de instalación		98.06	De 2500 a 3200

Como se puede ver el valor de potencia aumenta un 7.6% y el de torque disminuye un 3.62%.

Cabe mencionar que los valores obtenidos tanto para la potencia como para el torque máximos no son al freno, son valores obtenidos en las ruedas del vehículo lo cual en carros de tracción trasera normales pueden variar hasta en un 20% y en vehículos de doble tracción como nuestro caso puede variar incluso más, ya que debe pasar por una segunda caja de velocidades que es la de la doble tracción y a través del eje cardan que es el que transmite la potencia proveniente del motor hacia el diferencial y del diferencial hacia las ruedas.

Respecto al análisis de gases, la tabla No. 8.7, muestra los resultados del porcentaje de CO, CO₂, O₂ y partes por millón de hidrocarburos (HC) que se encuentran presentes en los gases de escape antes y después de la instalación de la celda electrolítica:

Tabla No. 8.7. Resultados prueba control y experimental de emisiones

Prueba	CO, %	CO₂, %	O₂, %	HC, ppm
CONTROL	1.06	10	0	237
EXPERIMENTAL	0.5	13.1	0	153

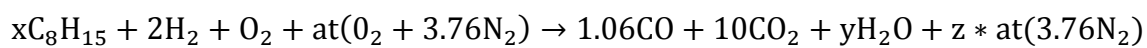
También se obtuvo antes de la instalación un valor de λ de 0.956 lo cual nos indica que existe una mezcla rica. Con estos resultados podemos argumentar que la formación de CO es consecuencia de un suministro de oxígeno bajó a la cámara de combustión consiguiendo así una combustión incompleta. Por otro lado, la formación de

hidrocarburos (HC) se debe a que hay residuos de combustible dentro de los gases de escape debidos como se mencionó anteriormente a una combustión incompleta y una mezcla rica.

Luego de la instalación se obtuvo un valor para λ de 0.983 lo cual significa que la mezcla cada vez se va convirtiendo en estequiométrica lo que nos revela que se va mezclando mejor el combustible con el oxígeno y el hidrógeno logrando así también una combustión cada vez más completa.

Con base a los resultados anteriores del análisis de gases, podemos re calcular la ecuación química para la combustión y así poder comparar los resultados con la ecuación presentada en el capítulo 4 donde supusimos una combustión completa, los resultados obtenidos son los siguientes:

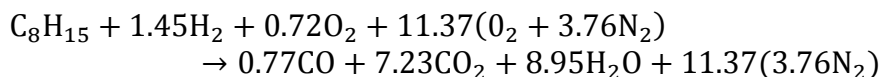
Tenemos que la ecuación sin balancear antes de la instalación del dispositivo es la siguiente:



Entonces:

$$\begin{aligned} C: \quad 8x &= 1.06 + 10 \rightarrow x = 1.3825 \\ H: \quad 15x + 4 &= 2y \rightarrow y = 12.3688 \\ O_2: \quad 1 + at &= (1.06/2) + 10 + y/2 \rightarrow at = 15.7144 \\ N_2: \quad 3.76*at &= z*at*3.76 \rightarrow z = 1 \end{aligned}$$

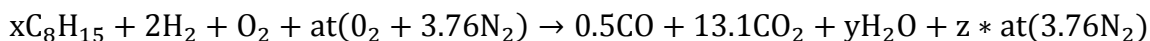
La ecuación balanceada queda:



La relación aire-combustible obtenida es la siguiente:

$$AC = 14.1251 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$$

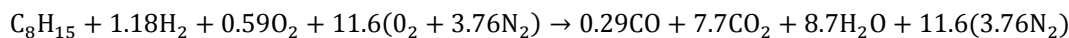
Tenemos que la ecuación sin balancear después de la instalación del dispositivo es la siguiente:



Entonces:

$$\begin{aligned} \text{C:} \quad 8x &= 0.5 + 13.1 \rightarrow x = 1.7 \\ \text{H:} \quad 15x + 4 &= 2y \rightarrow y = 14.75 \\ \text{O}_2: \quad 1 + at &= 0.25 + 13.1 + 7.372 \rightarrow at = 19.725 \\ \text{N}_2: \quad 3.76*at &= z*at*3.76 \rightarrow z = 1 \end{aligned}$$

La ecuación balanceada queda:



La relación aire-combustible obtenida es la siguiente:

$$AC = 14.4109 \text{ kg aire} / \text{kg combustible}$$

Con los resultados obtenidos con anterioridad, se puede argumentar que la disminución en las emisiones es bastante considerable puesto que el valor de la relación aire-combustible cada vez se va acercando a un valor teórico de 14.7 que según nos indica la teoría, se podría llegar a quemar todo el combustible dentro de la cámara de combustión aunque sabemos que en la práctica no es así ya que como los resultados del dinamómetro muestran se logró alcanzar valores de relación aire-combustible de hasta 16 y no se logró eliminar por completo la emisión de gases contaminantes.

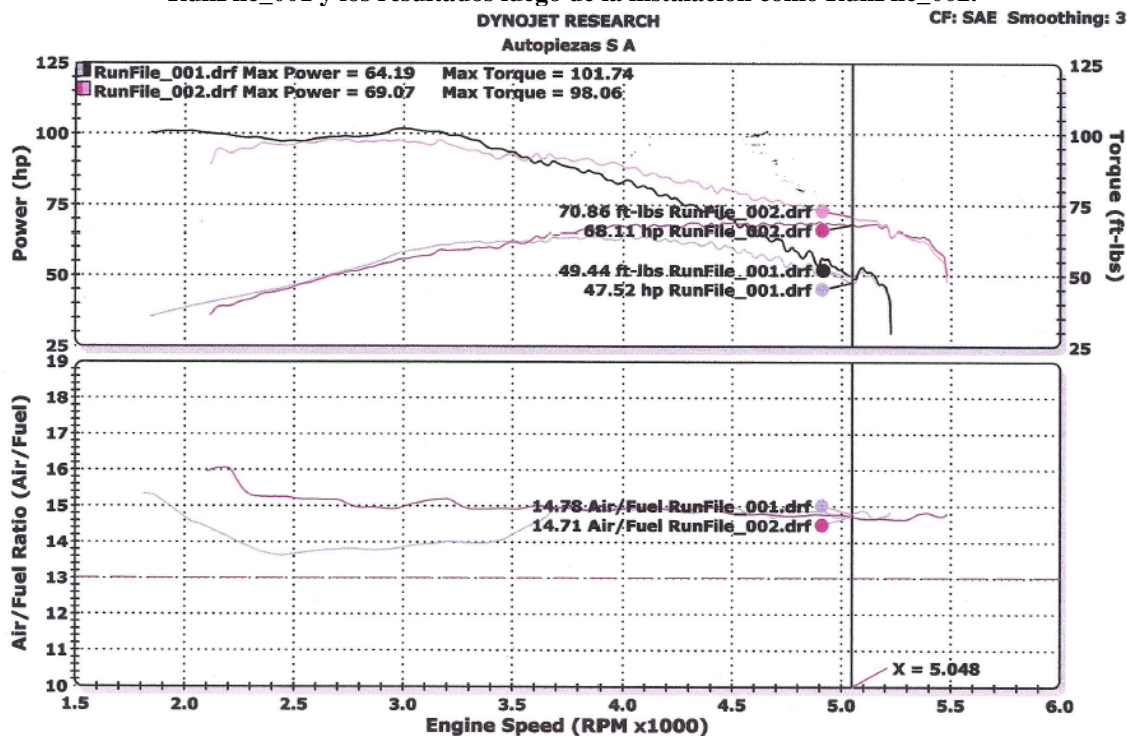
Al inicio de la prueba control el valor de la relación aire-combustible fue 15.25 aproximadamente a 1800 RPM, lo cual indica que cada vez se iba acercando a una mezcla estequiométrica o ideal para el funcionamiento del motor y así lograr también una combustión completa, conforme la velocidad del motor fue aumentando la relación aire combustible fue disminuyendo llegando a un valor mínimo de 13.8 lo cual es una mezcla rica lo cual indica que el motor estaba siendo acelerado al máximo para poder realizar la prueba, pasadas las 3700 RPM la relación fue tomando un valor estable de aproximadamente 15 lo cual es una buena relación no muy rica y no muy pobre para lograr quemar la mayor cantidad de combustible y lograr tener un índice bajo en lo que a CO y HC se refiere.

Comparando la relación aire-combustible instalada la celda electrolítica, se puede observar en la figura 8.1 que al inicio de la prueba, el valor máximo es de 16 a 2100 RPM una mezcla bastante pobre en comparación de la prueba control, sin embargo a partir de

las 2300 RPM este valor se fue estabilizando llegando a aproximadamente 15 al igual que en la prueba control.

Sin embargo el hecho que se haya estabilizado mucho más rápido puede ser un factor determinante para la gran disminución de emisiones registrada, las cuales son de 52.83% para el CO y un 35.5% a lo que hidrocarburos respecta.

Fig. 8.1. Resultados prácticos en dinamómetro mostrando los resultados antes de la instalación como RunFile_001 y los resultados luego de la instalación como RunFile_002.



C. Discusión de resultados

Según los resultados mostrados en la tabla No. 8.2 a carga baja 2400 RPM el valor de la potencia y el torque disminuyen un 2.22% y 1.12% respectivamente luego de haber instalado el sistema, esto es debido a que se está modificando la carga de oxígeno que está entrando al motor variando de cierta manera la eficiencia volumétrica de este, debemos tomar en cuenta también que se está inyectando otro tipo de combustible, hidrógeno, y que este por ser una molécula más pequeña que la del combustible está robando calor de la cámara de combustión trayendo como consecuencia que el desempeño se reduzca a bajas cargas en lo que se logra calentar el cilindro a una

temperatura adecuada para que la combustión del combustible e hidrógeno pueda existir sin afectar el desempeño de dicho motor.

A lo largo que la velocidad del motor va aumentando se puede ver que tanto la potencia y el torque aumentan a cargas altas, como se puede observar a 4800 y 5048 RPM el desempeño del motor tiene un aumento de 31.4% y 43.3% respectivamente para la potencia y 30.4% y 43.4% para el torque. Estos resultados son debidos a que la entrega de oxígeno fue mayor luego de instalada la celda electrolítica logrando así un aumento en la eficiencia volumétrica en los cilindros, como se puede observar en la figura 8.1, las curvas para la potencia y el torque después de la instalación se vuelven más estables y tienen valores mayores de las 3500 RPM en adelante en comparación a las previas de la instalación las cuales muestran que a partir de las 3500 RPM empiezan a descender rápidamente a valores bajos.

Refiriéndonos a la eficiencia mecánica se opto por tomar los valores a 2400, 4800 y 5048 RPM puesto que según la tabla No. 1, a 2400 y 4800 RPM se tiene el torque y la potencia máxima al freno del motor teóricamente y el valor de 5048 RPM se tomó ya que es un punto exacto conocido en las curvas de desempeño y puede ser un punto fácil de calcular; como es de esperarse los valores coinciden exactamente y la eficiencia mecánica va disminuyendo con forme el motor va aumentando su velocidad puesto que se tienen más perdidas por fricción que a cargas bajas.

Luego de haber calculado la eficiencia mecánica del motor se dio paso a calcular la potencia al freno antes y después de instalada la celda electrolítica, podemos decir que mientras va aumentando la eficiencia volumétrica y la mezcla va siendo cada vez más homogénea se puede llegar a tener un aumento en la potencia y el torque al freno de hasta un 43.32% a una carga de 5048 RPM. Esto debido como se menciona anteriormente a que hay más oxígeno en la mezcla con el cual el combustible puede mezclarse, la inyección de hidrógeno hace que la cámara de combustión se encuentra más caliente y la mezcla aire-combustible se pueda quemar más rápido moviendo con mayor velocidad los pistones y por consiguiente el eje cigüeñal teniendo como resultado un aumento significativo en el desempeño del motor.

Teniendo calculado el valor de la potencia al freno, se calcularon 3 parámetros importantes para la clasificación de los motores de combustión interna, estos fueron la potencia específica al freno (BSP), la entrega por desplazamiento (OPD) y la presión media efectiva al freno (BMEP), como se puede ver en la tabla No. 8.5 los primeros dos parámetros sirven para saber cuánta potencia está siendo entregada directamente por el tamaño del motor, viéndose una vez más involucrada la eficiencia volumétrica ya que es un factor que afecta directamente al cálculo de la potencia al freno. Como se puede ver a 4800 RPM los valores del BSP y OPD tienen un aumento del 30% respectivamente.

Con lo que se refiere a la potencia media efectiva al freno BMEP podemos decir que es un parámetro que se toma para comparar el desempeño del motor antes y después de instalado el sistema. Mientras mayor sea el valor de BMEP más trabajo neto será entregado por ciclo. A 4800 RPM se tiene un aumento del 30.43% de BMEP, después de todos los cálculos efectuados anteriormente es aquí donde podemos decir que si se tuvo un aumento en el desempeño del motor después de haber instalado la celda electrolítica.

Al momento en que se realizaban las pruebas de desempeño se fue midiendo la producción de gases nocivos para el medio ambiente, se observó que al momento de encender el sistema, el porcentaje de hidrocarburos aumento hasta 395 ppm esto debido a que se estaba inyectando el hidrógeno y como se menciono anteriormente la temperatura de la cámara de combustión disminuyo teniendo como consecuencia dicho aumento en las partes por millón de combustible que no es quemado.

Mientras fue aumentando la velocidad del motor y la temperatura dentro de la cámara de combustión, se noto una gran disminución tanto en los HC como en el CO que se estaba formando. Esto fue debido a que se tenía una mejor relación aire-combustible y la mayor parte de CO se estaba convirtiendo en CO₂ lo que nos indica que se estaba logrando tener una combustión casi completa. La disminución de los HC también se le puede atribuir a que tanto el múltiple de escape y la tubería de escape se encontraban a una mayor temperatura evaporando parte del combustible que se encontraba presente en los desechos del motor.

La disociación del agua mediante electrólisis genera una mezcla de gas hidrógeno y oxígeno, los cuales fueron adheridos a la mezcla aire-combustible del motor. Uno de los efectos que se hizo notar fue un mejor desempeño del motor así como la limpieza de depósitos de carbono que se encontraban en las orillas de las gargantas que contienen a los inyectores.

IX. CONCLUSIONES

Con base a los resultados anteriormente obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

1. Luego de realizada la práctica se compararon los resultados obtenidos y podemos llegar a la conclusión que después de instalada la celda electrolítica aumenta el desempeño del motor a cargas altas en un 31% para la potencia y un 43% para el torque, logrando así demostrar uno de los objetivos principales de este trabajo.
2. A cargas bajas podemos decir que la potencia y el torque después de instalada la celda electrolítica no son representativos puesto que los valores presentados podrían variar realizando más de una prueba.
3. La potencia y el torque al freno con la instalación del sistema aumento un 43%.
4. La potencia específica al freno después de la instalación de la celda electrolítica tuvo un aumento del 30%.
5. La entrega por desplazamiento después de instalado el sistema tuvo un aumento del 30%.
6. La presión media efectiva al freno tuvo un aumento del 30.43% por lo que podemos asegurar que la instalación de la celda electrolítica si mejoro el desempeño del motor.
7. La producción de hidrocarburos al momento de encender el sistema puede llegar a aumentar pero con forme el sistema se va estabilizando y la cámara de combustión se va calentando la producción de hidrocarburos disminuye.
8. Podemos decir que entre las ventajas técnicas de la implementación de un sistema como este tenemos la limpieza de depósitos de carbono formados en el motor, una mejora en la eficiencia volumétrica, un aumento en la relación aire-combustible.

de hasta un valor de 16 logrando así una disminución en el porcentaje de emisiones de CO a plena carga del 52.83% y de 35.5% en lo que respecta a hidrocarburos producidos.

9. Podemos decir que una de las desventajas encontradas en este estudio son las limitantes tecnológicas que existen en nuestro país, ya que para que fuera un análisis más significativo hubiera sido de gran ayuda medir otras variables como lo son la temperatura y presión dentro de los cilindros, la temperatura de gases de escape, la producción de H₂ y así mismo que el análisis de gases de escape fuera más completo.

X. RECOMENDACIONES

1. Es recomendable encontrar un lugar donde poder hacer mediciones de temperatura y presión dentro de los cilindros del motor, para así saber con exactitud cuanta energía está siendo consumida por la nueva mezcla de combustible al momento de ser encendida la celda electrolítica, así como para controlar las temperaturas pico en las coronas de los cilindros para así poder controlar los esfuerzos a los cuales están siendo sometidas y así prevenir daños al motor.
2. Se recomienda que con la ayuda de un manómetro sea controlada la presión de la celda, para que se puedan hacer ajustes a ésta y así poder controlar la presión a la cual sea más eficiente.
3. La temperatura de los gases de escape es un factor importante que debería lograr medirse, puesto que esta ayuda a la disminución en la emisión de HC y también para poder controlar la temperatura de punto de rocío de los gases de escape, la cual al ser alcanzada el contenido de vapor de agua que se encuentra en los gases es condensada en el tubo de escape obteniendo así como resultado vapor de agua el cual no es nocivo al medio ambiente.
4. Se recomienda poder medir la cantidad de Hidrógeno y Oxígeno generado así poder hacer ajustes a la mezcla.
5. Al momento de mezclar el electrolito con el agua desmineralizada para tener una mejor conducción eléctrica es recomendable que con la ayuda de un multímetro se mida la cantidad de amperios que la celda está consumiendo y así garantizar la vida útil del alternador del carro.
6. Se recomienda hacer más de una corrida en el dinamómetro para poder sacar un promedio de los datos obtenidos y así lograr que el estudio sea más exacto.
7. Es recomendable utilizar un material distinto al PVC para la carcasa de la celda ya que este es un aislante y no puede ser enfriado por ventilación natural, puede utilizarse aluminio o algún otro metal teniendo la precaución de que este no esté en contacto con la energía conducida hacia los electrodos ya que podría ocasionar un corto en el sistema.

8. El tipo de cable debe aguantar la cantidad de amperios que pasara a través de él, se recomienda un calibre 10 AWG para este trabajo.
9. Las mangueras que se utilicen para transportar los gases producidos por la celda deben ser resistentes a la temperatura ya que estas deben conducirse a través del capo del carro hacia el motor caliente.
10. El estudio realizado fue hecho en un motor gasolina, es recomendable realizar este mismo tipo de pruebas en motores diesel para así comparar el desempeño entre estos.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Chang, Raymond. 2003. *QUÍMICA*. 7ma. Edición. México, McGraw-Hill. 1001 págs.
- (2) García, Estuardo. 1999. <<*Control de emisiones de gases contaminantes en los motores de combustión interna del transporte automotriz de Guatemala*>>. Tesis Universidad del Valle de Guatemala.
- (3) Heywood, John. 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Estados Unidos. McGraw-Hill. 930 págs.
- (4) *Mitchell Repair Information Company*. LLC. 2005.
- (5) Pulkrabek, Willard. 2004. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. 2da. Edición. Estados Unidos. Pearson Education, Inc. 478 págs.
- (6) Yunus, Cengel; M. Boles. 2003. *TERMODINÁMICA*. México, McGraw-Hill. 829 págs.

XII. APÉNDICE

Análisis del ciclo de Otto

Sabemos que la temperatura en el punto 1 de la figura 2.2 va a ser generalmente de 25°C a 35°C más caliente que el aire de los alrededores. (Pulkrabek, 2004:90)

Es por eso que supondremos una temperatura de 60°C y una presión de 100 kPa para la admisión, esta presión es un poco menor como se explico anteriormente debido a perdidas en el flujo de admisión.

De lo anterior tenemos un análisis del ciclo de Otto completo, obteniendo los siguientes resultados:

$$V_d = \frac{2.8}{6} = 0.4667 \text{ L} = 4.667 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$
$$V_c = \frac{4.67 \times 10^{-4}}{(8.9 - 1)} = 5.907 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Estado 1:

$$P_1 = 100 \text{ kPa}$$
$$T_1 = 60^\circ\text{C} = 333 \text{ K}$$
$$V_1 = V_d + V_c = 4.667 \times 10^{-4} + 5.907 \times 10^{-5} = 5.26 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

La masa de la mezcla puede ser determinada de la siguiente forma:

$$m_m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{100 * 5.26 \times 10^{-4}}{0.287 * 333} = 5.5 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Estado 2:

$$P_2 = P_1 (r_c)^K = 100(8.9)^{1.35} = 1,912.83 \text{ kPa}$$
$$T_2 = T_1 (r_c)^{K-1} = 333(8.9)^{0.35} = 715.7 \text{ K}$$
$$V_2 = V_c = 5.907 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Asumiendo que hay un residual de gases de escape del 4% podemos encontrar la masa de aire y de combustible de la siguiente forma:

$$m_a = \left(\frac{15}{16}\right) * 0.96 * 5.5 \times 10^{-4} = 4.95 \times 10^{-4} \text{ kg de aire}$$

$$m_f = \left(\frac{1}{16}\right) * 0.96 * 5.5 \times 10^{-4} = 3.3 \times 10^{-5} \text{ kg de combustible}$$

$$m_{ex} = 0.04 * 5.5 \times 10^{-4} = 2.2 \times 10^{-5} \text{ kg de gases residuales}$$

Estado 3:

Para el siguiente análisis nos basaremos en el supuesto que tenemos combustión completa por lo tanto una eficiencia de combustión $\eta_c = 100\%$ y el valor de Q_{HV} para la gasolina será de 43,000 kJ/Kg. (2)

$$Q_{in} = m_f Q_{HV} \eta_c = m_m c_v (T_3 - T_2)$$

$$Q_{in} = 3.3 \times 10^{-5} * 43,000 * 1 = 1.419 \text{ kJ}$$

$$1.419 = 5.5 \times 10^{-4} * 0.821 * (T_3 - T_2) \Rightarrow T_3 = T_{max} = 3,858.21 \text{ K}$$

$$P_3 = P_2 \left(\frac{T_3}{T_2}\right) = 1,912.83 \left(\frac{3,858.21}{715.7}\right) = P_{max} = 10,311.7 \text{ kPa}$$

Estado 4:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{1}{r_c}\right)^{k-1} = 3858.21 \left(\frac{1}{8.9}\right)^{0.35} = 1795.14 \text{ K}$$

$$P_4 = P_3 \left(\frac{1}{r_c}\right)^k = 10,311.7 \left(\frac{1}{8.9}\right)^{1.35} = 539.08 \text{ kPa}$$

Conociendo ya las presiones y temperaturas en el ciclo podemos dar paso a recalcular el porcentaje de gases residuales (X_r) dentro de la cámara de combustión y así recalcular el estado 3 y 4, se realizarán tantas iteraciones sean necesarias hasta obtener un valor constante para X_r . Antes de calcular este porcentaje debemos encontrar el valor de la temperatura de los gases de escape del punto 7 Figura No 3.4:

$$P_7 = P_{ex} = P_0$$

$$T_7 = T_3 \left(\frac{P_7}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 3858.21 \left(\frac{100}{10,311.7}\right)^{\frac{0.35}{1.35}} = 1159.88 \text{ K}$$

De lo anterior tenemos:

$$X_r = \left(\frac{1}{r_c}\right) \left(\frac{T_4}{T_{ex}}\right) \left(\frac{P_{ex}}{P_4}\right) = \left(\frac{1}{8.9}\right) \left(\frac{1795.14}{1159.88}\right) \left(\frac{100}{539.08}\right) = 0.032 = 3.22\%$$

Recalculando los estados 3 y 4 tenemos:

$$\begin{aligned}
 Q_{in} &= 1.419kJ \\
 T_3 &= 3,858.21K \\
 P_3 &= 10,311.7kPa \\
 T_4 &= 1795.14K \\
 P_4 &= 539.08kPa
 \end{aligned}$$

Una segunda iteración da valores de:

$$\begin{aligned}
 T_7 &= 1159.88K \\
 X_r &= 0.032 = 3.22\%
 \end{aligned}$$

Después de una segunda iteración nos podemos dar cuenta que el valor de T_7 y X_r no muestran cambios así que se por conveniencia se tomara un valor de 3% para X_r ; teniendo los siguientes resultados definitivos:

$$\begin{aligned}
 m_a &= \left(\frac{15}{16}\right) * 0.97 * 5.5x10^{-4} = 5x10^{-4}kg \text{ de aire} \\
 m_f &= \left(\frac{1}{16}\right) * 0.97 * 5.5x10^{-4} = 3.3x10^{-5}kg \text{ de combustible} \\
 m_{ex} &= 0.03 * 5.5x10^{-4} = 2.7x10^{-5}kg \text{ de gases residuales}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{in} &= 1.419kJ \\
 T_3 &= 3,858.21K \\
 P_3 &= 10,311.7kPa \\
 T_4 &= 1795.14K \\
 P_4 &= 539.08kPa
 \end{aligned}$$

El trabajo producido en el ciclo isentrópico de potencia para un cilindro durante un ciclo es:

$$W_{3-4} = m_m R \frac{(T_4 - T_3)}{1 - k} = 5.5x10^{-4} * 0.287 * \frac{1795.14 - 3858.21}{1 - 1.35} = 0.930kJ$$

Trabajo absorbido durante la compresión isentrópica:

$$W_{1-2} = m_m R \frac{(T_2 - T_1)}{1 - k} = 5.5x10^{-4} * 0.287 * \frac{715.7 - 333}{1 - 1.35} = -0.173kJ$$

El trabajo indicado neto para un cilindro durante un ciclo es:

$$W_{i,net} = W_{1-2} + W_{3-4} = -0.173 + 0.930 = 0.757kJ$$

Calor transferido a un cilindro durante un ciclo:

$$Q_{in} = m_f Q_{HV} \eta_c = 3.3 \times 10^{-5} * 43,000 * 1 = 1.419 kJ$$

De lo anterior podemos calcular la eficiencia térmica indicada:

$$\eta_{t,i} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{0.757}{1.419} = 0.533 = 53.3\%$$

Presión efectiva media indicada:

$$imep = \frac{W_{net}}{V_1 - V_2} = \frac{0.757}{5.26 \times 10^{-4} - 5.907 \times 10^{-5}} = 1621.23 kPa = 235.14 psi$$

Potencia indicada a 4800 RPM

$$\begin{aligned} \dot{W}_i &= \frac{WN}{n} = \frac{0.757 * \frac{4800}{60}}{2} * 6 \\ &= 181.68 kW = 244 hp \end{aligned}$$

Potencia indicada a 2400 RPM

$$\begin{aligned} \dot{W}_i &= \frac{WN}{n} = \frac{0.757 * \frac{2400}{60}}{2} * 6 \\ &= 90.84 kW = 122 hp \end{aligned}$$

Ahora sabiendo que el modelo del vehículo es algo antiguo vamos a asumir una eficiencia mecánica $\eta_m = 80\%$, para así poder calcular el trabajo al freno para un cilindro:

$$W_b = \eta_m W_i = 0.8 * 0.757 = 0.6056 k$$

Potencia al freno a 4800 RPM

$$\begin{aligned} \dot{W}_b &= \left(\frac{4800}{60}\right) * 0.5 * 0.6056 * 6 \\ &= 145.3 kW = 194 hp \end{aligned}$$

Potencia al freno a 2400 RPM

$$\begin{aligned} \dot{W}_b &= \left(\frac{2400}{60}\right) * 0.5 * 0.6056 * 6 \\ &= 72.67 kW = 97.45 hp \end{aligned}$$

Torque a 4800 RMP

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\dot{W}_b}{2\pi N} = \frac{145.3}{2\pi \left(\frac{4800}{60}\right)} \\ &= 0.289 kN * m = 289 N * m \\ &= 213 ft * lbf \end{aligned}$$

Torque a 2400 RPM

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\dot{W}_b}{2\pi N} = \frac{72.67}{2\pi \left(\frac{2400}{60}\right)} \\ &= 0.289 kN * m = 289 N * m \\ &= 213 ft * lbf \end{aligned}$$

Presión efectiva media al freno:

$$bmeP = \eta_m (imep) = 0.8 * 1621.23 = 1296.98 kPa = 188.11 psi$$

Potencia efectiva media al freno a 4800 RPM

$$BSP = \frac{\dot{W}_b}{A_p}$$

$$A_p = \left(\frac{\pi}{4}\right) (8.89) * 6 = 372.43 \text{cm}^2$$

$$BSP = \frac{143.3}{372.43} = 0.385 \text{kW/cm}^2$$

Entrega por desplazamiento a 4800 RPM

$$OPD = \frac{\dot{W}_b}{V_d} = \frac{145.3 \text{kW}}{2.8 \text{L}} = 51.89 \text{kW/L}$$

Consumo específico de combustible al freno a 4800 RPM

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_b} = \frac{3.3 \times 10^{-5} * 80 * 0.5 * 6}{145.3} = 5.5 \times 10^{-5} \text{kg/s/kW} = 196.2 \text{gm/(kW * h)}$$

Potencia efectiva media al freno a 2400 RPM

$$BSP = \frac{\dot{W}_b}{A_p}$$

$$A_p = \left(\frac{\pi}{4}\right) (8.89) * 6 = 372.43 \text{cm}^2$$

$$BSP = \frac{72.67}{372.43} = 0.195 \text{kW/cm}^2$$

Entrega por desplazamiento a 2400 RPM

$$OPD = \frac{\dot{W}_b}{V_d} = \frac{72.67 \text{kW}}{2.8 \text{L}} = 24.95 \text{kW/L}$$

Consumo específico de combustible al freno a 2400 RPM

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_b} = \frac{3.3 \times 10^{-5} * 40 * 0.5 * 6}{72.67} = 5.5 \times 10^{-5} \text{kg/s/kW} = 196.2 \text{gm/(kW * h)}$$

Eficiencia volumétrica utilizando un cilindro y condiciones estándar para el aire:

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_a V_d} = \frac{5 \times 10^{-4}}{1.181 * 4.667 \times 10^{-4}} = 0.907 = 90.7\%$$

Figura 12.1. Celda instalada en vehículo.



Figura 12.2. Limpieza de depósitos de carbono en garganta de inyector.



Figura 12.4. Diseño y dimensiones de electrodos de celda electrolítica

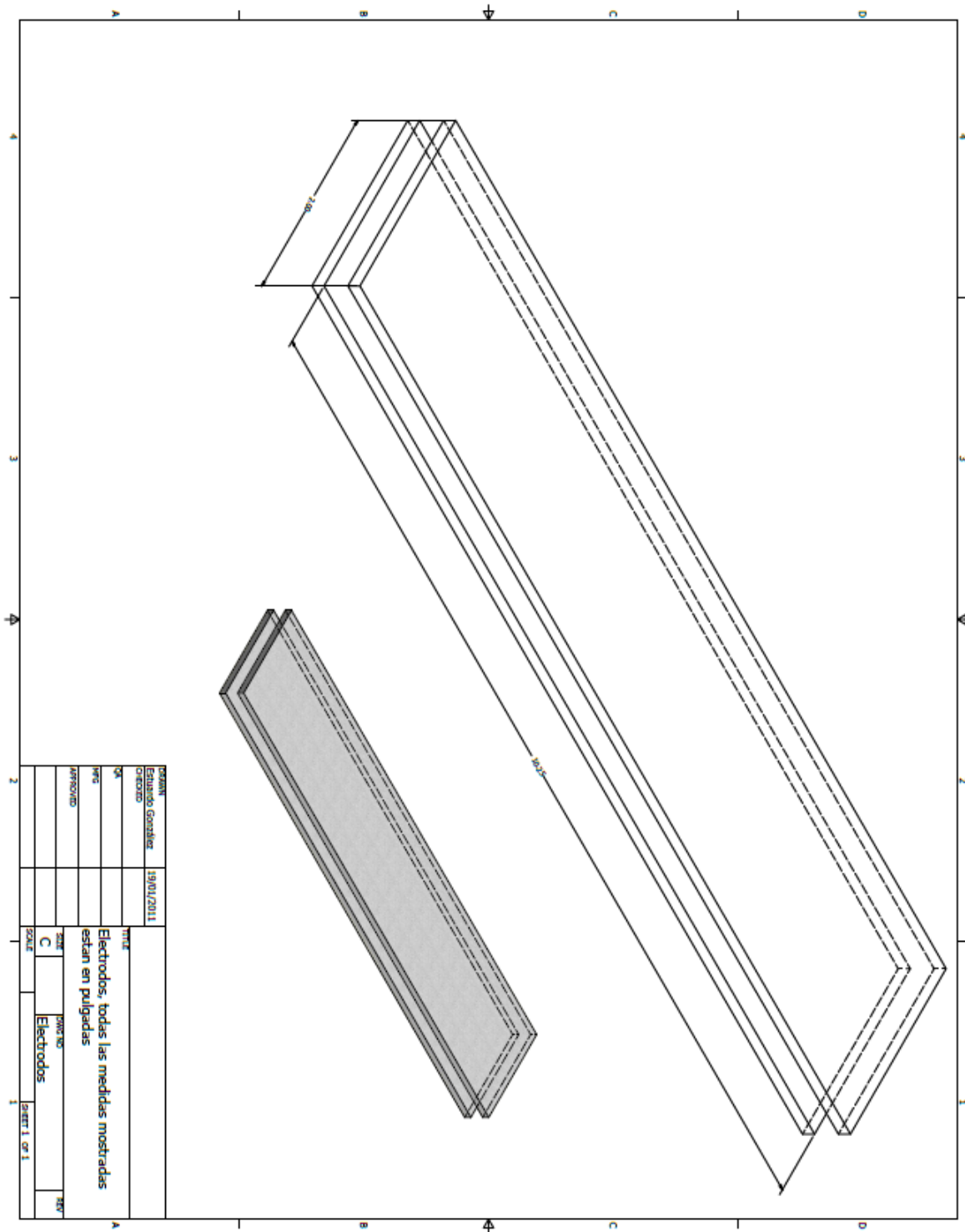


Figura 12.6. Diseño y dimensiones de fitting de cobre

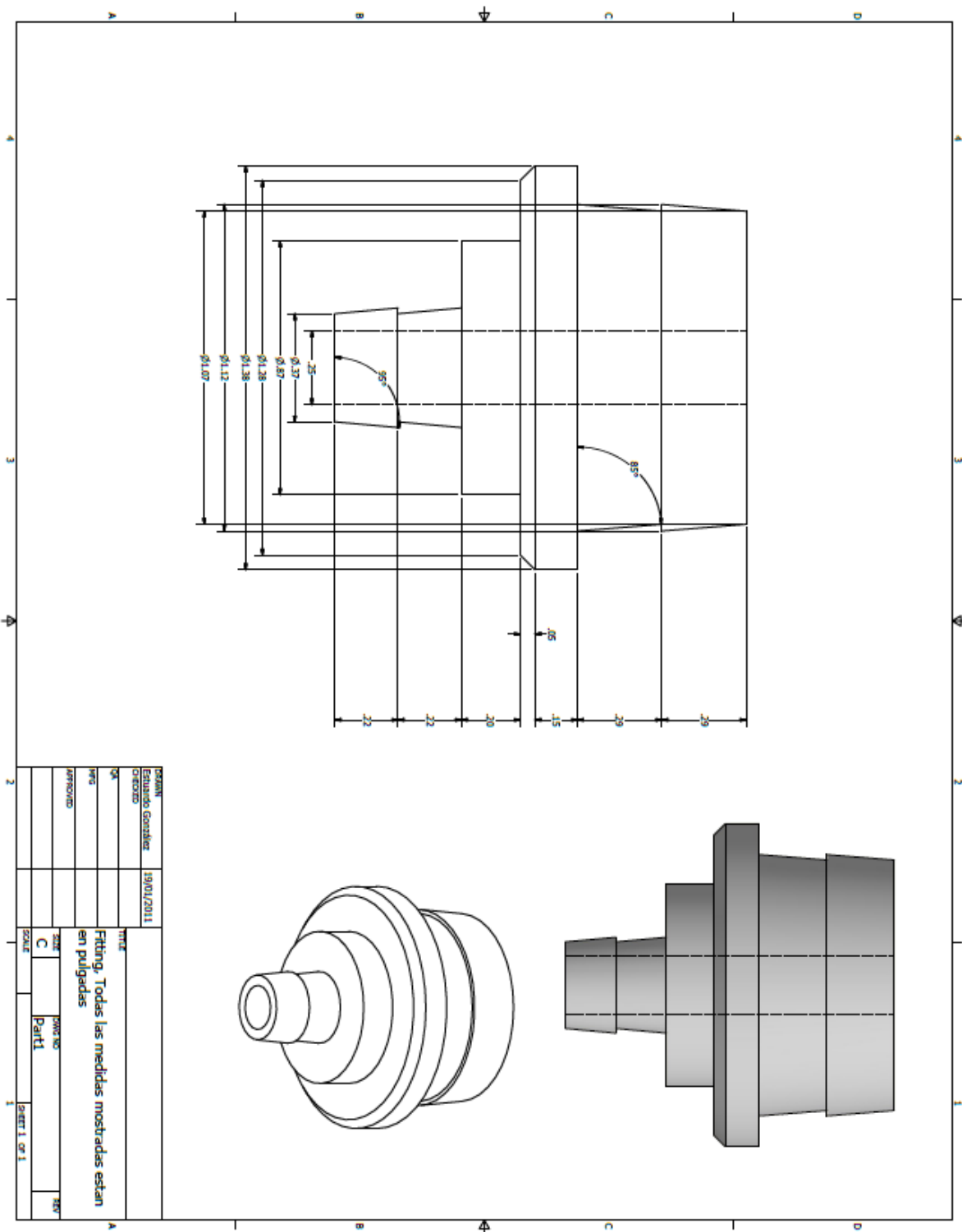


Figura 12.7. Diseño y dimensiones de tapa parte superior

