



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES DE
COMBUSTIÓN INTERNA BASADO EN LA MEDICIÓN DEL FLUJO DE MASA DE AIRE DE ADMISIÓN**

German Alberto Chew Lorenzana

Asesorado por el Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

Guatemala, octubre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES DE
COMBUSTIÓN INTERNA BASADO EN LA MEDICIÓN DEL FLUJO DE MASA DE AIRE DE ADMISIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GERMAN ALBERTO CHEW LORENZANA

ASESORADO POR EL ING. GUILLERMO ANTONIO PUENTE ROMERO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Armando Rivera Carrillo
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA BASADO EN LA MEDICIÓN DEL FLUJO DE MASA DE AIRE DE ADMISIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha octubre de 2008.

German Alberto Chew Lorenzana

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Y a todas las personas que Él ha puesto en mi camino, en especial a mis padres, por haberme permitido y ayudado a alcanzar el sueño de concluir mis carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por formar parte de mí, por todo lo que me ha brindado y por todas sus bendiciones.
- Mis padres** German Chew y Mirna Lorenzana por brindarme un hogar cálido y porque con mucho amor y esfuerzo me han ido formando a lo largo de los años y me han enseñado y motivado a perseverar para alcanzar mis metas. Ustedes forman una parte importante de lo que hoy soy.
- Mis hermanos** Ana Lucia y Luis Fernando por su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida.
- Mis abuelos y abuelas** Porque su vida de lucha y esfuerzo constante me ha inspirado para terminar mi carrera profesional.
- Mi familia** Por acompañarme en todos los momentos importantes de mi vida.

Mi novia

Karla Orozco por su cariño y amistad incondicional. Por creer en mí y por estar siempre a mi lado apoyándome y motivándome a superar todos los obstáculos que se me presentan en la vida.

Amigos

Agradezco a todos mis amigos, sin excluir a ninguno, pero en especial a Marcos Morales, Manuel Ríos, Sol Girón y Juan Carlos González por el tiempo compartido a lo largo de la carrera, por ayudarme y apoyarme en los momentos difíciles.

Familia Orozco López

Por su constante apoyo, aliento y estímulo.

Asesor

Al Ing. Guillermo Puente por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a él y por su permanente disposición y desinteresada ayuda.

Facultad de Ingeniería

Por los conocimientos compartidos para mi desarrollo profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	I
GLOSARIO	V
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
HIPÓTESIS.....	XII
INTRODUCCIÓN	XIII
1. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	1
1.1. Tipos básicos de motores	2
1.1.1. Motor de combustión interna de 4 tiempos encendido por chispa (ECH)	2
1.1.2. Motor de combustión interna de 4 tiempos encendido por compresión (EC)	6
1.1.3. Motor de combustión interna de 2 tiempos.....	7
1.2. Ciclo termodinámico.....	9
1.3. Sincronismo de admisión y escape.....	14
1.3.1. Eje de levas	14
1.3.2. Sistema de encendido	15
1.4. Carburación	18
1.4.1. El sistema de carburación de combustible	22
1.4.2. El múltiple de admisión.....	25
1.4.3. Carburación por inyección	27
1.5. Rendimiento del motor	29
1.5.1. Rendimiento volumétrico	31

2.	PROCESO DE ADMISIÓN DE AIRE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	33
2.1.	Sistema de admisión de aire	33
2.2.	Alimentación unitaria de aire	34
2.3.	Consumo de aire y combustible.....	39
2.4.	Sensores de medición de flujo de aire en motores de combustión interna	41
2.4.1.	Medidor de paleta	44
2.4.2.	Medidor de hilo-caliente	45
2.4.3.	Medidor de vórtices.....	52
2.4.4.	Medidor de efecto corona.....	56
2.4.5.	Medidor ultrasónico.....	59
3.	MAPEADO DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SENSOR DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE	63
3.1.	Flujo de masa de aire	63
3.1.1.	Paso de gas en la válvula	65
3.1.2.	Regulación de las válvulas.....	67
3.2.	Bosquejo del flujo de masa de aire en un motor de combustión interna de 4 cilindros y 4 tiempos.	69
4.	DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN MCI BASADO EN UN MEDIDOR DE FLUJO DE AIRE	81
4.1.	Desarrollo experimental.....	82
4.1.1.	Elaboración de un medidor de hilo-caliente	82
4.1.2.	Elaboración de un medidor de vórtices	86
4.2.	Detección de fallas en el sistema de admisión de aire, por medio de la señal de un medidor de flujo de masa de aire	87

4.3. Diseño de un dispositivo para la detección de fallas en el sistema de admisión por medio de la señal de un medidor de flujo de masa de aire.....	104
CONCLUSIONES	109
RECOMENDACIONES.....	113
BIBLIOGRAFÍA.....	115
APÉNDICE.....	117

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Principio de funcionamiento del motor de combustión interna	4
2.	Sucesos en el cilindro para el ciclo de dos carreras. Barrido cruzado	8
3.	Diagrama P-V de un ciclo termodinámico	10
4.	Diagrama P-V. Ciclo Otto teórico	12
5.	Eje de levas	15
6.	Esquema básico para la producción de la chispa	17
7.	Relaciones aire-combustible y combustible-aire requeridas por el motor, para diferentes posiciones del acelerador	19
8.	Elementos de un carburador simple, de succión ascendente	22
9.	Flujo de combustible en el múltiple de admisión	26
10.	Variaciones de la potencia y la economía en un motor ECH	30
11.	Efecto de la regulación de la válvula sobre la alimentación unitaria de aire	35
12.	Efecto de la regulación de la válvula sobre la alimentación unitaria de aire	40
13.	Ubicación del sensor de flujo de masa de aire	42
14.	Imágenes de sensores de flujo de masa de aire	43
15.	Voltajes del sensor de flujo de masa de aire	43
16.	Medidor tipo-paleta	45
17.	Medidor de hilo caliente (en la entrada principal)	46
18.	Medidor de hilo-caliente (en un pasaje de <i>by-pass</i>)	47
19.	Circuito básico de un puente utilizado con el sensor de hilo-caliente	49

20.	Diagrama del circuito para el sensor de hilo-caliente con el sensor de la temperatura del aire suprimido	50
21.	Curva de operación del sensor de hilo-caliente	51
22.	Sensor de hilo-caliente de película de silicón	52
23.	Calle de vórtices	53
24.	Sistema de sensores ultrasónicos para la medición de vórtices.....	54
25.	Respuesta del medidor de vórtices	55
26.	Principio de operación del medidor de efecto corona.....	57
27.	Medidor de flujo ultrasonic.....	61
28.	Superficie que queda libre durante la apertura de una válvula	66
29.	Sección transversal geométrica de paso	67
30.	Regulación de válvulas para un ciclo de 4 carreras	68
31.	Traslape de las válvulas de admisión y escape.....	72
32.	Representación del flujo de masa de aire durante la apertura y cierre de una válvula de admisión	73
33.	Traslape de válvulas de admisión	74
34.	Componentes de la señal de un medidor de flujo de masa de aire	75
35.	Bosquejo de la señal de un medidor de flujo de masa de aire	77
36.	Disposición del puente de Wheatstone	83
37.	Esquema de un amplificador de instrumentación	85
38.	Diagrama de un generador de funciones	86
39.	Componentes del sistema de admisión.....	88
40.	Efecto de un filtro contaminado en el flujo de masa de aire	90
41.	Señal del sensor de posición de mariposa, TPS	92
42.	Depósitos de carbono en las válvulas de admisión	96
43.	Síntoma de válvula dañada	102
44.	Síntoma de empaque de la culata dañado	103
45.	Síntoma de desgaste de cilindros, anillos y/o válvulas	104
46.	Esquema del dispositivo de detección de fallas	105

47.	Sensor de posición del cigüeñal	106
48.	Período sin traslape de válvulas de admisión.....	107
49.	Interfaz para desplegar los resultados	107

TABLAS

I.	Análisis de fallas de válvulas	95
II.	Indicadores de estado.....	108

GLOSARIO

Sistema de alimentación	Sistema de introducción de la mezcla de combustible y aire al motor. Puede ser por carburación o inyectado.
Bujía	Dispositivo que permite saltar la chispa eléctrica del encendido.
Combustible	Es cualquier material capaz de liberar energía cuando se transforma su estructura química. Supone la liberación de una energía de su forma potencial a su forma utilizable.
Combustión	Es una reacción química en la que un elemento combustible, se combina con el oxígeno desprendiendo energía.
Dilución	La reducción de la concentración de una sustancia química.
Electrodo	Extremo de un cuerpo conductor en contacto con un medio del que recibe o al que transmite una corriente eléctrica.

Relación estequiométrica

En condiciones perfectas, la combustión total de 1 gramo de gasolina se consigue con 14,7 gramos de gasolina, a esta relación se le conoce como mezcla estequiométrica (14,7:1).

Ion

Átomo o grupo de átomos que, por pérdida o ganancia de uno o más electrones, ha adquirido una carga eléctrica.

Motor de combustión interna

Máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión.

Ralentí

Es el régimen mínimo de revoluciones por minuto a las que se ajusta un motor de combustión interna para permanecer en funcionamiento de forma estable.

Sensor

Es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas.

Ultrasonido

Es una onda acústica cuya frecuencia está por encima del espectro audible del oído humano.

**Unidad de control
electrónica**

Es un dispositivo electrónico que controla varios procesos de la operación de combustión interna del motor.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de graduación, es hacer un estudio sobre el sensor de flujo de masa de aire de un vehículo y diseñar un dispositivo que utilice la señal eléctrica de dicho sensor para detectar fallas en la operación de un motor de combustión interna de 4 tiempos, con pistones de movimiento alternativo y alimentado por gasolina. En el primer capítulo se han examinado los aspectos más importantes de este tipo de motor, hay una explicación de los principios básicos de operación, un sencillo análisis termodinámico y una exposición de los principales sistemas que lo componen. Vale la pena destacar que se ha hecho énfasis en este tipo de motores y que otros tipos de motores, como el motor diesel o el motor rotativo, no han sido parte fundamental de este trabajo.

En el segundo capítulo se detalla el proceso de admisión de aire en un motor de combustión interna y se describen cinco diferentes tipos de medidores de flujo de masa de aire. En esta sección también se discute la importancia que tiene el aire que ingresa al motor para poder obtener un rendimiento óptimo.

En el proceso de admisión de aire interviene una gran cantidad de variables, por lo que hacer un análisis matemático resulta bastante complejo para los objetivos del trabajo de graduación.

En el capítulo tres se trabajó en un caso simplificado con el fin de modelar la señal de un sensor de flujo de masa de aire. Para poder obtener una representación digna pero útil, primero se hizo un breve estudio de los aspectos más importantes que participan en el proceso de admisión de aire a los cilindros para poder fundamentar el resultado final.

Finalmente, en el último capítulo se presenta una descripción de las distintas pruebas que se hicieron durante el desarrollo experimental donde el objetivo era encontrar un patrón en la señal eléctrica del sensor de flujo de masa de aire para poder analizar su comportamiento ante diferentes fallas en la operación de un motor de combustión interna. Durante las pruebas no fue posible encontrar un patrón en la señal debido a las limitaciones en el nivel de la señal de los sensores utilizados, principalmente con el tiempo de respuesta a los cambios en el flujo de masa de aire.

Debido a que no fue posible detectar un patrón durante las distintas pruebas que se hicieron, siendo estas parte de la hipótesis, se desarrolló un modelo matemático no tan complejo que bosqueja la señal del sensor. Utilizando este modelo se hizo un análisis de las fallas que se podrían detectar mediante la señal del sensor de flujo de masa de aire.

Para concluir, se propone el diseño de un sistema electrónico, que permite detectar fallas en la operación de un motor de combustión interna a gasolina de 4 tiempos utilizando la señal del medidor de flujo de masa de aire.

OBJETIVOS

General

Hacer un trabajo de investigación y un desarrollo experimental para diseñar una herramienta que permita detectar fallas en un motor de combustión interna a gasolina de cuatro tiempos por medio de la señal del sensor de flujo de masa de aire.

Específicos

1. Presentar los principios básicos de operación de un motor de combustión interna.
2. Mostrar el proceso de admisión de aire en los motores de combustión interna.
3. Proporcionar al lector un documento que incluya información sobre los diferentes tipos de sensores de flujo de masa de aire que se utilizan en los motores de combustión interna y la forma en que operan.
4. Modelar la señal de un sensor de flujo de masa de aire.
5. Diseñar un sistema electrónico para la detección de fallas en motores de combustión interna basado en un medidor de flujo de masa de aire.

HIPÓTESIS

Es factible detectar fallas en la operación de un motor de combustión interna a gasolina de 4 tiempos mediante la señal del sensor de flujo de masa de aire.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día los vehículos poseen para su funcionamiento una cantidad importante de sensores, aproximadamente 60 ó 70 sensores en total. La función de este conjunto de sensores es percibir el estado general en que se encuentra el automóvil e informar a la unidad electrónica de control, que se basa en estas señales para gestionar la operación del motor, los sistemas de seguridad y de confort y demás funciones del vehículo. Cada uno de los sensores convierte la medida de una magnitud física o química en una señal eléctrica que pueda ser interpretada por la computadora.

En este trabajo de investigación se propone utilizar la información que provee uno de estos sensores para detectar fallas en el funcionamiento de un motor de combustión interna a gasolina de 4 tiempos. Se seleccionó el medidor de flujo de masa de aire. Este dispositivo responde al volumen de aire que fluye a través de una cámara donde está contenido el sensor y es utilizado para determinar la masa de aire que ingresa al motor. Debido a la importancia que tiene el aire en el proceso de combustión y en consecuencia en el funcionamiento del motor se decidió utilizar este sensor para diseñar una herramienta de detección de fallas.

Este documento contiene los principios de operación de un motor de combustión interna, información sobre los diferentes tipos de sensores de flujo de masa de aire, un modelo matemático que bosqueja la señal del sensor, un análisis de posibles fallas que se pueden presentar en este tipo de motores y el diseño de un sistema electrónico para detectar fallas en su funcionamiento.

1. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Desde los primeros indicios de aplicaciones para los motores de combustión interna, hasta ahora, se han ido perfeccionando las fábricas para producir más y mejores motores, y aunque sí han habido modificaciones, mejoras e innovaciones que lo han convertido en una máquina altamente sofisticada con avanzados sistemas de control electrónico, hasta la fecha ha conservado sus características fundamentales.

En el presente capítulo, se explican los principios básicos de operación de un motor de combustión interna con pistones de movimiento alternativo. Se hará énfasis en el motor de combustión interna de 4 tiempos alimentado por gasolina, del que se hará un sencillo análisis termodinámico. Además, se exponen de forma general los principales sistemas que lo componen y por último se presentan los factores que influyen en su rendimiento. Otros tipos de motores, como el motor diesel, motor *Wankel* o rotativo y la turbina de combustión, no serán parte fundamental del contenido de este trabajo. En el capítulo dos, se explica el proceso de admisión de aire y se describen distintos tipos de medidores de flujo de masa de aire.

1.1. Tipos básicos de motores

La máquina a vapor fue el origen del desarrollo de las máquinas modernas. En el curso de este desarrollo, la aparición del motor de combustión interna, reemplazo al motor de vapor y hasta ahora, solamente la turbina de vapor es comparable con él, en lo que respecta a la cantidad de energía producida. El progreso del mundo ha sido influido, en gran parte, por este tipo de motor.

Hay dos tipos de motores de combustión: el de combustión externa y el de combustión interna. En un motor de combustión externa, los productos de la combustión del aire y el combustible, le transfieren calor a un segundo fluido, el cual se convierte en el fluido motriz o elemento productor del trabajo. En un motor de combustión interna, los productos de la combustión son, directamente, el fluido motriz. Debido a este rasgo simplificador y al alto rendimiento térmico resultante, el motor de combustión es una de las unidades generadoras de trabajo más ligeras (en peso) que se conocen y, por lo mismo, su mayor campo de aplicación es, en la transportación.

1.1.1. Motor de combustión interna de 4 tiempos encendido por chispa (ECH)

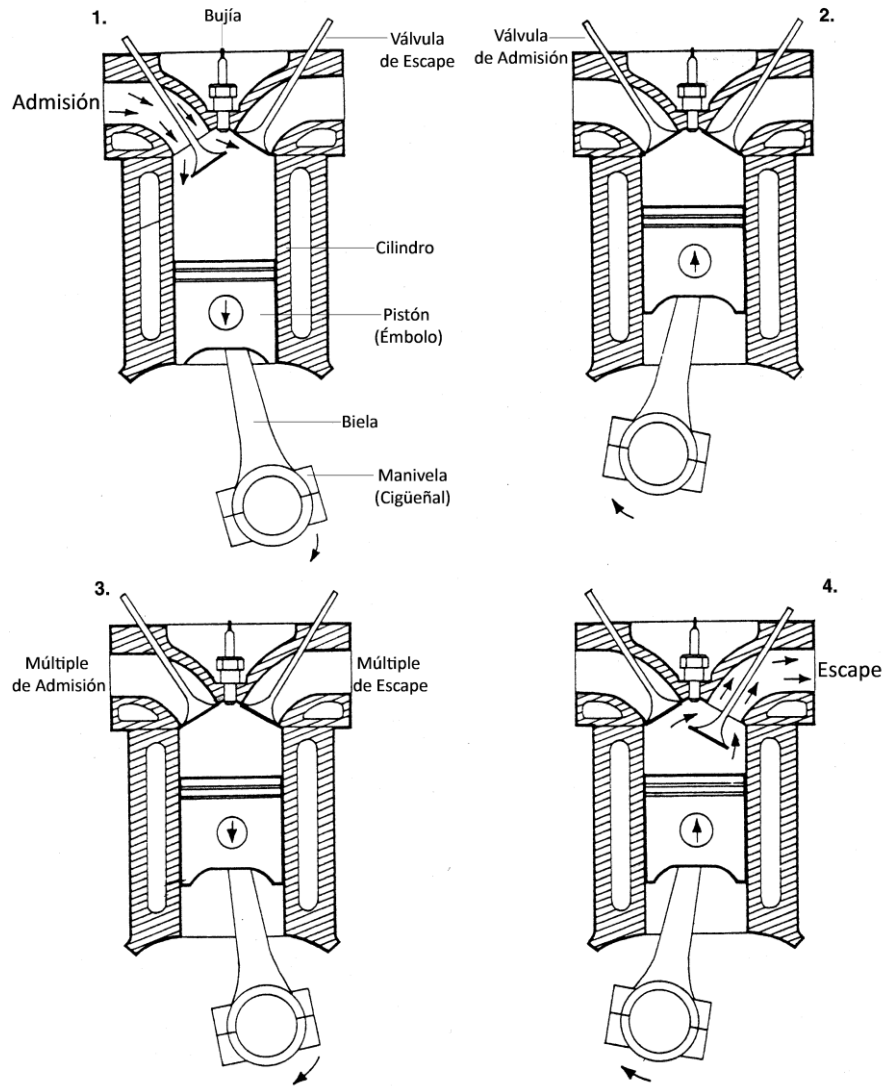
La mayoría de los motores de combustión interna, utilizan el principio del émbolo reciprocante (pistón de movimiento alternativo), mostrado en la figura 1.

El motor de combustión interna, es un motor térmico en el que, gracias a un aporte de ignición (combustión del combustible) a un gas, que se encuentra en un cilindro, se genera un trabajo mecánico, donde los gases consumidos (gases de escape) se sustituyen, luego de una combustión lo más completa posible, por otra dosis de gas fresco. Para que se lleve a cabo este proceso de la forma más limpia y correcta posible, se requieren, en el caso de los motores de pistón de movimiento alternativo, tal y como se utiliza en los vehículos, 4 tiempos operativos: el aporte de un gas fresco (aire ambiental) más un portador de energía, que es el combustible, la combustión y la expulsión de los gases de escape, que es lo que se conoce como intercambio de carga o flujo de gases.

Los procesos que se llevan cabo en un motor ECH son:

- Tiempo de admisión: se abre la válvula de admisión, el pistón baja y el cilindro aspira la mezcla inflamable de aire y combustible. La válvula de escape permanece cerrada durante la mayor parte de la carrera.
- Tiempo de compresión: se cierra la válvula de admisión, el pistón sube y comprime la mezcla de aire-combustible. Las dos válvulas están cerradas. La chispa enciende la mezcla cerca del final de la carrera.
- Tiempo de explosión (o trabajo): se quema la mezcla combustible-aire comprimida y el calor generado por la combustión expande los gases que ejercen presión sobre el pistón. Ambas válvulas cerradas. La válvula de escape se abre próxima al final de la carrera.
- Tiempo de escape: se abre la válvula de escape, el pistón se desplaza hacia arriba expulsando los gases quemados. La válvula de admisión se abre cerca del final de la carrera.

Figura 1. Principio de funcionamiento del motor de combustión interna



Fuente: HACK, Gert; INDRA, Fritz. Motores multiválvulas. p. 60.

En 1876, Nicolaus August Otto, un ingeniero alemán, utilizó este principio para construir un motor con ciclo de trabajo de 4 carreras conocido en la actualidad como ciclo Otto.

Al tratar sobre el motor de pistón de movimiento alternativo, se utilizan comúnmente los términos: desplazamiento, volumen de compresión y relación de compresión o de expansión. El desplazamiento (D), es el volumen (en cm^3) barrido por el pistón en una carrera (n veces este valor para un motor con n cilindros); el volumen de compresión (c), es el volumen de los gases comprimidos y es también el volumen de la cámara de combustión; la relación de compresión o de expansión (r_v) es igual a:

$$r_v = \frac{c + D}{c}$$

En todos los motores de émbolo recíprocante, éste llega forzosamente a una completa inmovilidad, en dos posiciones particulares del cigüeñal antes de invertir la dirección de su movimiento. A la posición en la que el pistón ha pasado precisamente al límite inferior de su carrera se le llama punto muerto inferior (abreviado PMI).

Existe una posición semejante, o etapa sin movimiento del pistón, en el instante en que este llega al punto muerto superior (abreviado PMS). Debido a esta posición muerta, la combustión de la mezcla en el motor Otto ocurre prácticamente a volumen constante. En vista de que la carrera de trabajo sólo existe en una parte del tiempo total del ciclo, se utiliza un volante que se monta en un extremo del cigüeñal con el objeto de regularizar su giro, almacenando energía cinética durante el momento de explosión en los cilindros, para devolverla y permitir que el motor siga girando durante los otros tres tiempos en los que no se genera trabajo, obteniendo así, una rotación uniforme del cigüeñal.

1.1.2. Motor de combustión interna de 4 tiempos encendido por compresión (EC)

En 1892, Rudolph Diesel, diseñó un motor capaz de quemar polvo de carbón. El ciclo Diesel es similar al ciclo Otto, excepto que debía tenerse una alta relación de compresión, admitiendo solamente aire, en lugar de la mezcla combustible, en la carrera de admisión. Se sabía que la rápida compresión del aire hasta presiones elevadas, podía elevar su temperatura hasta un valor tal, que si se surtía dentro de la cámara de combustión un combustible, éste se incendiaba directamente sin depender de una chispa para iniciar la combustión o de una mezcla homogénea para propagar la llama.

Diesel propuso al principio, regular la inyección de combustible para tener la combustión a temperatura constante, pero encontró que esto no era práctico. Posteriormente trató de regular la inyección de combustible para conseguir la combustión a presión constante, siendo mejor este arreglo. Muy pronto encontró que el polvo de carbón no era un combustible satisfactorio y que los combustibles líquidos darían mejores resultados.

Se puede utilizar la figura 1, para visualizar el motor Diesel, reemplazando la bujía por una válvula inyectora de combustible y aumentando la relación de compresión. El motor Diesel tiene los siguientes ciclos:

- Una carrera de admisión para inducir dentro del cilindro, solamente aire.
- Una carrera de compresión para llevar el aire hasta una temperatura superior a la del punto de encendido del combustible.

- Inyección de combustible durante la primera parte de la carrera de admisión con una rapidez tal, que la presión mantenga un valor constante, siguiendo la expansión, hasta el volumen inicial del cilindro.
- Una carrera de escape para purgar del cilindro los gases quemados.

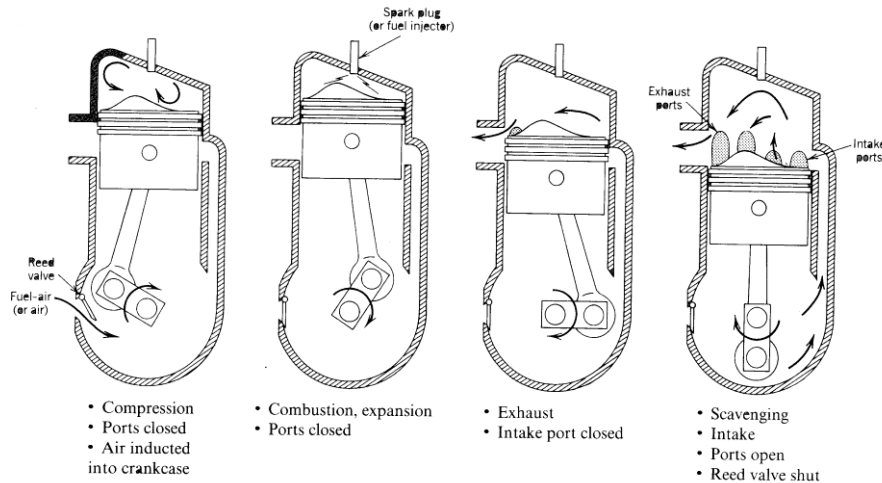
Uno de los primeros métodos utilizados para inyectar combustible, fue el de valerse de una corriente de aire a presión, para arrastrarlo al interior de la cámara de combustión. Este método produjo buena atomización y buen control del proceso de combustión. No obstante, en la actualidad raramente se utiliza porque se necesita disponer de un gran compresor que resulta un auxiliar muy costoso.

El método moderno de inyección es, el de comprimir y pulverizar solamente combustible dentro del cilindro, dependiendo de la alta presión de inyección para la atomización del mismo.

1.1.3. Motor de combustión interna de 2 tiempos

El ciclo de 4 tiempos, requiere dos revoluciones del cigüeñal por cada carrera de trabajo. Con el objetivo de obtener un mayor rendimiento con el mismo tamaño de motor y simplificar el sistema de válvulas, se diseñó el ciclo de dos tiempos. Este ciclo es aplicable tanto al motor encendido por chispa como al encendido por compresión.

Figura 2. **Sucesos en el cilindro para el ciclo de dos carreras. Barrido cruzado**



Fuente: FERGUSON, Colin R. Internal combustion engines. p. 42.

El motor de dos tiempos no tiene válvulas, la entrada y salida de gases se hace a través de lumbreras (orificios en el cilindro). El pistón dependiendo de la posición que ocupa en el cilindro, abre o cierra el paso de gases a través de las lumbreras.

Observando la figura 2, en el PMS se tiene el encendido por chispa de una mezcla de vapores que inician la combustión y liberan energía para la carrera de trabajo que es la siguiente. Próximo al final de esta carrera, el pistón descubre una lumbrera en las paredes del cilindro, expulsando la mayoría de los productos de la combustión al múltiple de escape. Posteriormente, en la carrera, se descubre por el pistón una segunda lumbrera que permite que ingrese al interior del cilindro la mezcla de aire-gasolina. La carrera de regreso del pistón es la carrera de compresión del ciclo. Es importante notar que todo el ciclo se completa en una sola revolución del cigüeñal.

Si se utiliza el ciclo de dos tiempos para un motor carburado con gasolina, parte de la mezcla fresca será desalojada junto con los gases de escape. Por esta razón, los motores de dos tiempos encendidos por chispa son poco usados, excepto para motores pequeños de gasolina en los que la economía no es un factor vital. En los motores diesel, no existe desventaja de la pérdida de combustible porque se utiliza solamente aire, y, por lo tanto, sólo se pierde aire en el barrido del cilindro.

1.2. Ciclo termodinámico

La termodinámica, es una rama de la física que estudia los efectos de los cambios de la temperatura, presión y volumen de los sistemas físicos, estudia la circulación de la energía y cómo la energía infunde movimiento. Los procesos termodinámicos pueden ser vistos como las transformaciones que ocurren en un sistema, desde un estado de equilibrio inicial a otro final.

Por ejemplo, en el motor de un automóvil, se genera calor por la reacción química entre el oxígeno y la gasolina vaporizada en los cilindros. El gas caliente empuja los pistones, efectuando trabajo mecánico que se utiliza para impulsar el vehículo. Éste es un ejemplo de proceso termodinámico. Ahora, un sistema termodinámico es un conjunto de objetos a los que se les considera como unidad y que son capaces de intercambiar energía con su entorno mediante calor, trabajo, o calor y trabajo al mismo tiempo.

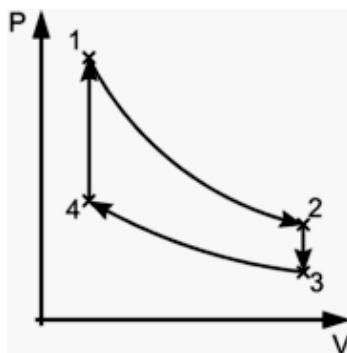
Se describen las relaciones de energía de un proceso termodinámico en términos de la cantidad de calor Q que agrega al sistema y el trabajo W hecho por él. Tanto Q como W pueden ser: positivos, negativos o cero. Un valor positivo de Q representa flujo de calor al sistema, con un suministro de energía correspondiente; un Q negativo representa flujo de calor expulsado del sistema.

Un valor positivo de W representa trabajo hecho por el sistema contra el entorno, corresponde a la energía que sale del sistema. Un W negativo, representa energía que entra al sistema.

Se denomina ciclo termodinámico a cualquier serie de procesos termodinámicos tales que, al transcurso de todos ellos, el sistema regrese a su estado inicial. Un ciclo termodinámico se puede representar en un diagrama P-V (presión-volumen) y adapta la forma de una curva cerrada.

En este diagrama el volumen de un sistema es representado en el eje-x y la presión en el eje-y. El sentido de avance de la curva, indicado por las puntas de las flechas, indica si el incremento de volumen es positivo (izquierda a derecha) o negativo (derecha a izquierda). Se puede concluir que el área encerrada por la curva que representa un ciclo termodinámico, indica el trabajo total realizado (en un ciclo completo) por el sistema, si éste avanza en sentido horario o, por el contrario, el trabajo total ejercido sobre el sistema si lo hace en sentido antihorario.

Figura 3. **Diagrama P-V de un ciclo termodinámico**



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_termodinámico. julio 2010.

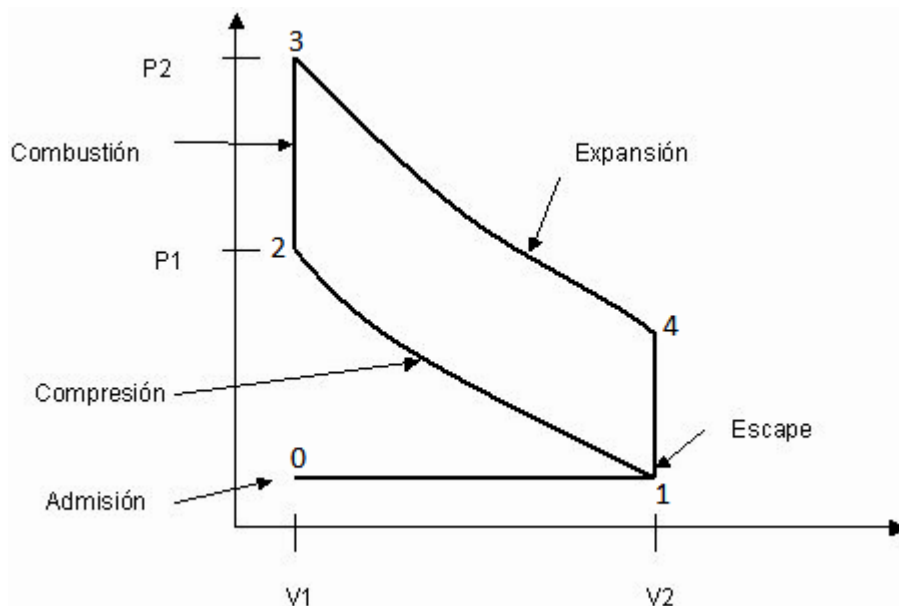
El rendimiento es el principal parámetro que caracteriza a un ciclo termodinámico, y se define como el trabajo obtenido dividido por el calor gastado en el proceso.

Hay 4 clases específicas de procesos termodinámicos que se pueden resumir como: sin transferencia de calor o adiabáticos, a volumen constante o isocóricos, a presión constante o isobáricos y a temperatura constante o isotérmicos.

El ciclo Otto, es el ciclo termodinámico ideal que se aplica a los motores de combustión interna. Se caracteriza porque todo el calor se aporta a volumen constante. Hay dos tipos de motores que se rigen por el ciclo Otto, los motores de dos tiempos y los motores de cuatro tiempos. En los próximos párrafos se describe el ciclo Otto de 4 tiempos.

En la figura 4, se presenta el ciclo teórico de un motor Otto en un diagrama P-V. El motor se caracteriza por aspirar una mezcla aire-combustible (típicamente gasolina dispersa en aire). El motor Otto es un motor alternativo. Esto quiere decir que se trata de un sistema pistón-cilindro con válvulas de admisión y válvulas de escape. El motor con ciclo de 4 tiempos necesita 4 movimientos de cada pistón, dos hacia arriba y dos hacia abajo (dos revoluciones completas del cigüeñal).

Figura 4. Diagrama P-V. Ciclo Otto teórico



Fuente: <http://www.mailxmail.com/curso-motores-combustion-interna/motor-combustion-interna-combustion-volumenconstante-ciclo-otto>. julio 2010.

Los diferentes procesos que componen el ciclo son:

- Admisión (0-1): el pistón se desplaza desde el PMS al PMI y la válvula de admisión permanece abierta, permitiendo que se aspire la mezcla de combustible y aire hacia dentro del cilindro. Al final de la admisión (en el PMI) se cierra la válvula de admisión. El llenado del cilindro requiere un trabajo negativo.
- Compresión (1-2): con la válvula de admisión y la válvula de escape cerradas, el pistón se desplaza desde el PMI al PMS comprimiendo la mezcla de combustible y aire. En principio esta compresión es adiabática. La compresión requiere trabajo negativo.

- Encendido (2-3): este evento ocurre en un instante, en el momento en que el pistón llega al PMS, se enciende la chispa en la bujía y se quema la mezcla en la cámara de combustión, aumentando la presión de P1 a P2.
- Trabajo (3-4): con las dos válvulas cerradas se produce la combustión de la mezcla, liberando energía que provoca la expansión de los gases y el movimiento del pistón al PMI. Se produce la transformación de la energía química contenida en el combustible en energía mecánica transmitida al pistón. Él la transmite a la biela, y la biela la transmite al cigüeñal, de donde se toma para su utilización. En principio este proceso es adiabático. Este proceso genera trabajo positivo, de hecho, es el único proceso de todo el ciclo en que se genera trabajo positivo.
- Apertura de la válvula de escape (4-1): se abre la válvula de escape, ocurre en un instante.
- Escape (1-0): el pistón se mueve desde el PMI al PMS, expulsando los gases producidos durante la combustión y quedando preparado para empezar el siguiente ciclo. En principio la presión dentro del cilindro es igual a la atmosférica, por lo que el trabajo requerido es cero.

El ciclo Otto, que se acaba de describir, es un modelo que no toma en consideración la fricción, turbulencia, pérdida de calor en las paredes del cilindro y muchos otros efectos que reducen la eficiencia de un motor real. Otra fuente de ineficiencia es la combustión incompleta.

1.3. Sincronismo de admisión y escape

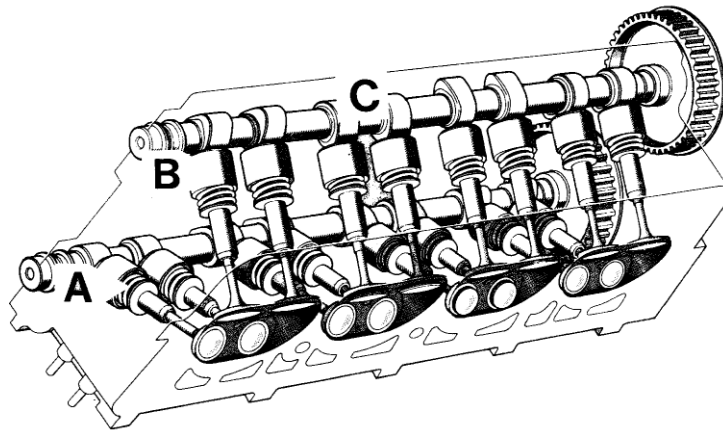
Para que un motor de combustión interna funcione en la práctica, es indispensable sincronizar los procesos (tiempos) de admisión, compresión, explosión y escape de la mezcla de aire-combustible. Este sincronismo se lleva a cabo a través de acoples mecánicos (engranajes, cadenas, fajas, etc.) del cigüeñal al eje de levas y al distribuidor en el sistema de encendido.

1.3.1. Eje de levas

Al ser las válvulas las que controlan el flujo de admisión de aire y combustible, y de gases que se expulsan en un motor, deben abrirse y cerrarse en el momento oportuno durante el recorrido del pistón. El eje levas es el dispositivo mecánico encargado de sincronizar los tiempos de apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape para que se adapten al flujo de los gases. En algunos casos, el eje de levas también controla la distribución de aceite, el distribuidor de chispa y la bomba de gasolina en motores de combustión interna carburados.

El eje de levas es responsable en gran parte del rendimiento de un motor ya que junto con la cantidad de gases que dejan pasar las válvulas (según su forma geométrica) permiten que el motor aspire aire de forma eficiente en un cierto rango de revoluciones.

Figura 5. Eje de levas



Fuente: HACK, Gert; INDRA, Fritz. Motores multivalvulas. p. 200.

1.3.2. Sistema de encendido

En los motores de combustión interna, el encendido de la mezcla se produce por medio de una chispa eléctrica que se hace saltar entre los electrodos de la bujía. Esta chispa debe tener algunas condiciones fundamentales.

En primer lugar debe tener una elevada tensión eléctrica, ya que al hallarse la mezcla comprimida, la atmósfera en el interior de la cámara de combustión es muy densa. Esta tensión debe ser como mínimo, aproximadamente 14 000 voltios.

En segundo lugar debe disponer de una cantidad de energía eléctrica de cierta consideración que puede resumirse en unos 0,04 a 0,06 amperios; y en tercer lugar debe encontrarse perfectamente sincronizada con el giro del cigüeñal para que la combustión se produzca exactamente en el PMS del pistón al final de la carrera de compresión e inicio del tiempo de explosión. Todos los sistemas de encendido eléctrico no solo cumplen con estas condiciones sino que, se mantienen muy por encima de estos valores mínimos.

Los elementos fundamentales que intervienen en un sistema de encendido son: la bobina de encendido que ejerce la función de elevar considerablemente la tensión que recibe, el distribuidor, los cables de alta tensión que conducen la corriente a las bujías que son las encargadas de producir la chispa de inflamación de la mezcla y el elemento de control (platino, transistor, etc.).

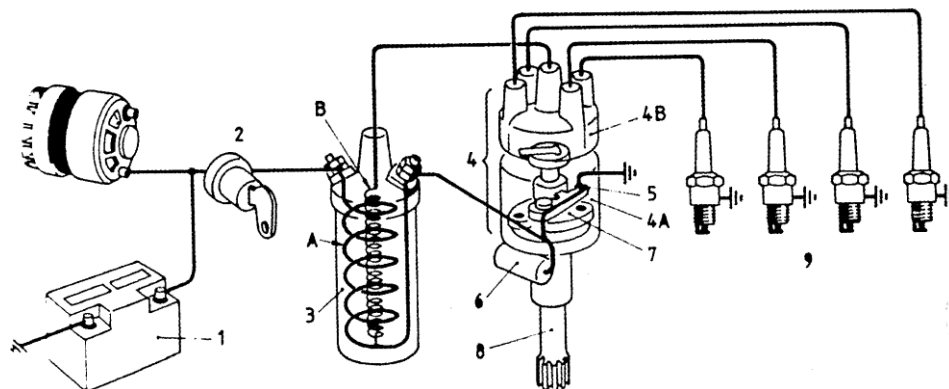
En el esquema de la figura 6 se pueden ver los principales componentes del sistema de encendido de un motor.

La batería (1) que alimenta de corriente eléctrica al circuito (podría ser sustituida por el alternador estando el motor en marcha). En 2 se tiene el interruptor desde el que la electricidad se reparte por los diferentes circuitos del automóvil. Uno de ellos es el formado por la bobina de encendido (3), que posee dos tipos de embobinados: uno grueso (A), que forma el circuito de baja tensión, y otro muy fino y de muchas vueltas (B) que forma el circuito de alta tensión.

La corriente recibida por la bobina desde el interruptor pasa a través del embobinado A, hasta el distribuidor (4) que, en su parte baja (4A) consta de un interruptor que recibe el nombre de ruptor (5) que es capaz de interrumpir el circuito de baja tensión cuando sus contactos se separan. Esta parte del distribuidor está provista también de un condensador (6) y de un avance de encendido (7), y, por otra parte, lleva un eje, cuya punta (8), que está accionada por el motor y sincronizada con el giro de éste de modo que el distribuidor conoce en todo momento la posición exacta de los pistones del motor.

Por otro lado, y a partir de la bobina (3) se tiene el embobinado de hilo fino (B) que constituye el circuito de alta tensión. Cuando esta corriente de alta tensión se establece, pasa a la cabeza del distribuidor (4B) y desde allí se distribuye a las bujías (9) por el orden que corresponde al orden de encendido de los pistones de modo que salte la chispa entre los electrodos de las bujías al mismo tiempo en que los pistones alcanzan el PMS al final de la carrera de compresión.

Figura 6. **Esquema básico para la producción de la chispa**



Fuente: GIL, Hermógenes. Sistemas de encendido. p. 13.

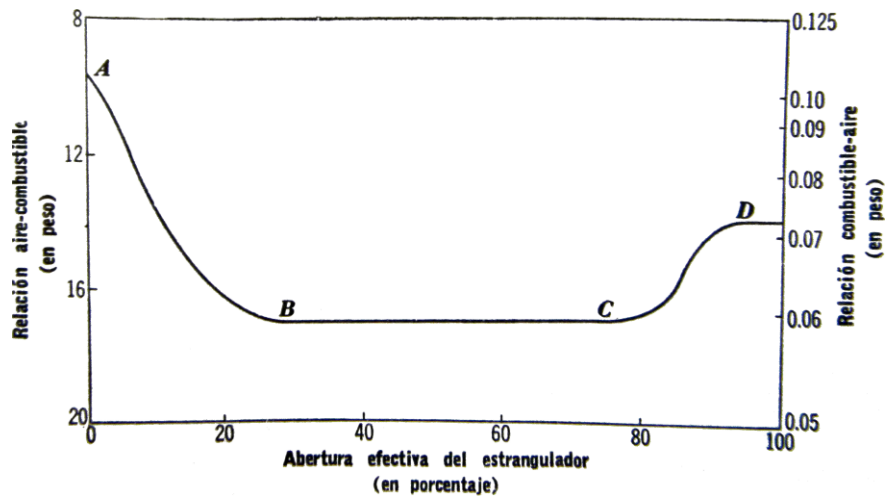
1.4. Carburación

El carburador de un motor encendido por chispa, sirve para dosificar el combustible dentro de la corriente de aire, en la proporción requerida por la velocidad y la carga. La proporción de combustible y aire debe mantenerse dentro de los límites definidos prescritos por el diseño del motor. En esta sección se discutirá los requisitos exigidos a un carburador y los aspectos de diseño que le permitan responder automáticamente a los cambios en el funcionamiento del motor, satisfaciendo las necesidades exigidas.

El motor requiere diferentes relaciones de aire y combustible, para diferentes condiciones de la carga como se ilustra en la figura, siendo evidentes tres condiciones:

- En vacío y con poca carga
- Zona económica y con carga media
- Zona de potencia, a plena carga

Figura 7. **Relaciones aire-combustible y combustible-aire requeridas por el motor, para diferentes posiciones del acelerador**



Fuente: OBERT, Edward F. Motores de combustión interna. p. 413.

Se dice que el motor está en vacío, cuando no hay una demanda externa de energía sobre él y, además que el acelerador esté esencialmente cerrado.

Un motor en vacío requiere una mezcla rica, tal como A en la figura 7 y a medida que se abre el acelerador, la mezcla se va empobreciendo (AB). La explicación de estas necesidades se deduce observando las presiones en el múltiple y en el cilindro cuando el motor está en vacío.

Estando el acelerador próximo a la posición cerrado, la presión en el múltiple de admisión estará muy por debajo de la atmosférica, en tanto que al final de la carrera de escape, la presión es siempre muy aproximada a la atmosférica. Al abrir la válvula de admisión, habrá mayor presión en el cilindro que en el múltiple de admisión por lo que el gas del escape, con presión relativamente alta, se dilata dentro de él.

Posteriormente, al descender el émbolo en la carrera de admisión, los gases del escape son absorbidos al interior del cilindro junto con una porción de alimentación fresca y, por lo tanto, el total de la mezcla contendrá un gran porcentaje de gases de escape. Para compensar los efectos de los gases inertes del escape, que diluyen y debilitan la mezcla explosiva durante las condiciones dichas de acelerador cerrado o casi cerrado, el carburador debe suministrar una mezcla rica (exceso de combustible).

Es conveniente mencionar, que la presión y la temperatura de los gases del escape al final de la carrera, no varían grandemente con los cambios de carga. En vacío se requiere una cantidad muy pequeña de aire fresco por lo que la relación de los gases de escape con el aire fresco, es elevada. A medida que aumenta la carga, se induce una mayor cantidad de aire y disminuye el porcentaje de gases de escape, en la mezcla final.

Dado que las válvulas de admisión y de escape son accionadas mediante levas, los periodos de apertura y cierre, han de tomar tiempos relativamente grandes, si se trata de evitar el ruido y el desgaste. Por estas razones, es conveniente iniciar la apertura antes de que termine la carrera de escape, con objeto de que el proceso de admisión principie prontamente con el descenso del pistón en la carrera de admisión.

Por otra parte, la válvula de escape no cerrará durante la carrera correspondiente. En otras palabras, el punto de apertura de la admisión y el punto de cierre del escape, se traslapan. El efecto de la dilución de los gases del escape se acentúa grandemente por el valor del traslape existente.

Con un traslape mayor y con aceleración parcial, los gases del escape penetran el múltiple de admisión antes de que se complete la carrera del escape, con el consiguiente aumento de la dilución provocada por los gases de escape. Los motores con válvulas traslapadas, requieren una alimentación extremadamente rica, a menos que se tenga una velocidad de vacío más rápida.

A medida que se abre el acelerador, el problema de la dilución por los gases del escape, se acentúa menos, siendo incrementada la relación aire combustible para proporcionar mayor economía.

El segmento AB, en la figura representa el cambio en la relación de la carga desde la posición en vacío, hasta la velocidad de aproximadamente 40 km/hr, para motores automotrices, sobre caminos sin desniveles.

Una vez que se reduce la interferencia de la dilución de los gases de escape, el problema viene a ser, el de trabajar el motor con las mezclas más económicas. La escala económica se puede observar en la figura como el segmento BC. La relación aire combustible que puede proporcionar máxima economía, se determina mediante experimentos.

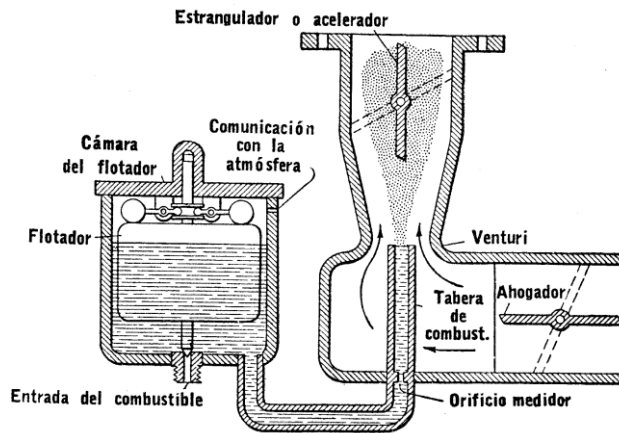
En la escala de economía, la relación aire-combustible pobre, ocasiona que disminuya la velocidad de la llama al propagarse dentro de la cámara de combustión. Para compensar por la combustión lenta, debe avanzarse la chispa, mejorando la economía.

Al abrir el acelerador hasta aproximadamente $3/4$, se enriquece la mezcla por la siguiente razón: es de suponer que está requiriendo la potencia máxima y por lo tanto, se requiere una mezcla rica.

1.4.1. El sistema de carburación de combustible

Los elementos principales de un sistema de combustible se ilustran en la siguiente figura y consta de un depósito de almacenamiento, la bomba de combustible, el carburador y el múltiple de admisión.

Figura 8. Elementos de un carburador simple, de succión ascendente



Fuente: OBERT, Edward F. Motores de combustión interna. p. 23.

El carburador simple, consta de una cámara del flotador, una tobera con orificio medidor, un venturi, una válvula de aceleración y una válvula cebadora. En la sección más pequeña del venturi (o tubo cebador), se coloca el extremo de la tobera, que está conectada mediante un orificio medidor al depósito de gasolina, en la cámara del flotador. Cuando desciende el pistón en la carrera de admisión, se reduce la presión en el cilindro, y dado que la presión atmosférica es mayor forzaré al aire dentro del cilindro.

El extremo de la tobera de la gasolina, se encuentra en la sección reducida del venturi. En esta sección, aumenta la velocidad del aire, dado que su diámetro es menor y por ambas secciones debe pasar la misma cantidad de aire. Sin embargo, si aumenta la velocidad, disminuye la presión en la sección de alta velocidad y la diferencia de presiones quedará ejercida sobre la gasolina en la cámara del flotador (dado que en ella la presión es la atmosférica y la presión en la sección del venturi es menor que la atmosférica).

Debido a esta diferencia de presiones, la gasolina será atomizada en el seno de la corriente de aire y transportada por él, al cilindro. Parte de la gasolina líquida será vaporizada (ocasionando que baje la temperatura de la mezcla), en tanto que otra parte será transportada como partículas líquidas en la corriente de aire y como película líquida, en las paredes del múltiple.

Otra válvula de mariposa, semejante al acelerador, llamada cebador o ahogador sólo permanece completamente cerrada, al encender el motor en frío (a una temperatura inferior a la temperatura óptima de trabajo). Estando en la posición de cerrado, el descenso del pistón en la carrera de admisión baja la presión a lo largo del múltiple, así como en el carburador. Se restringe el flujo de aire, no así el de combustible y por lo tanto, se proporciona al cilindro una mezcla rica.

Si todo el combustible se vaporizará, el motor no arrancaría, debido a que habrán sido excedidos los límites de inflamabilidad de la mezcla. Sin embargo, como el motor está supuestamente frío, solo una parte del combustible se vaporiza y, consecuentemente, la mezcla aire-vapor estará dentro de los límites de inflamación. El resto del combustible, que está en forma líquida se desperdicia. Una vez que el motor ha sido arrancado, se va abriendo gradualmente el ahogador, según aumenta la vaporización, hasta que el motor se calienta a su temperatura de funcionamiento.

La falla del ahogador para abrir, ocasiona que el motor se ahogue. En este caso, la cantidad de combustible dentro del múltiple y el cilindro es muy grande y cuando aparece la chispa, la mezcla aire-vapor es demasiado rica para ser quemada. El exceso de combustible se elimina accionando el motor con el acelerador totalmente abierto, permitiendo de esta forma que entre aire para ventilar el cilindro.

Aún cuando el carburador es relativamente simple y sin fallas, tiene muchas desventajas, enumerándose:

- El venturi (y el múltiple) ofrecen restricción para el flujo de aire al interior del motor, porque parte de la caída de presión no se recobra, Si el venturi, se hace grande para reducir este efecto de estrangulación, la caída de presión disponible para el medidor de combustible, puede ser inconvenientemente pequeña.
- Para una correcta distribución, debe suministrarse calor, lo que resulta en una alimentación de aire más caliente inducida al motor y un bajo rendimiento volumétrico.

- La aceleración se retarda, dado que el combustible debe fluir desde el carburador hasta el cilindro.
- El arranque es obstaculizado por la dependencia de la succión del motor para suministrar las mezclas ricas requeridas.
- Dado que el múltiple contiene una mezcla, siempre existe el peligro de retorno de la llama desde el cilindro al interior del múltiple.
- Los combustibles altamente volátiles, convienen mejor para funcionar con un carburador, por el problema de la distribución; los combustibles menos volátiles se pueden usar cuando el combustible es inyectado directamente dentro del motor.

Para evitar fallas inherentes en un carburador se puede hacer la inyección mecánica y electrónica del combustible, que puede ser directamente en el interior del cilindro, en alguna etapa de la carrera de admisión, o dentro de la corriente de aire en el interior del múltiple. En el último caso, aun subsisten los problemas provenientes del diseño del múltiple. El equipo de inyección es mucho más complicado y más costoso que el carburador.

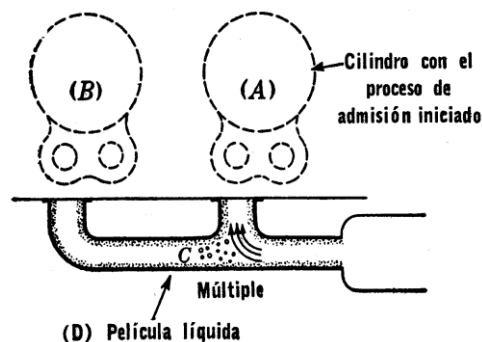
1.4.2. El múltiple de admisión

En virtud de que el múltiple ha sido incluido para distribuir el combustible en los estados tanto líquido como gaseoso, lo más esencial es asegurar una división igual de caudal líquido y de partículas. Esta división, descansa en el principio básico de que la acción divisoria deberá ocurrir antes de que se presente un cambio de disección dentro del múltiple (y en principio resulta imposible de satisfacer completamente).

Como se observa en la figura 9, la mezcla puede ser homogénea en algunas zonas, pero cuando se presenta una inflexión, la inercia de las partículas líquidas pesadas tiende a evitar el cambio de dirección. Un determinado cilindro como, por ejemplo, el A, puede recibir una cantidad más reducida de combustible líquido y consecuentemente estará recibiendo una mayor relación aire-combustible.

El cilindro final B, podrá recibir no solamente su dosis proporcional, sino también muchas partículas líquidas (C), que fueron succionadas de la corriente de la mezcla que correspondía al cilindro A. La mayor parte del combustible, también puede fluir como una película líquida D sobre las paredes del múltiple, porque la temperatura no es suficientemente alta para vaporizar todo el combustible, ni la velocidad es lo suficientemente elevada para mantener en suspensión las gotas atomizadas.

Figura 9. **Flujo de combustible en el múltiple de admisión**



Fuente: OBERT, Edward F. Motores de combustión interna. p. 456.

1.4.3. Carburación por inyección

Es posible utilizar la inyección de combustible en un motor ECH tanto en el múltiple de admisión como dentro del cilindro en la carrera de admisión sin utilizar un sistema de inyección para iniciar y regular la combustión. Este sistema de inyección debe satisfacer los siguientes requisitos fundamentales:

- Inyectar la cantidad de combustible requerida por la carga aplicada al motor y mantener esta cantidad constante, de ciclo a ciclo de funcionamiento y de cilindro a cilindro.
- Atomizar el combustible
- Distribuir el combustible dentro de la cámara de combustión.

Un motor ECH, con inyección de combustible al ser comparado con un motor con carburador, mostrará:

- Mayor potencia debido al aumento del rendimiento volumétrico.
- Aceleración más rápida, ya que el combustible es inyectado lo más cerca del cilindro y no necesita el flujo a lo largo del múltiple.
- Arranque más fácil, dado que el combustible es atomizado y suministrado al cilindro.
- Diseño más compacto del motor.
- Habilidad para utilizar combustibles menos volátiles.

Por otra parte, comparando los equipos de inyección con los concernientes para la carburación, se tienen las siguientes desventajas:

- Mayor costo de fabricación
- Más complicados para ajustarse y mantenerse
- Menor tiempo para el proceso de mezcla

En general, un sistema de inyección de gasolina consta de: uno o más inyectores, un regulador de presión, una bomba y un filtro de gasolina, un contactor en la mariposa, un captador de revoluciones, un medidor de flujo de masa de aire, un sensor de temperatura del motor y una sonda Lambda.

La cantidad de combustible que proporciona el inyector(es) la determina la unidad de control del motor, ECU, según la información que reciba de diversos sensores. En primer lugar necesita información de la cantidad de aire que entra en el múltiple de admisión utilizando un medidor de flujo de masa de aire, sensor MAF (*Mass Air Flow*), así como otras medidas como la temperatura del motor, el régimen de giro, la posición de la mariposa, y la composición de la mezcla utilizando la sonda Lambda también denominada sensor de oxígeno (en el sistema de escape). Con estos datos la ECU determina el tiempo de abertura del inyector(es) para que este proporcione la cantidad correcta de combustible.

1.5. Rendimiento del motor

Al analizar el rendimiento de un motor de combustión interna, es de mucha importancia el conocimiento de las cantidades relativas de aire y combustible presentes en la mezcla suministrada. La mezcla puede ser determinada con gran precisión mediante el análisis de los gases de escape, si las mediciones son precisas.

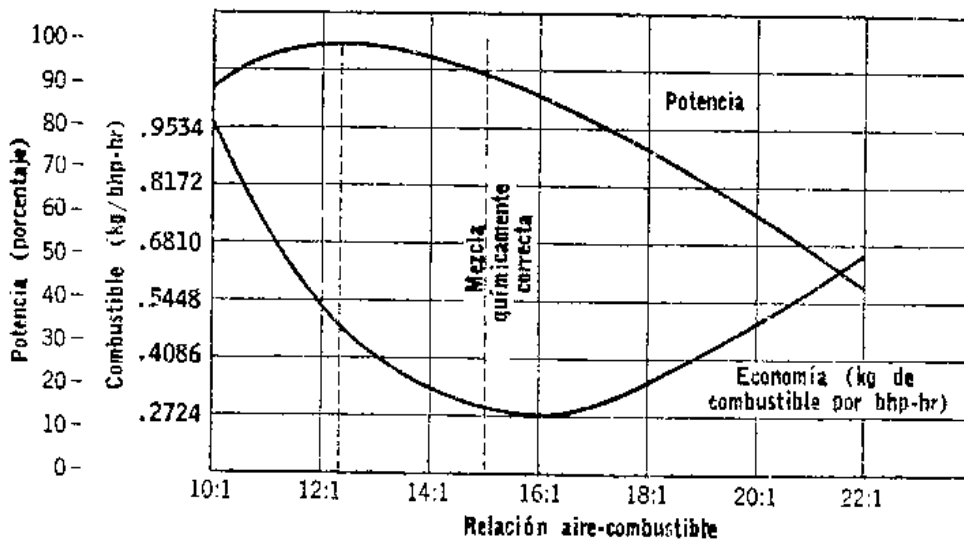
Aun cuando pueden utilizarse en el motor de combustión, diferentes relaciones de aire-combustible, se ha encontrado que hay una relación definida para obtener la máxima potencia y otra relación diferente y definida, para máxima economía. Analizando primero la potencia obtenida en el motor a velocidad constante, se sabe que el motor aspira una cantidad constante de aire, limitada directamente por el desplazamiento del pistón.

Si se aumenta el flujo de combustible permitiendo que una mayor cantidad entre en la corriente de aire por el carburador o por el sistema de inyección, la potencia aumentará por el aumento de la energía química liberada. Este aumento en la potencia por el aumento de combustible seguirá creciendo hasta que se alcance un punto en el que todo el aire (oxígeno) en el cilindro se utilice efectivamente en la combustión; es decir, hasta que se obtenga la liberación óptima de energía química de la reacción del combustible y el aire.

Dado que el flujo de combustible se puede aumentar, en tanto que el flujo de aire es fijado por el diseño y desplazamiento del motor, es el aire y no el combustible, el que impone un límite a la potencia obtenida de él. Consecuentemente, se obtiene la máxima potencia cuando se consume efectivamente todo el aire contenido en el cilindro. La máxima economía del motor se logra cuando el combustible se quema completamente, y para ello, se debe suministrar un exceso de aire.

En la figura 10, se ilustran las relaciones entre potencia, economía y relación aire combustible para un motor particular. Se tiene la máxima potencia cuando todo el aire se quema en la forma de una relación aire-combustible, rica; en tanto que se obtiene la máxima economía, cuando se emplea una mezcla pobre.

Figura 10. Variaciones de la potencia y la economía en un motor ECH



Fuente: OBERT, Edward F. Motores de combustión interna. p. 387.

En resumen, la relación entre el aire y el combustible varía constantemente en un motor de combustión interna. En condiciones perfectas, la combustión total de 1 gramo de gasolina se consigue con 14,7 gramos de aire, a esta relación se le conoce como mezcla estequiométrica.

1.5.1. Rendimiento volumétrico

El rendimiento volumétrico de un motor de combustión interna, es la relación entre la masa de aire que hay en el cilindro en el PMI en la carrera de admisión, y la que podría haber, dado el volumen de la cámara de combustión a la temperatura y presión atmosférica:

$$\eta_v = \frac{m_a}{m_t} \times 100\%$$

En donde m_a es el peso real de aire inducido por la carrera de admisión y m_t es el peso teórico de aire para llenar el volumen de desplazamiento bajo condiciones atmosféricas.

La denominación rendimiento volumétrico es un nombre equivoco porque se trata de una relación de pesos y no de volúmenes.

En un motor atmosférico de gasolina, el rendimiento volumétrico es siempre inferior al 100% cuando el motor trabaja en carga parcial, porque la mariposa limita la entrada de aire. Si funciona a plena carga, puede llegar al 100% de rendimiento volumétrico. En un motor atmosférico diesel, el rendimiento volumétrico se acerca al 100% en ambos casos porque la entrada de aire no está limitada.

2. PROCESO DE ADMISIÓN DE AIRE EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

El propósito del sistema de inducción de aire, en un motor de combustión interna controlado electrónicamente, es filtrar y medir el flujo de aire que ingresa al motor. La cantidad de aire que ingresa al motor, es función del ángulo de apertura de la válvula de aceleración y de las revoluciones del motor. El sensor de flujo de masa de aire, convierte la cantidad de aire que entra al motor en una señal de voltaje. La computadora necesita esta información para calcular la cantidad de combustible que debe inyectar y el momento en el que debe mandar la señal de ignición a cada cilindro.

2.1. Sistema de admisión de aire

Para la alimentación de aire en un motor de combustión interna, se utiliza la presión atmosférica, es decir, a medida que el pistón se desplaza en la carrera de admisión, la presión atmosférica empuja el aire al interior del cilindro. La velocidad que alcanza el aire para llenar el cilindro depende en gran parte de la presión atmosférica. Si la presión atmosférica aumenta, también aumenta la fuerza con la que el aire es empujado al interior del cilindro.

Se denomina aire a la mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre. El aire seco está compuesto en proporciones ligeramente variables por sustancias tales como; nitrógeno (78%), oxígeno (21%), ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y algunos gases nobles como el criptón o el argón, es decir, 1% de otras sustancias. Para la mayoría de los cálculos, es suficientemente aproximado considerar al aire seco compuesto de 21% de oxígeno y 79% de gases inertes como nitrógeno. El polvo o la humedad del aire atmosférico varían entre límites muy amplios, dependiendo de las condiciones meteorológicas.

Así, al aumentar la presión atmosférica, el número de moléculas de oxígeno contenidas, por ejemplo en un litro, es mayor. La mayor concentración de oxígeno por unidad de volumen, permite quemar más combustible, por lo que aumenta el rendimiento volumétrico del motor y este es capaz de generar mayor potencia.

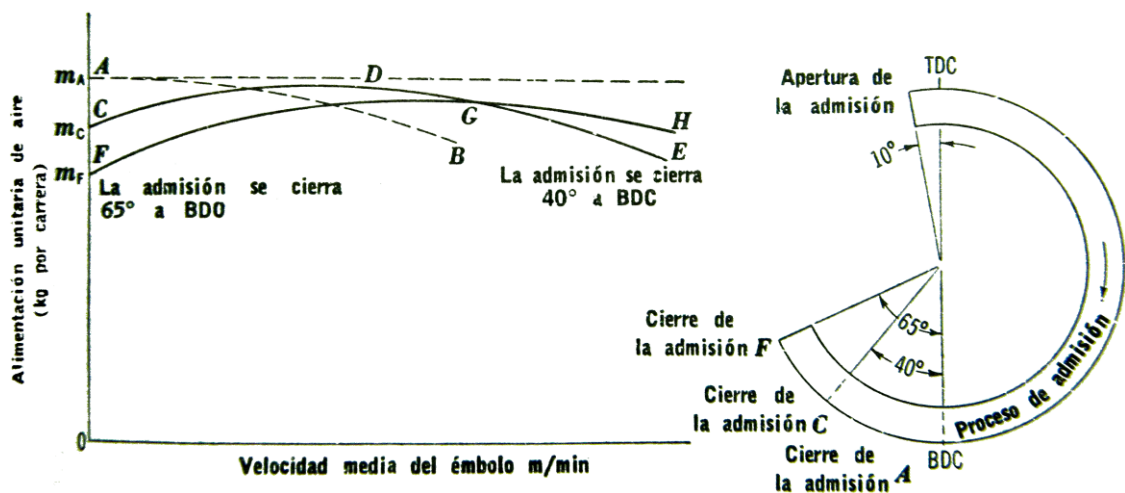
2.2. Alimentación unitaria de aire

El trabajo desarrollado por un motor, depende de la cantidad de energía liberada al quemarse una mezcla de aire y combustible. Dado que tanto el aire como el combustible son partícipes en el proceso de combustión, es evidente que los dos son igualmente importantes. Sin embargo el volumen ocupado por un combustible líquido o gaseoso, es solamente una fracción del volumen ocupado por el aire y por esta razón, la inducción del aire representa el problema mayor. Si el motor no induce la mayor cantidad de aire posible, el trabajo entregado por él será limitado, sin importar la cantidad de combustible que se añada.

Un requisito básico para un motor, es su capacidad para inducir una gran cantidad de aire por unidad de desplazamiento del pistón. Al peso del aire atraído al interior del motor en una carrera de admisión, se le llamará la alimentación unitaria de aire. Dividiendo la alimentación unitaria entre el peso del aire que llena el volumen de desplazamiento de un cilindro, a la presión y temperatura de admisión, se tiene el rendimiento volumétrico.

Ahora, se describirá como el sincronismo de las válvulas de un motor común de pistón de movimiento alternativo, se adapta al comportamiento del flujo de gases.

Figura 11. **Efecto de la regulación de la válvula sobre la alimentación unitaria de aire**



Fuente: OBERT, Edward F. Motores de combustión interna. p. 535.

En la figura 11, se observan tres puntos diferentes de cierre de la válvula de admisión, con un punto común de apertura. En todos los casos, la válvula de admisión principia a abrir antes del PMS, de tal forma, que cuando el pistón desciende en su carrera de admisión el espacio de apertura de la válvula, no será tan pequeño como para estrangular seriamente el flujo de aire que entra.

Supóngase primero, que la válvula de admisión cierra en el PMI, por lo tanto, principiará a cerrar mucho antes al reposo. Con velocidades lentas del pistón, la pérdida por estrangulación será pequeña dado que las velocidades del aire a través del múltiple y la válvula son bajas y la alimentación unitaria de aire llega a aproximarse al valor límite, m_A . Esta alimentación de aire, correspondería a llenar el volumen de desplazamiento con aire a la temperatura y presión ambiente; esto es, que el rendimiento volumétrico sería de 100%.

Pero a medida que la velocidad del pistón aumenta, la del flujo de aire inducido por su movimiento, también aumenta y las pérdidas por estrangulación del cierre anticipado de la válvula de admisión, serán correspondientemente mayores. Por lo tanto, la alimentación unitaria de aire tendrá una característica baja, como AB, si la válvula de admisión cierra en el PMI.

Nótese que al llegar el pistón al punto medio de su recorrido, la velocidad será mayor y la impartida al gas de entrada también será mayor. A medida que el pistón llega a su punto de reposo en el PMI, el momento del gas de entrada, especialmente a velocidades más altas del motor, continuará alimentando al cilindro aun cuando la velocidad del pistón se haga cero (en PMI). Para sacar ventaja de este efecto de inercia de la alimentación, se permite que el cierre de la válvula de admisión se retarde, hasta 40° después del PMI.

Por otra parte, en el tiempo de compresión, el pistón sube con baja velocidad del motor y como la válvula de admisión aún está abierta, una parte de la alimentación será rechazada de regreso al múltiple de admisión. Es decir, se tendrá una alimentación de aire de solo m_c . Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad, el aire en el múltiple y el que fluye a través de la válvula de admisión, alcanzarán altas velocidades.

Cuando el pistón alcanza su posición de reposo en el PMI y lentamente principia a regresar en el siguiente tiempo, el momento del aire de entrada no es tan fácil de ser vencido por el pistón, moviéndose en dirección contraria y así es aspirada una mayor cantidad de alimentación unitaria: C a D. Si la velocidad aumenta progresivamente, se alcanza finalmente un punto en el que la fricción proveniente de la alta velocidad del aire en movimiento, más que compensa la ganancia proveniente del momento de la alimentación del cilindro y la alimentación unitaria de aire disminuye: D a E.

En la misma forma, si la válvula de admisión se cierra en un tiempo posterior F (65°), para velocidad cero, la alimentación se reducirá hasta m_f , y el equilibrio o punto máximo G, se moverá a una velocidad mayor. Aun siendo G inferior a D, se obtiene una ganancia a altas velocidades (GH), situada en su mayor parte arriba de DE.

Analizando esta situación, el punto máximo de la alimentación unitaria de aire, puede transferirse a velocidades mayores o menores, cambiando la regulación de la válvula de admisión, o las dimensiones del múltiple y el espacio de apertura de la válvula; o mediante ambos métodos.

Hasta este punto se ha ignorado el proceso de escape, aun cuando la existencia de un gas residual afecta la alimentación unitaria de aire. Considérese el gas residual en el volumen de compresión, estando a una presión mayor a la del múltiple de admisión. Al abrir la válvula de admisión, el gas residual en el volumen de compresión se dilata dentro del múltiple de admisión y posteriormente es succionado al interior del cilindro, a medida que el pistón desciende en la carrera de admisión.

El efecto de la alta presión del gas del escape, es el de reducir la alimentación unitaria del aire. Nótese también, que la apertura de la válvula de admisión antes del PMS, o antes del cierre de la válvula de escape, tiende a reducir la alimentación unitaria de aire, ya que aumenta el flujo de retorno del gas residual al interior del múltiple de admisión.

Por otra parte, si la presión del gas de escape es menor que la presión de admisión, será estimulada la inducción de la alimentación de entrada. Este efecto puede provenir del momento de la columna del gas residual a través del tubo de escape, formando un vacío en la cámara de combustión.

Los gases del escape viajan a lo largo del tubo correspondiente a altas velocidades, debido al proceso de purga y debido a la expulsión de la masa del cilindro en la carrera de escape. A medida que el pistón reposa en el PMS de la carrera de escape, la masa de gas en el sistema residual y la velocidad de esa masa, dan origen a un efecto de momento que barre la cámara de combustión y reduce su presión. La magnitud de la presión final del escape es controlada por: la longitud del tubo de salida, la velocidad del gas dentro de él, la descarga proveniente de los otros cilindros y la frecuencia de descarga de los gases.

También debe considerarse que al introducirse la mezcla de combustible-aire dentro del cilindro del motor ECH, con la mariposa completamente abierta, se hace necesario el calor para vaporizar una porción del combustible, para su buena distribución, la alimentación de aire unitario disminuirá, porque ha disminuido la densidad del aire y porque el volumen del combustible gasificado, desplaza parte del aire. La mezcla al entrar al cilindro, también es calentada por contacto con las paredes calientes.

En resumen, la alimentación unitaria de aire y por ello el rendimiento volumétrico, son controlados y afectados por:

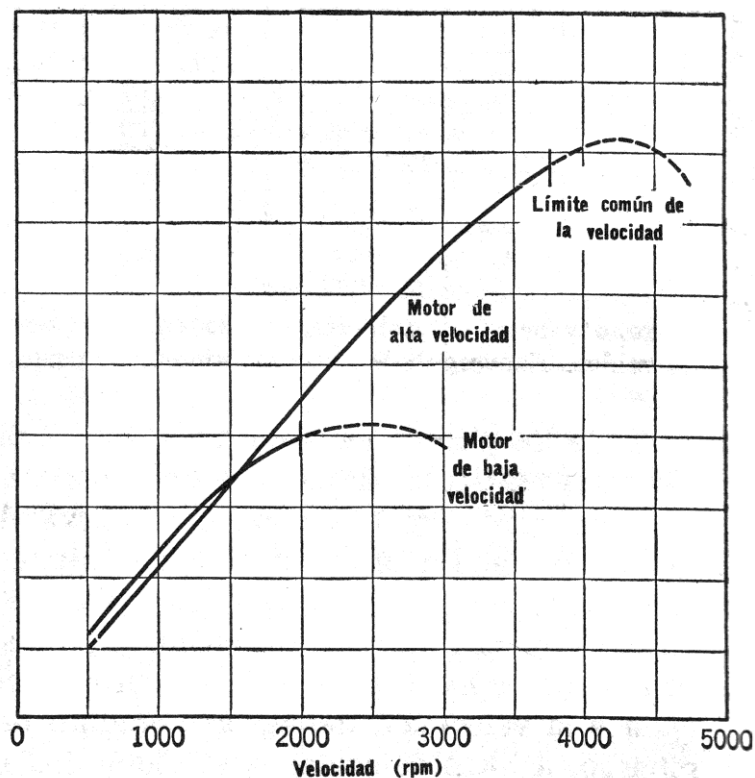
- El punto de apertura y cierre de la válvula de admisión
- La velocidad del pistón
- El espacio de la abertura de la válvula de admisión y las dimensiones del múltiple de admisión
- El gas residual en la cámara de combustión
- El calentamiento de la alimentación entrante
- Por la presencia del combustible vaporizado

2.3. Consumo de aire y combustible

Suponiendo que la alimentación unitaria de aire con la mariposa completamente abierta (en kg por carrera), se debe multiplicar por el número de carreras de admisión, por hora, del motor; el resultado será el consumo de aire del motor (en kg/h). El trazo del consumo de aire contra las rpm, sería como el de la figura 12, para un motor de baja velocidad y un motor de alta velocidad.

En la figura 12, se puede ver que tanto la velocidad como la alimentación unitaria controlan el consumo de aire y que continúa en ascenso aun cuando la alimentación unitaria de aire haya pasado de su punto máximo. Este aumento en el consumo de aire, es finalmente detenido por un rápido descenso en la alimentación unitaria, pero este punto está más allá del margen de velocidades del motor. Por cada kilogramo de aire inducido en el motor, debe añadirse una cantidad proporcional de combustible. Por lo tanto, el consumo de combustible en kg por hora, es proporcional al consumo de aire.

Figura 12. **Variaciones del consumo de aire en motores de alta y baja velocidad**



Fuente: OBERT, Edward F. Motores de combustión interna. p. 544.

2.4. Sensores de medición de flujo de aire en motores de combustión interna

La información sobre el flujo de masa de aire dentro de un motor de combustión interna es esencial si la mezcla de aire-combustible del motor y posteriormente la combustión deben ser efectivamente controladas.

En los motores antiguos que utilizaban carburador, el flujo de aire que pasa a través de la tobera del carburador, bastaba para introducir combustible en la corriente de aire, y al utilizar toberas con diferentes tamaños de orificios, era posible ajustar la relación aire-combustible para ser aproximadamente correcta sobre el rango de operación del motor.

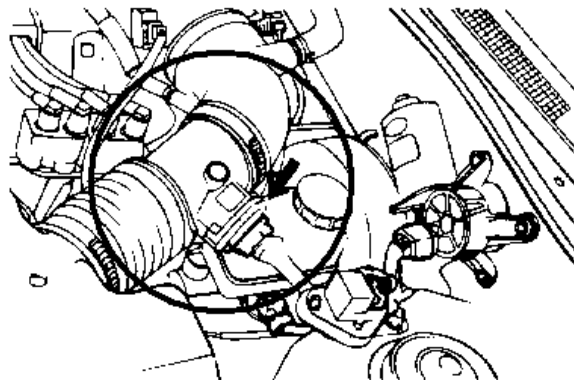
Con la introducción del control de emisiones se volvió evidente que la utilización del carburador por sí solo, no era suficiente para controlar la relación aire-combustible con la precisión necesaria para cumplir con los requerimientos críticos de los gases de escape. La única solución era utilizar la inyección de combustible en conjunto con un método de medición del flujo de masa de aire que entra en el motor.

El primer método en ser utilizado hacia uso de un sensor para medir la presión al vacío en el múltiple de admisión, de donde se calculaba la masa del flujo de aire en base al flujo volumétrico del motor, la velocidad rotacional y la densidad del aire. Era necesario medir la temperatura del aire para calcular su densidad; la precisión de la medida obtenida se veía afectada adversamente por las variaciones de presión causadas por resonancias en el múltiple, por el efecto de un flujo en reversa en algunos motores y por las variantes en la construcción y uso subsecuente.

Por estas razones la medición directa del flujo de aire en el múltiple de admisión del motor ha sido considerada por muchos años ser el mejor y más preciso método.

En un vehículo, el sensor de flujo de masa de aire se localiza directamente en el conducto de entrada de aire al motor, entre el filtro de aire y la mariposa del colector de admisión, que es donde se puede medir la cantidad de aire fresco que ingresa al motor.

Figura 13. **Ubicación del sensor de flujo de masa de aire**



Fuente: <http://www.newtonnet.co.uk/coupe/service/webtech/iindex.asp?id=12117>. enero 2011.

En la siguiente figura, hay algunas imágenes de sensores de flujo de masa de aire que se utilizan en automóviles. Usualmente tienen una carcasa de aluminio o bien una carcasa plástica de color negro. Es común que la sección del sensor que conecta con el filtro de aire sea de mayor tamaño que la parte que conecta con la mariposa del colector de admisión, la diferencia suele ser de aproximadamente media pulgada. El diámetro de la sección que conecta con la mariposa suele estar en el rango de 3 a 4 pulgadas.

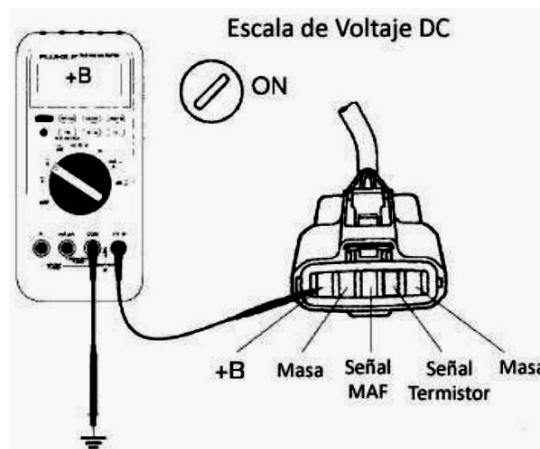
Figura 14. **Imágenes de sensores de flujo de masa de aire**



Fuente: http://www.splitsec.com/products/MAF_Sensors/MAF3.0.htm. enero 2011.

Estos sensores, normalmente operan con 12 V de alimentación y producen a la salida una señal analógica que varía entre 0 y 5 V. También hay sensores que producen una señal de salida digital. Los sensores pueden tener 3, 4 ó 5 terminales. Los sensores con 4 ó 5 terminales suelen tener el sensor de la temperatura del aire incorporado en la misma unidad. En un sensor de 3 terminales, una terminal será la señal enviada a la computadora para medir el caudal de aire, otra provee voltaje al sensor y la restante será tierra.

Figura 15. **Voltajes del sensor de flujo de masa de aire**



Fuente: <http://www.autoshop101.com/forms/h34.pdf>. enero 2011.

A continuación, se describen cinco tipos de medidores de flujo de aire. De estos sensores, el sensor de hilo-caliente es el único que hace una medición directa, los otros dispositivos requieren de algunos cálculos para obtener la medida del flujo de masa de aire.

2.4.1. Medidor de paleta

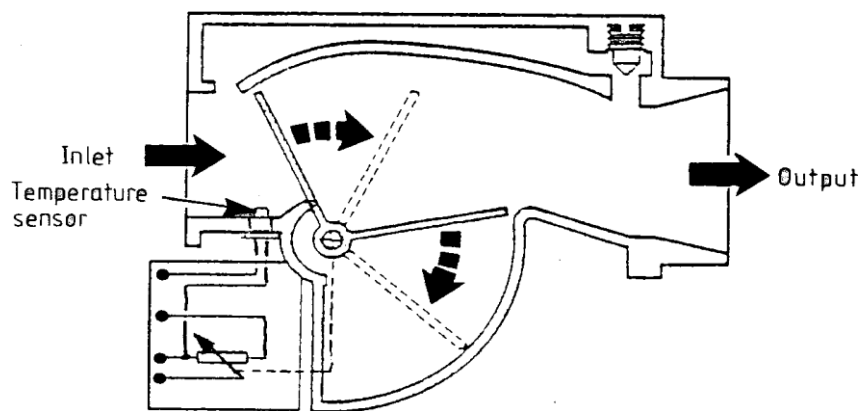
El primero y probablemente el dispositivo más utilizado, es el medidor de paleta desarrollado por Bosch. En este dispositivo una paleta con pivote es colocada en la corriente de aire y se defleca contra un resorte ejerciéndole presión en proporción al flujo de aire. Este pivote se encuentra unido a un potenciómetro que produce un voltaje analógico que depende de la deflexión de la paleta.

La operación de este medidor de flujo de aire tipo-paleta se basa en la ecuación de Bernoulli y produce una señal de salida que es proporcional al volumen del flujo de aire y a la raíz cuadrada de la densidad del aire. Es necesario medir la temperatura del aire que entra para poder determinar la densidad del aire y poder calcular el flujo de la masa de aire.

Existen dos grandes problemas con este dispositivo; el primero de estos es que la paleta obstruye el ingreso del aire a tal grado que causa una reducción en la eficiencia del motor. El segundo problema es que el dispositivo tiene una inercia mecánica significativa que produce una respuesta lenta del orden de 100 ms a trascientes que dan como resultado un cálculo de la relación aire-combustible durante las trascientes que debe ser hecho sin la información correcta sobre el flujo de masa de aire.

Sin embargo, ha probado ser un dispositivo de mucho valor para toda una generación de motores inyectados. A partir de 1993, este tipo de medidor de flujo de aire ha sido reemplazado progresivamente por el medidor de hilo-caliente que se describe a continuación.

Figura 16. **Medidor tipo-paleta**



Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 64.

2.4.2. **Medidor de hilo-caliente**

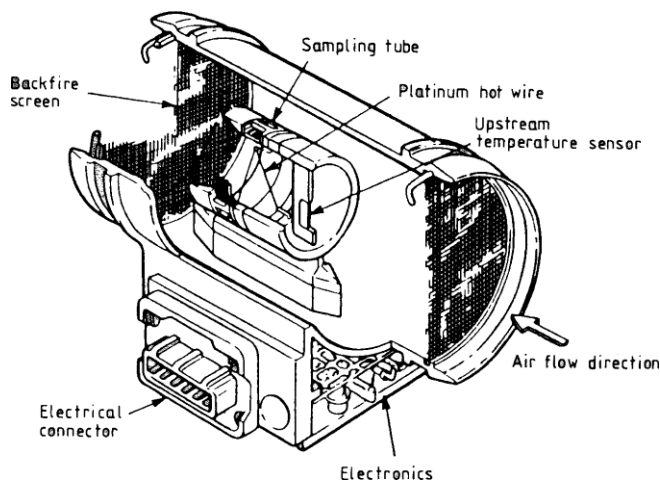
El medidor de hilo (conductor) caliente, se basa en el hecho que un cuerpo caliente dentro de una corriente de aire perderá calor a una tasa relacionada a la masa y velocidad del aire que fluye sobre él y de la diferencia de temperatura entre el hilo y el aire. En su forma original desarrollada por Bosch, un conductor delgado, usualmente de platino, es suspendido sobre el flujo de aire para ser medido y calentado eléctricamente a una temperatura significativamente mayor a la temperatura del aire.

Si la diferencia de temperatura entre el aire y el conductor caliente se mantiene constante mediante el control del flujo de corriente en el hilo caliente entonces existe la siguiente relación:

$$I^2 = A + B\sqrt{G_a}$$

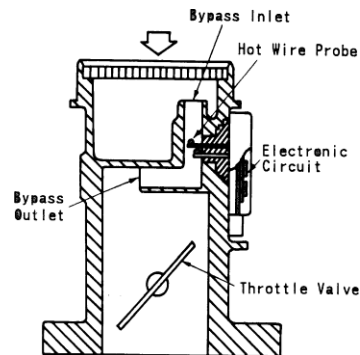
Donde A y B son constantes, I es la corriente que calienta el hilo y G_a es la tasa del flujo de masa de aire. Esta medición directa de la tasa de flujo de masa de aire es una ventaja en particular de este método sobre el medidor de paleta, la otra es su rápida respuesta, en el orden de 1-2 ms para un conductor libremente suspendido y menor a 10 ms cuando el conductor se encuentra cubierto o cuando una película conductora se deposita en una bobina como en la versión desarrollada por Hitachi.

Figura 17. **Medidor de hilo caliente (en la entrada principal)**



Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 65.

Figura 18. **Medidor de hilo-caliente (en un pasaje de *by-pass*)**



Fuente: Society of Automotive Engineers. Sensor & Actuators. p. 4.

El primer medidor de flujo de aire, que utilizó este principio para el control del motor, utilizaba un conductor delgado de platino suspendido en el centro del múltiple de admisión, precedido por un sensor de temperatura para el aire entrante.

Se encontró que la superficie del conductor era susceptible a la contaminación, situación que modificaba su función de transferencia de calor y por lo tanto afectaba su precisión en la medición. Se ideó una estrategia en la que el conductor era brevemente calentado a una temperatura mucho mayor de la normal cuando se encendía o apagaba el motor para “quemar” la contaminación. Se encontró que esta acción era efectiva, pero el conductor expuesto también era vulnerable a daño mecánico, particularmente de los gases de la combustión que retornan al múltiple de admisión, producidos por un fenómeno conocido como: *engine backfire*.

Hitachi desarrollo un nuevo arreglo en el que el conductor caliente se encontraba cubierto en una pequeña bobina cerámica y se colocaba en un conducto tipo *bypass* en el múltiple de admisión (figura 18), sin embargo, se obtuvo resultados similares al del conductor expuesto, aunque con cierta reducción en la velocidad de respuesta al orden de los 10 ms.

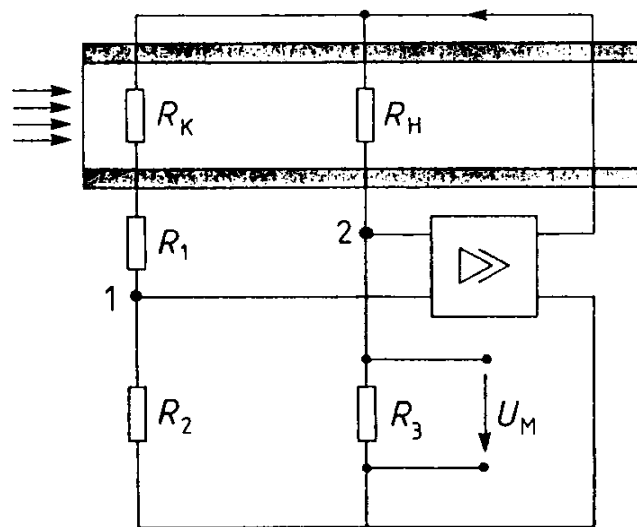
Sensores más recientes han utilizado un hilo de platino, depositado en una espiral cubierta con una bobina cerámica muy delgada con una cubierta a prueba de corrosión en la superficie adyacente a un sensor de temperatura hecho de la misma forma para darle una repuesta térmica muy parecida en condiciones de estado transitorio.

El arreglo del circuito original del sensor de flujo de masa de aire y el sensor de temperatura se muestra en la figura 19. La resistencia que representa el hilo-caliente, R_H , forma un brazo del circuito del puente *Wheatstone* y su temperatura se mantiene a 100°C arriba de la temperatura ambiente del flujo de aire de admisión.

Para un conductor típico la corriente de calentamiento que requiere para mantener esta diferencia de temperatura varía de 500 a 1 200 mA dependiendo de la cantidad de flujo de aire de admisión. Esta corriente se convierte en una medida de flujo de masa de aire y se mide con una caída de voltaje a través de la resistencia de precisión de película delgada con bajo coeficiente de temperatura, R_3 .

La otra mitad del puente consiste de la resistencia del sensor de temperatura R_K y el divisor de voltaje formado por las resistencias relativamente altas R_1 , R_2 . Los cambios en la temperatura ambiente cambian el voltaje en el punto 1 y para mantener el puente en balance se usa un amplificador operacional para comparar los voltajes en el punto 1 y 2 y se utiliza la salida para controlar la corriente a través de las ramas formadas por R_H , R_3 y R_K , R_1 y R_2 . Durante la instalación la resistencia R_2 se ajusta con láser durante las pruebas finales para calibrar el sensor a un nivel de flujo de aire predeterminado.

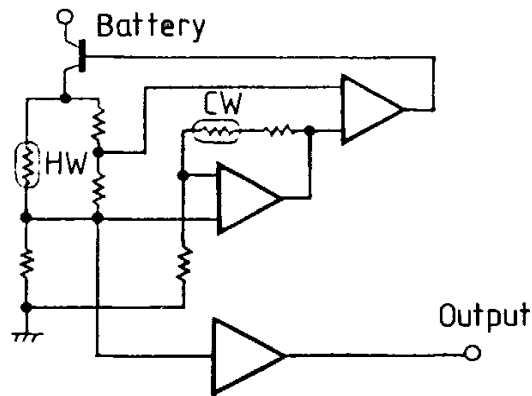
Figura 19. **Circuito básico de un puente utilizado con el sensor de hilo-caliente**



Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 66.

En sistemas más recientes, el circuito ha sido mejorado con la utilización de un amplificador operacional adicional como se muestra en la figura 20. Con el uso de este arreglo, la corriente a través del sensor de temperatura del aire se puede suprimir ya que la medida de la temperatura del aire no se ve afectada por el auto-calentamiento del sensor.

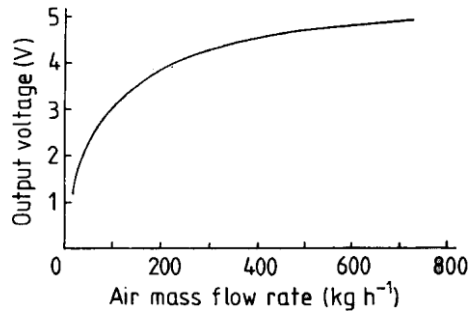
Figura 20. **Diagrama del circuito para el sensor de hilo-caliente, con el sensor de la temperatura del aire suprimido**



Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 67.

La curva de respuesta para un sistema de hilo-caliente de este tipo, se muestra en la figura 21, y se puede observar que hay una reducción en la sensibilidad a altas tasas de flujo de aire. Es importante mantener el flujo de aire en forma laminar (aire fluya en capas paralelas) sobre el sensor de hilo caliente si se quiere mantener la exactitud.

Figura 21. **Curva de operación del sensor de hilo-caliente**

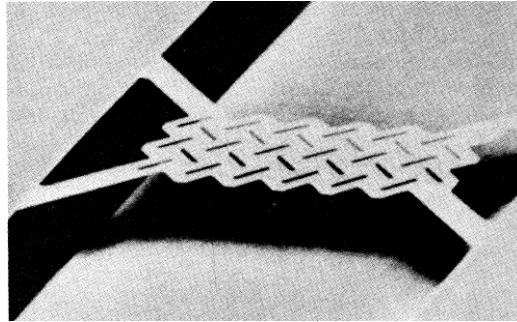


Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 67.

Otro avance en el desarrollo de este sensor, es el uso de un convertidor voltaje-frecuencia, utilizado para darle un salida digital al sistema. El sensor es diseñado para operar sobre un rango de flujo de aire de 0,0035 a 0,14 kg s⁻¹ y una temperatura de operación en el rango de -40 a 125°C con una exactitud mejor que $\pm 4\%$; en contraste con el medidor de paleta este sensor puede responder efectivamente en condiciones de estado transitorio del motor.

El futuro del desarrollo de este sensor, que está siendo utilizado en cantidades cada vez mayores, se dirige al uso de dispositivos que usan una película silicón para los sensores de flujo de aire y temperatura. Un ejemplo de esta configuración se muestra en la siguiente figura.

Figura 22. **Sensor de hilo-caliente de película de silicón**



Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 68.

2.4.3. Medidor de vórtices

El único sensor de flujo de masa de aire, distinto al medidor de paleta y al de hilo caliente que es utilizado en la producción de sistemas de control para motores, es el que utiliza un generador de vórtices. Aunque es ampliamente usado en la instrumentación de plantas (primordialmente para líquidos), su uso como sensor automotriz de flujo masa de aire fue descrito por primera vez en 1976.

La operación de este dispositivo depende del hecho que al sostener un objeto sin puntas (por ejemplo, un objeto cilíndrico) en una corriente de aire o de un líquido, resulta en la producción de vórtices que se alejan del objeto. Esto se puede ilustrar con el movimiento en el viento de una bandera unida a un asta. En este caso los vórtices son producidos de forma alterna detrás del asta y en ambos lados de la bandera y causan el usual movimiento de ondeo.

Conforme aumenta la velocidad del viento el número de vórtices producidos por unidad de tiempo también se incrementa y la frecuencia de ondeo aumenta de forma correspondiente.

En un sensor de flujo de aire generador de vórtices la obstrucción del objeto sin puntas produce lo que se conoce como una calle de vórtices de Von Karman que se puede observar en la figura 23. Estos vórtices son normalmente detectados por medio de un haz ultrasónico que es transmitido directamente a través de la corriente de vórtices (ver figura 24), si bien que con un diseño apropiado del cuerpo sin esquinas es posible detectarlas midiendo la tensión del objeto.

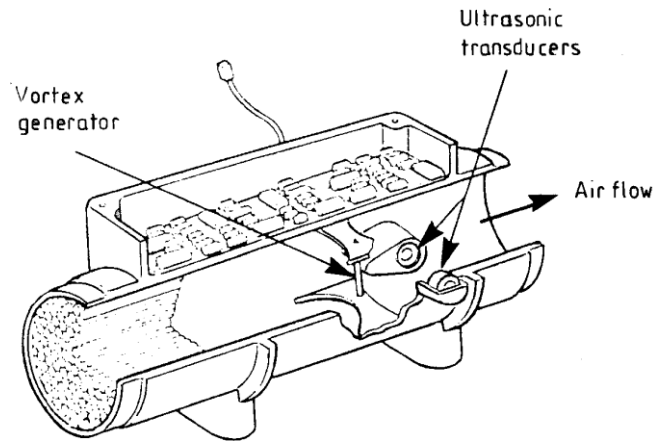
La señal recibida por el sensor ultrasónico de la figura 24, mide la variación de la densidad del aire entre él mismo y el transmisor ultrasónico, y esta señal incluye no solo las señales causadas por el paso de vórtices, sino también información de que densidad de aire se puede derivar. Este parámetro, es requerido porque la salida del medidor de flujo, generador de vórtices es una medida volumétrica del flujo de aire y debe ser corregida a flujo de masa mediante cálculos, utilizando la densidad de aire medida. La velocidad rotacional de los vórtices resulta en la dispersión del haz ultrasónico ya que la energía ultrasónica recibida es modulada en amplitud a la tasa en que los vórtices pasan a través del haz ultrasónico, dando una medición directa de la velocidad del aire.

Figura 23. **Calle de vórtices**



Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 69.

Figura 24. **Sistema de sensores ultrasónicos para la medición de vórtices**

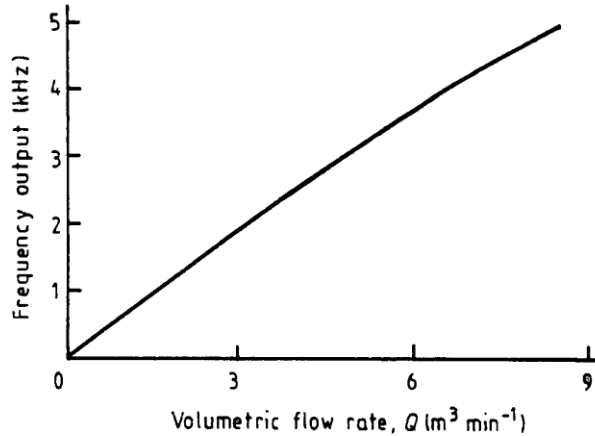


Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 69.

La relación entre la velocidad del aire y la tasa en que los vórtices son generados, y que posteriormente pasan por los detectores ultrasónicos, viene dada por la relación $f = SV/d$, donde d es el ancho del objeto sin esquinas y S es el número de *Strouhal*.

Para un número de Reynolds mayor que 700, el número de *Strouhal* es sensiblemente constante y del orden de 0,21, y es apetecible operar en esta región, donde la respuesta frecuencia versus velocidad es lineal e independiente de los parámetros del ambiente. Sin embargo, en un sensor de flujo de aire generador de vórtices práctico, es necesario operar a tasas de flujo relativamente bajas, así que cierta no linealidad en la respuesta es inevitable. Una curva de respuesta típica se muestra en la figura siguiente.

Figura 25. **Respuesta del medidor de vórtices**



Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 70.

En las pruebas que se llevaron a cabo, las tasas de respuesta de 10 ms se midieron para un cambio en el flujo de aire de 200 ft³ min⁻¹ (5,7 m³ min⁻¹). También se estableció que los cambios en la presión atmosférica tienen poco efecto en la exactitud de la medición y que la temperatura del aire tiene cierto efecto a altas tasas de flujo de aire debido al cambio de la viscosidad del aire.

Para resumir las características del medidor de flujo de aire generador de vórtices: es rápido en respuesta, produce señal de salida semi-digital (frecuencia), sólo mide el flujo de aire en un sentido, tiene un punto muerto (cero) fijo y conocido y alta fiabilidad y bajo costo. Sin embargo, jamás ha llenado por completo las promesas que aparecía ofrecer a finales de la década de los 70's, aunque ha sido utilizado de forma continua por un fabricante japonés de motores en la producción de los sistemas de control de los motores.

2.4.4. Medidor de efecto corona

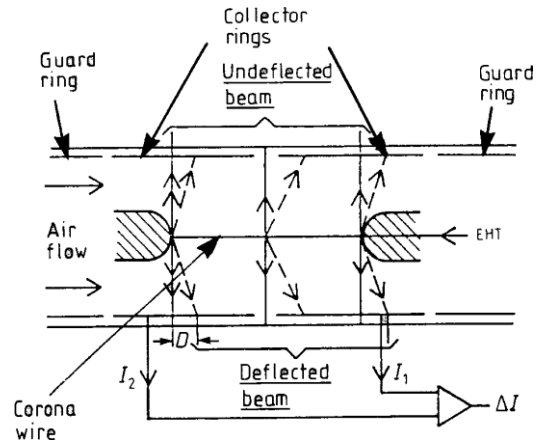
Un método para medir el flujo de masa de aire, que no causa obstrucción en el conducto de flujo de aire, que no tiene partes móviles, con alta velocidad de respuesta y que puede medir y diferenciar el flujo en ambas direcciones, parece ser la respuesta a la plegaria de los diseñadores de los sistemas de control. El medidor de flujo de masa de aire de efecto corona, reúne todas estas características, sin embargo por otras razones nunca se difundió su uso como se pensó en un principio.

El principio de operación se muestra en la figura 26. Un conductor que transporta un voltaje alto, entre 5 y 10 kV, se encuentra suspendido a lo largo del eje de tubo cilíndrico que transporta el flujo de aire a ser medido. El conductor está a un voltaje lo suficientemente alto y tiene un diámetro lo suficientemente pequeño para producir una corona ionizada alrededor de él.

Alrededor del conductor en la superficie interior del tubo, hay electrodos cilíndricos en forma de anillos a un potencial de cero voltios, uno delante y uno detrás del centro (eje) del conductor, separados por una pequeña distancia.

Si no hay un flujo de aire a través del tubo, los iones se dirigirán hacia estos electrodos colectores en forma de anillo bajo la influencia de la diferencia de potencial entre ellos y el conductor. Debido a que estos electrodos colectores están divididos equitativamente de cada lado del eje del conductor, una corriente igual de iones fluirá en ambos electrodos si se agrega un circuito externo. Ahora, si hay un flujo de aire entonces el haz de iones se deflectará en la dirección del flujo como se muestra en la figura y existirá una diferencia de corrientes $I_1 - I_2$ que puede ser medida para dar un diferencial de corriente ΔI .

Figura 26. Principio de operación del medidor de efecto corona



Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 71.

La ecuación de operación de este dispositivo que relaciona el flujo de masa de aire M , con la salida de corriente diferencial ΔI es

$$\Delta I = \frac{IM}{Vk}$$

Donde I es la corriente total ($I_1 + I_2$) que fluye a través de los dos electrodos colectores y V es el voltaje aplicado al conductor central. El factor k en la ecuación relaciona la densidad del aire con la movilidad de los iones, tomando en consideración el hecho que la deflexión del flujo de iones es inversamente proporcional a la movilidad de los iones. Por lo tanto, el valor de k varía según la composición del aire, particularmente con la presencia de agua, y posteriormente el dispositivo requiere ajustes debido a la humedad. También se debe considerar que otras impurezas en el aire pueden afectar el valor de k .

Esta sensibilidad a la composición del aire, es la razón por la que este dispositivo no ha sido aceptado para el uso normal en vehículos; sin embargo, ha encontrado un nicho en la instrumentación de celdas de ensayo donde es posible controlar la calidad del aire utilizado y hacer uso completo de su rápida respuesta y su habilidad de medir el flujo de aire en ambas direcciones, siendo este un factor importante en el estudio del flujo de aire de admisión en el desarrollo de vehículos.

La corriente total $I_1 + I_2$ es normalmente cercana a $50 \mu\text{A}$ y la corriente diferencial ΔI puede ser tan pequeña como $0,5 \mu\text{A}$ a bajas tasas de flujo de aire. Esto requiere dispositivos electrónicos sofisticados de alta impedancia para hacer mediciones confiables y poder hacer un lazo de control para mantener el voltaje en el conductor y así mantener constante la relación V/I y que el efecto corona opere a una resistencia constante cercana a $200 \text{M}\Omega$.

Este sistema de control, estabiliza las condiciones de operación y también puede ser utilizado para producir un voltaje proporcional a la corriente total que pueda usarse para sacar a los dos anillos de guarda mostrados en la figura 26 fuera de los dos electrodos de medición. Este arreglo minimiza la fuga de corriente de los electrodos colectores.

En resumen, el medidor de flujo de masa de aire de efecto corona tiene todas las características requeridas de un sensor preciso, de rápida respuesta que no obstruya el flujo de aire, pero su susceptibilidad a la calidad del aire (principalmente la humedad) lo hace inaceptable para el uso en vehículos; sin embargo, cumple con un rol muy útil en los campos de desarrollo y pruebas.

2.4.5. Medidor ultrasónico

El sensor ultrasónico de flujo de masa de aire, utiliza el efecto diferencial de la velocidad del aire en el tiempo de retraso de una señal ultrasónica propagada con y en sentido contrario al flujo de aire como principio básico de medición.

La configuración de este sensor se muestra en la figura 27. El aire se hace pasar por un tubo en que están montados los dos transductores ultrasónicos capaces, tanto de transmitir como de recibir ondas ultrasónicas. Los dos transductores son activados con un pulso muy corto para producir un tren de ondas cortas con un período significativamente menor que el tiempo que le toma al sonido viajar entre los dos transductores. Inmediatamente después que se completa el tren de ondas, ambos transductores conmutan de transmisor a receptor, y cada uno detecta la señal recibida del transductor distante y su electrónica asociada compara el tiempo que le toma a los dos tren de pulsos en viajar en sentido contrario a través del tubo.

Si no hay flujo de aire a través del tubo, los tiempos de transmisión serán los mismos. Si hay flujo de aire, su velocidad le sumará al tiempo de transmisión en un caso y le restará al otro. El valor del flujo de masa de aire G al instante k del muestreo discreto es descrito por la ecuación

$$G_k = C_\beta P_k \Delta t_k$$

C_β es una constante de proporcionalidad que depende de la configuración geométrica del medidor de flujo y se calcula de la relación

$$C_{\beta} = \frac{Sg\alpha_{\beta}}{2L}$$

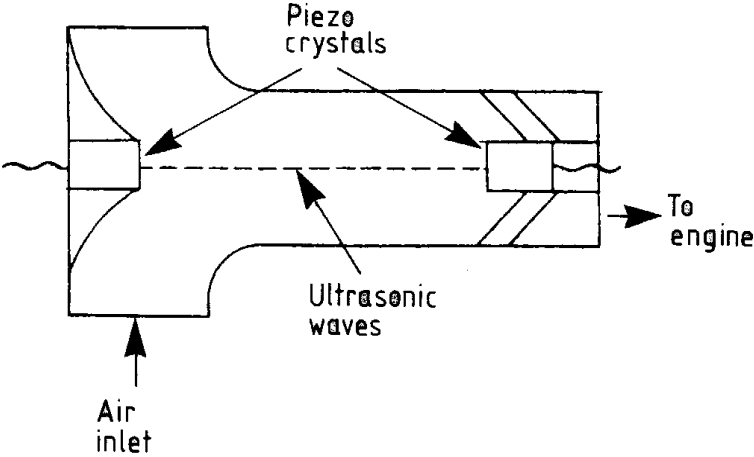
Donde S , es el área de la sección transversal del tubo, g es la aceleración debida a la gravedad, α es la razón del calor específico a presión constante versus el calor específico a volumen constante para el aire (c_p/c_v), L es la distancia entre los transductores ultrasónicos y β es el coeficiente de la forma del tubo que debe ser calculado experimentalmente. P_k es el valor medio de la presión del aire durante el intervalo de medición y Δt_k es el tiempo de retraso calculado de la relación

$$\Delta t_k = \frac{2LW_k}{U^2 - W_k^2}$$

Donde W_k es el valor medio de la velocidad del aire en el intervalo de medición y U es la velocidad del sonido en el aire.

El tubo de medición y el arreglo de la entrada y salida de aire, requiere un diseño cuidadoso para obtener una operación satisfactoria. La operación es posible sobre el rango de temperatura de -40°C a $+105^{\circ}\text{C}$ dado que la temperatura del aire no exhibe cambios rápidos.

Figura 27. Medidor de flujo ultrasónico



Fuente: WESTBROOK M H; TURNER J D. Automotive Sensors. p. 73.

3. MAPEADO DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SENSOR DE MEDICIÓN DE FLUJO DE AIRE

El objetivo principal del presente capítulo, es obtener una representación aproximada de la curva de operación, de un sensor de flujo de masa de aire, de un motor de combustión interna de 4 cilindros y 4 tiempos.

El proceso de admisión, es muy complejo, visto desde un análisis matemático directo, principalmente por la gran cantidad de variables en el sistema, tales como: presión, temperatura, velocidad del pistón, apertura de las válvulas, entre otras. Por tal razón, el modelo que se llevó a cabo se trabajó con casos simplificados con el fin de hacer un análisis racional.

Previo a modelar la señal de salida del sensor, se incluyen algunos aspectos importantes relacionados con el ingreso del aire a los cilindros que serán utilizados para fundamentar el resultado obtenido.

3.1. Flujo de masa de aire

Para el funcionamiento del proceso del motor de 4 tiempos, se requiere como mínimo, una válvula de admisión y una válvula de escape, la forma de las válvulas de admisión y de las de escape es muy parecida, sin embargo, existen diferencias en el material y en el diámetro de los platos de las válvulas.

Por regla general, el diámetro de la válvula de admisión es aproximadamente 1,14 veces superior al diámetro de la válvula de escape, independientemente si se trata de un motor de 2 ó de 4 válvulas.

El motivo por el cual las válvulas de admisión siempre son más grandes que las válvulas de escape, se debe a las diferencias de presión y temperatura que existen en las diferentes válvulas.

Durante la aspiración de gases frescos por medio de la válvula de admisión, más o menos abierta, sólo se crea una diferencia de presión relativamente pequeña, que se genera gracias al pistón que se desplaza rápidamente hacia abajo. Por lo tanto, es importante prestar especial atención a las condiciones de flujo y a las relaciones del tamaño que se dan alrededor de la válvula de admisión, para conseguir que lleguen los gases frescos deseados al interior del cilindro, antes de que se cierre nuevamente la válvula de admisión.

En el caso de la válvula de escape la situación es diferente, cuando está se abre, ya se ha eliminado una parte importante de la presión elevada de combustión y, sin embargo, la diferencia de presión para el flujo de salida siempre sigue siendo muy superior a la de la válvula de admisión.

Si bien la forma de las válvulas de escape y los conductos de escape son importantes, no son tan decisivos para la calidad de un motor como lo son las piezas correspondientes en la parte de aspiración.

3.1.1. Paso de gas en la válvula

El paso de gas por la válvula, depende fundamentalmente, de la superficie del anillo que queda libre durante la apertura de la válvula, esta puede determinarse por medio de una relación geométrica. Sin embargo, las consideraciones puramente geométricas están sujetas, en la práctica, a otras limitaciones. A manera de ejemplo, la superficie que deja libre una de las válvulas, se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$F = \frac{D_1 + D_2}{2} h \times \pi \times h \times \sin \alpha [\text{mm}^2]$$

siendo:

F = la superficie de flujo en mm^2 ;

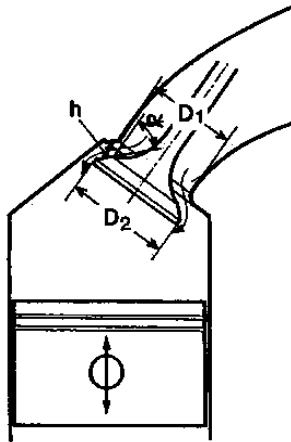
D_1 = el diámetro interno del anillo del asiento de válvula en mm;

D_2 = el diámetro del plato de la válvula en mm;

h = la carrera de la válvula en mm;

α = el ángulo entre asientos de las válvulas del cilindro;

Figura 28. Superficie que queda libre durante la apertura de una válvula



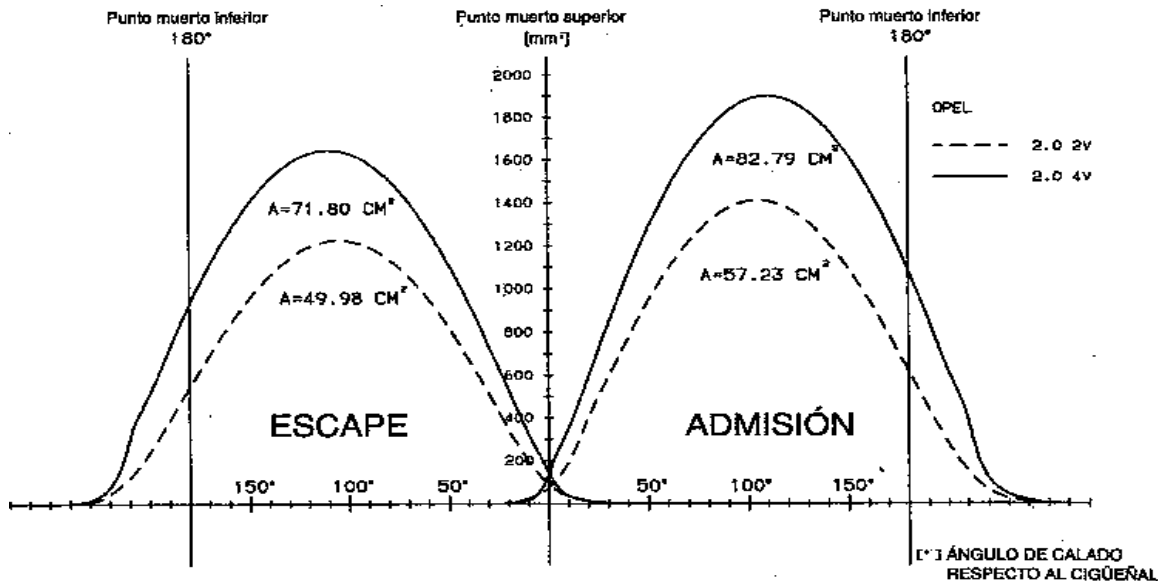
Fuente: HACK, Gert; INDRA, Fritz. Motores multiválvulas. p. 66.

Es evidente que a mayor tamaño de la válvula, mayor es también el flujo que pasa por la misma, también es posible observar que la superficie de flujo en un instante dado, depende del recorrido de apertura de la válvula.

Si las dimensiones geométricas ya se han aprovechado al máximo, también se puede influir sobre el flujo por medio de los ángulos entre los asientos de las válvulas, cuanto más plano sea el ángulo del asiento, más favorable es éste.

Lo que se encuentra a menudo en la práctica, son ángulos entre válvulas de admisión de 60° , así como ángulos entre válvulas de escape de 45° . En la siguiente gráfica se modela la sección transversal de flujo en función de la carrera de apertura de la válvula.

Figura 29. Sección transversal geométrica de paso



Fuente: HACK, Gert; INDRA, Fritz. Motores multiválvulas. p. 68.

Al hacer la comparación de las secciones transversales geométricas de paso, se puede apreciar que los motores de 4 válvulas, son muy superiores a los motores de 2 válvulas. Sin embargo, en la práctica la diferencia no es tan grande, porque las válvulas se influyen entre ellas o porque éstas están parcialmente cubiertas por las paredes de la cámara de combustión.

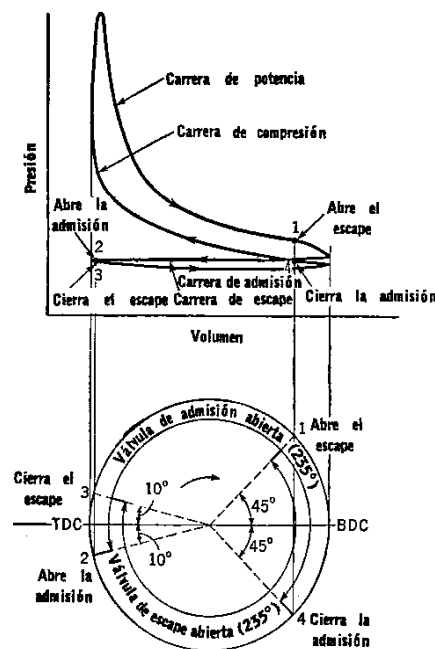
3.1.2. Regulación de las válvulas

La correcta regulación de las válvulas de admisión y escape, y la correcta proporción de la superficie de apertura de cada válvula, permiten que el motor aspire aire eficientemente.

En un ciclo de 4 tiempos, la válvula de admisión principia a abrir antes del punto muerto superior, con el objetivo que la válvula esté suficientemente abierta cerca del comienzo de la carrera de admisión, en forma semejante la válvula de escape abre antes de que termine la carrera de potencia y cierra, después que el proceso de admisión ha comenzado, ambas válvulas abren al final de la carrera de escape, que también es el comienzo de la carrera de admisión y por lo tanto las válvulas quedarán traslapadas.

La relación entre la carrera de apertura y cierre de las válvulas respecto a la ubicación del cigüeñal se modelan mediante diagramas circulares como se ve en la siguiente figura.

Figura 30. Regulación de válvulas para un ciclo de 4 carreras



Fuente: OBERT, Edward F. Motores de combustión interna. p. 550.

3.2. Bosquejo del flujo de masa de aire en un motor de combustión interna de 4 cilindros y 4 tiempos.

Se expresa la masa de aire que un motor puede tomar o atrapar en un cilindro de la forma:

$$M = n \cdot V_D \cdot \rho_i \cdot \eta_V$$

donde:

M = masa de aire atrapado por unidad de tiempo

ρ_i = densidad del aire en la entrada del motor

n = número de carreras de aspiración por unidad de tiempo

Nota: si N son las rpm de un motor de 4 tiempos:

$$n = \frac{N_{4T}}{2 \times 60}$$

V_D = volumen desplazado por el pistón de un cilindro

η_V = eficiencia volumétrica

El valor de ρ_i , depende de dónde sea considerada la entrada del motor. Para un motor de aspiración natural, la entrada es usualmente considerada como el punto donde el aire de la atmósfera, entra en el múltiple de admisión. En este caso, la densidad del aire en la entrada del motor, es igual a la atmosférica, y la eficiencia volumétrica es una medida de la capacidad de bombear aire a través del sistema compuesto por el filtro de aire, carburador (si tiene), múltiple de admisión, cilindros y válvulas.

Si por el contrario, se desea evaluar el comportamiento de bombeo de los cilindros y válvulas solamente, las condiciones de entrada deben ser medidas cerca de las entradas a las válvulas, con tal que la presión en ese punto sea lo suficientemente estable como para tomar como medida un promedio que haga sentido.

En la evaluación de la capacidad de aire de un motor, es conveniente definir una capacidad ideal como base de comparación. La capacidad de aire ideal es aquella correspondiente al llenado total del volumen desplazado, en las condiciones de entrada. Para un motor de 4 tiempos es:

$$M_{IDEAL} = \frac{N}{2} \cdot V_D \cdot \rho_i$$

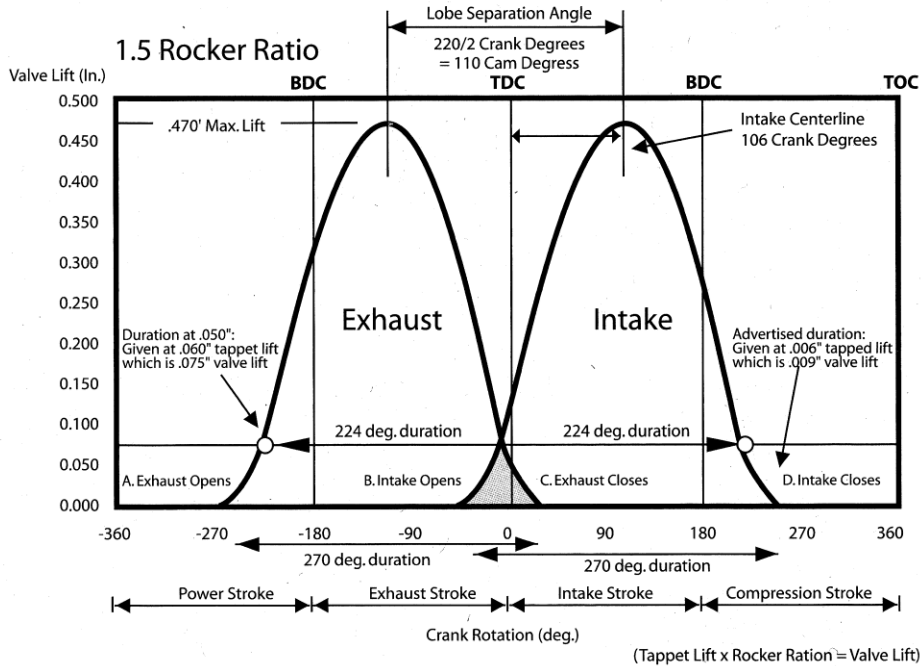
Para comenzar a hacer el bosquejo de la señal de un medidor de flujo de masa de aire; primero se debe conocer el proceso de admisión el cual se define como el evento que ocurre entre la apertura de la válvula de admisión y el cierre de la misma.

No existe un criterio universal para definir el evento de apertura o cierre de válvulas, la Sociedad de Ingenieros Automotrices, SAE, define estos eventos cuando la válvula está a 0,15 mm de su posición de reposo. Sin embargo, lo que verdaderamente importa, es cuándo comienza o cesa un flujo significativo a través de las válvulas (el flujo de gases en el sistema de admisión se debe principalmente al movimiento de los pistones).

La apertura de la válvula de admisión, ocurre típicamente entre 10° y 25° antes del punto muerto superior. El flujo de aire es prácticamente insensible a este tiempo, debe ocurrir suficientemente antes del P.M.S. para que en ese punto esté completamente abierta, permite además una apertura suave de la válvula, como contrapartida, aumenta el traslape de válvulas causando un contraflujo de los gases de escape.

El rendimiento volumétrico aumenta a medida que avanza la apertura de la válvula de admisión, hasta llegar a un máximo donde comienza a descender por el reflujo. El cierre de la válvula ocurre siempre después del punto muerto inferior (40° - 60°).

Figura 31. Traslape de las válvulas de admisión y escape



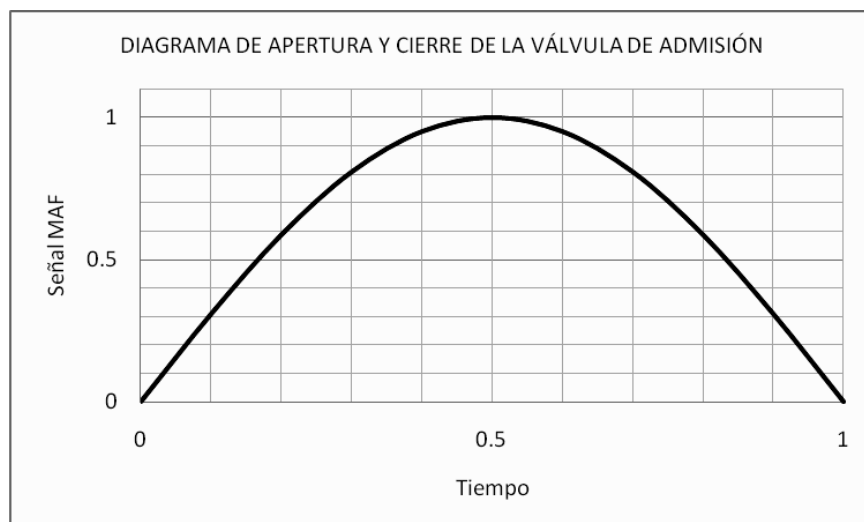
Fuente: PRIMEDIA Specialty Group. Chevy High Performance. mayo 2005. p. 48.

La imagen anterior, ilustra la apertura de la válvula en pulgadas, en el eje vertical (eje y) y los grados de duración a través del eje horizontal (eje x). El área triangular sombreada es el área de traslape, es donde la válvula de escape comienza su cierre y la válvula de admisión empieza a abrir.

En base al diagrama de apertura y cierre de válvulas de la figura 31, se comenzará a modelar la señal eléctrica del sensor de flujo de masa de aire. La construcción del modelo se hará con valores normalizados tanto en el tiempo como en la señal eléctrica del sensor.

Como primer paso, sólo se tomará en consideración el aporte de un cilindro al flujo de masa de aire que pasa a través del sensor. Dado que el recorrido de la válvula de admisión (en el tiempo) describe una parábola y que la cantidad de aire que ingresa al cilindro está limitada por la apertura de la válvula, es posible representar la señal eléctrica del sensor como una parábola en el tiempo.

Figura 32. **Representación del flujo de masa de aire durante la apertura y cierre de una válvula de admisión**

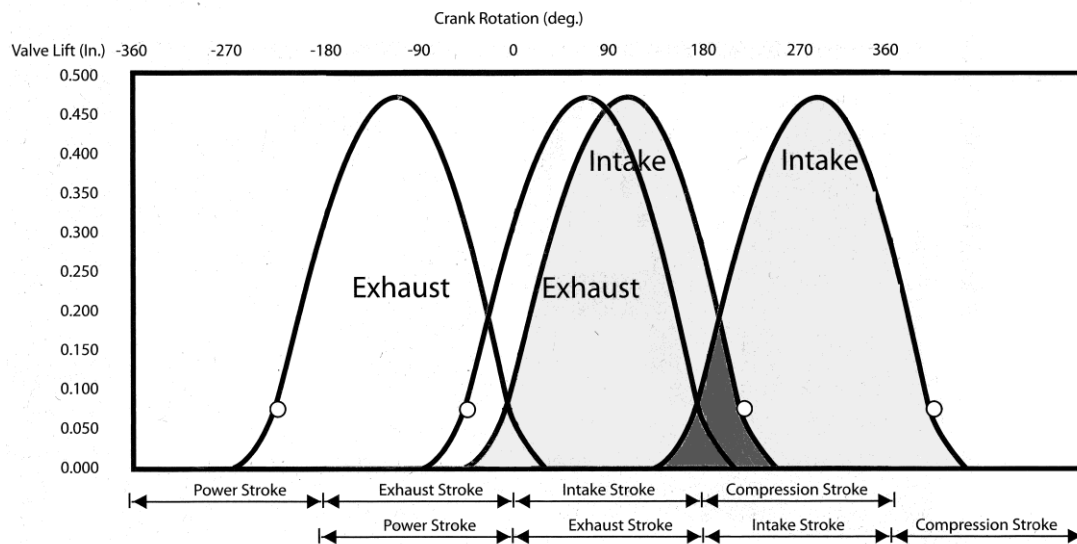


Fuente: elaboración propia.

De la misma forma que hay un traslape entre las válvulas de admisión y escape, existe un traslape entre las válvulas de admisión de los otros cilindros, es posible obtener una representación gráfica, para ello basta con duplicar la gráfica de la figura 31 y sobreponer el ciclo de admisión y el ciclo escape de dos cilindros diferentes.

El resultado se puede observar en la siguiente ilustración, a simple vista se puede determinar que el traslape de las válvulas de admisión, es mayor al traslape de las válvulas de admisión y escape.

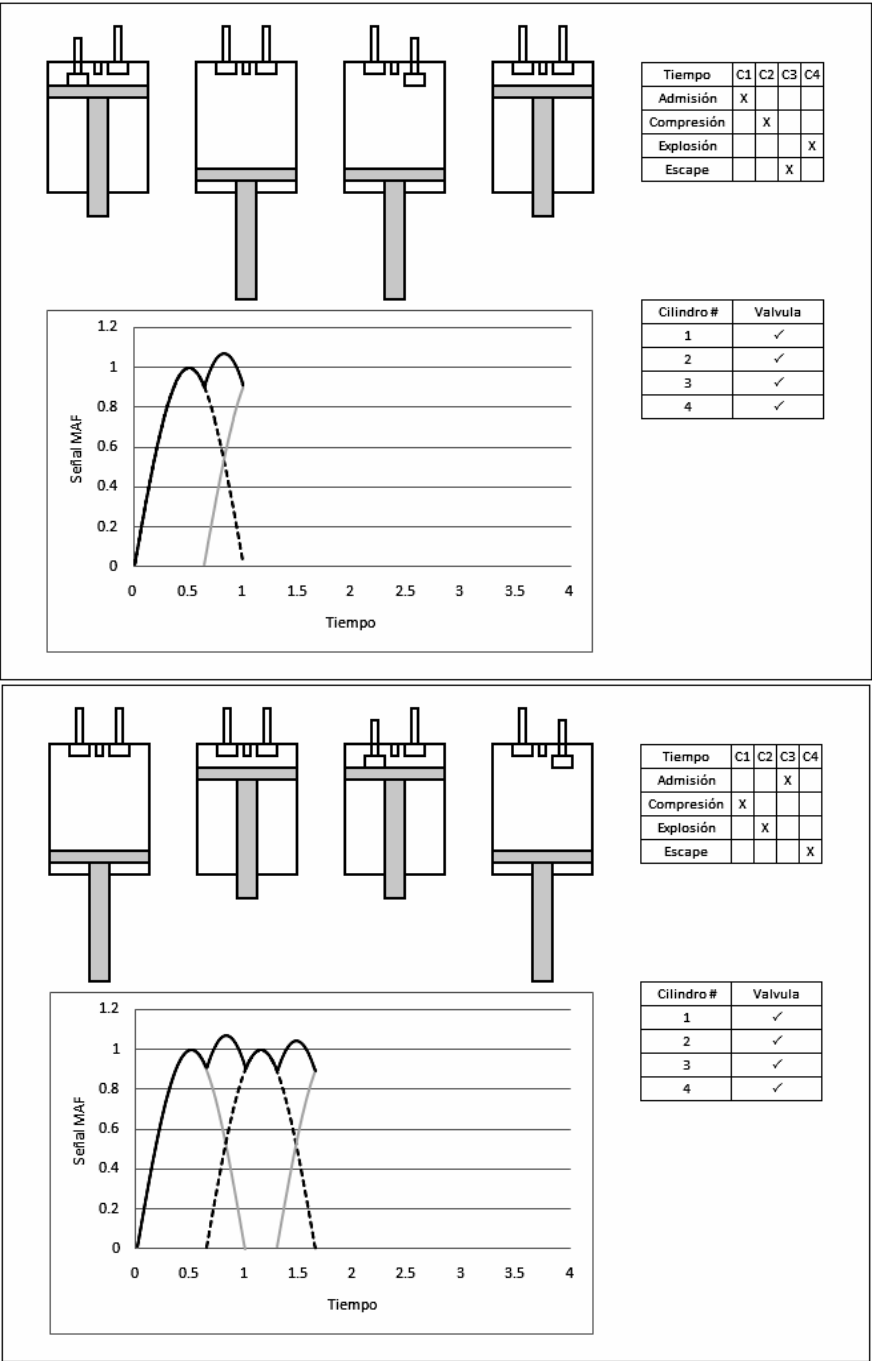
Figura 33. **Traslape de válvulas de admisión**



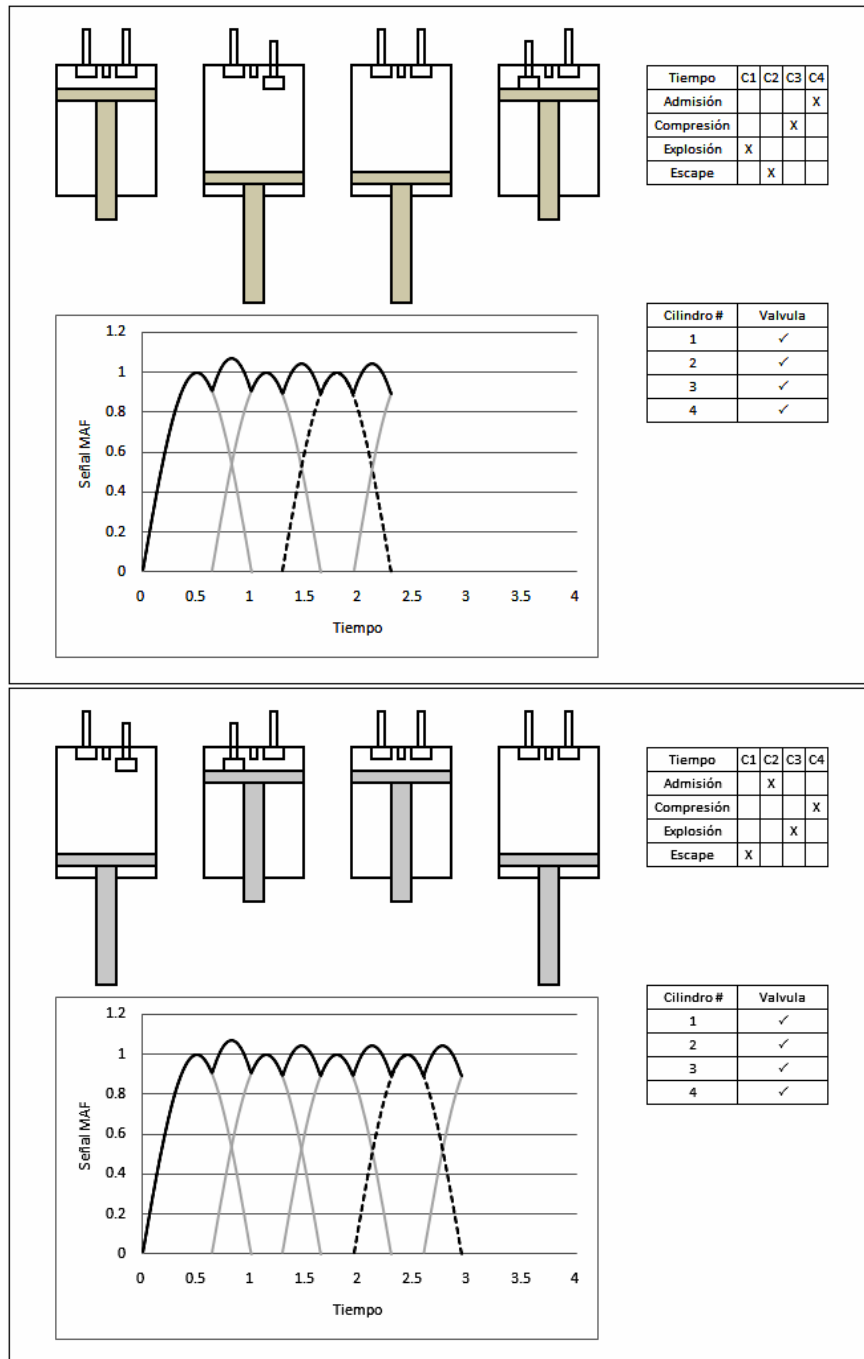
Fuente: elaboración propia.

Dicho traslape tiene un efecto en la forma de la señal eléctrica del sensor, en la siguiente figura, se puede observar cómo se va formando la señal, conforme avanza el tiempo, así como la contribución de cada uno de los cilindros. Finalmente, en la figura 35, se obtiene un bosquejo del flujo de masa de aire en un motor de combustión interna de 4 cilindros y 4 tiempos.

Figura 34. Componentes de la señal de un medidor de flujo de masa de aire

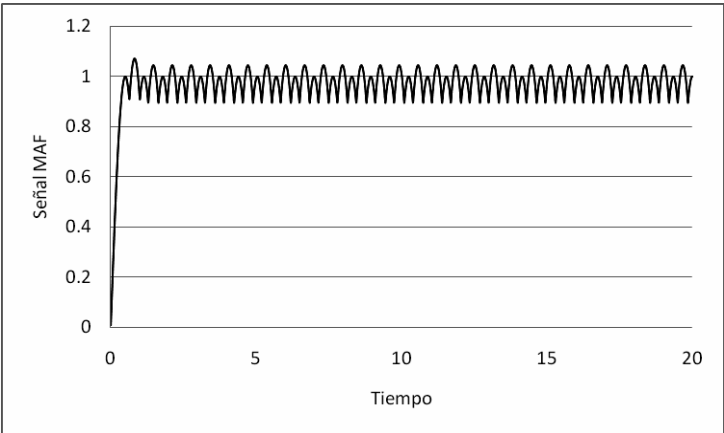
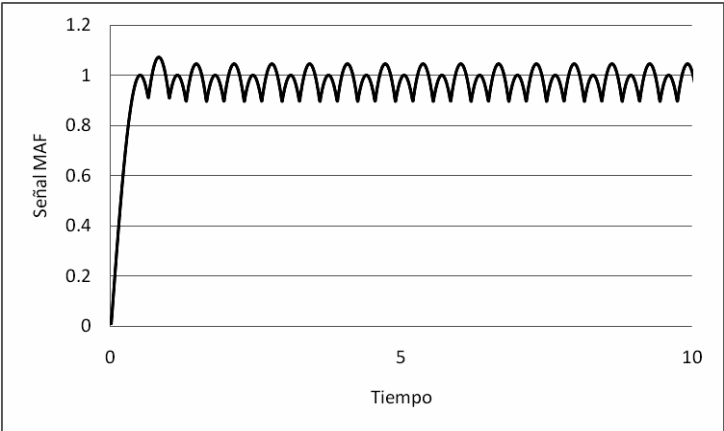
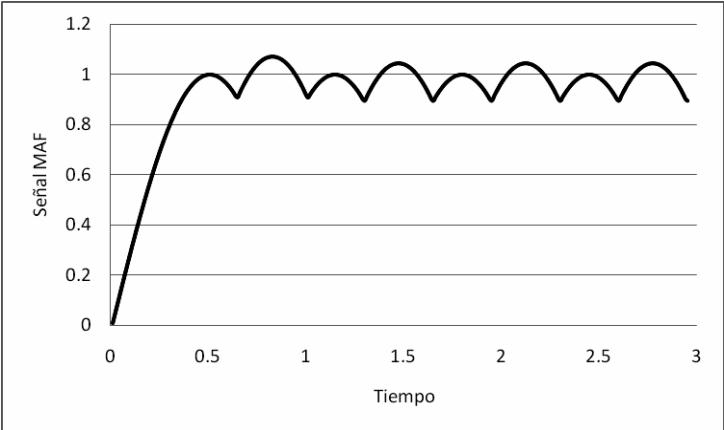


Continuación Figura 34...



Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Bosquejo de la señal de un medidor de flujo de masa de aire**



Fuente: elaboración propia.

Para construir el modelo matemático que describe la señal de la figura 35, se definió la siguiente función como punto de partida:

$$f(t) = \begin{cases} |\text{sen}(\omega\pi t)| & 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & t > 1 \end{cases}$$

La velocidad angular de la señal senoidal, ω , está relacionada con las revoluciones por minuto (rpm) del motor. Con el objetivo de simplificar y normalizar el modelo, $\omega=1$. La función que describe la contribución del primer cilindro tiene como base la función $f(t)$ y está definida de la siguiente forma:

$$g_1(t) = \sum_{n=0}^{\infty} f(t - 4\varphi n)$$

El valor de φ en la función anterior, representa el porcentaje del traslape que existe entre las válvulas de admisión de los otros cilindros. La contribución de los tres cilindros restantes están definidas por las funciones $g_2(t)$, $g_3(t)$ y $g_4(t)$:

$$g_2(t) = g_1(t - \varphi)$$

$$g_3(t) = g_2(t - \varphi)$$

$$g_4(t) = g_3(t - \varphi)$$

Finalmente, la función que modela la señal del flujo de masa de aire está definida de la siguiente forma:

$$h(t) = Ag_1(t) + Bg_2(t) + Cg_3(t) + Dg_4(t)$$

Donde A, B, C y D; son las amplitudes que corresponden a la contribución de cada uno de los cuatro cilindros del motor. En el bosquejo de la figura 35, estos valores son unitarios.

Tanto el bosquejo de la señal del sensor, como el modelo matemático desarrollado serán de gran utilidad en el próximo capítulo, donde se hará un análisis de algunas de las posibles fallas que se pueden presentar en el sistema de admisión de aire de un vehículo y para determinar de qué forma se pueden detectar a través de dicha señal.

4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN MCI BASADO EN UN MEDIDOR DE FLUJO DE AIRE

En el presente capítulo, se encuentra una descripción de las distintas pruebas que se hicieron para encontrar en la señal eléctrica de un sensor de flujo de masa de aire de un patrón que refleje cambios en la señal producidos durante los tiempos de admisión y escape de un motor de combustión interna a gasolina de 4 tiempos. La razón por la que se busca este patrón es para poder asociar dicha señal con los cambios que pueda provocar alguna falla en el motor, por ejemplo, un cilindro desgastado, una válvula de admisión dañada, filtro de aire obstruido, etc.

Durante las pruebas que se hicieron en el laboratorio, en un motor ECH, no fue posible detectar dicho patrón; debido a limitaciones en el nivel de la señal de los sensores utilizados, principalmente con el tiempo de respuesta a los cambios en el flujo de masa de aire.

Dado que no fue posible detectar el patrón durante las pruebas, siendo estas parte de la hipótesis, se desarrolló un modelo matemático simplificado que describe la señal del medidor de flujo de masa de aire. Posteriormente se hizo un estudio de las fallas que posiblemente pueden ser detectadas a través de la señal del sensor y se hizo un bosquejo de los cambios que sufriría la señal al presentarse estas fallas. Finalmente, se propone el diseño de un sistema electrónico que utiliza la señal de dicho sensor para detectar fallas en un motor de combustión interna ECH de 4 tiempos.

4.1. Desarrollo experimental

El primer paso en la búsqueda de un patrón en la señal eléctrica de un medidor de flujo de masa de aire es construir un instrumento capaz de captar los cambios en el flujo de masa de aire con la suficiente precisión y rapidez. Para ello se ha probado con dos diferentes tipos de medidores, el de hilo-caliente y el medidor de vórtices.

Es importante mencionar que los medidores utilizados en los vehículos están diseñados para proporcionar información a la computadora, por lo que la señal de salida ha sido acondicionada para cumplir con dicho propósito. Este hecho limita el uso que se le puede dar a estos medidores para detectar una señal periódica que refleje los cambios en el flujo de aire cuando el motor gira a velocidad constante.

Otro punto que vale la pena destacar es que el patrón se debe poder observar cuando el motor gira a velocidad constante y que al reducir o aumentar la velocidad del motor únicamente debe variar la amplitud y la frecuencia de la señal.

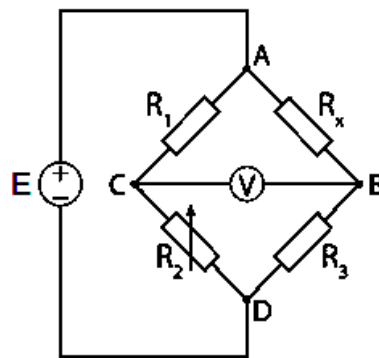
4.1.1. Elaboración de un medidor de hilo-caliente

Un medidor de hilo-caliente trabaja en función de una resistencia sensible a la temperatura. En base a este principio se diseñó y construyó un medidor utilizando un puente de *Wheatstone* y un amplificador de instrumentación.

Un puente de *Wheatstone* es un circuito eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas. Están formados por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida.

La figura 36, muestra la disposición del circuito. R_x es la resistencia cuyo valor se quiere determinar, R_1 , R_2 y R_3 son resistencias de valores conocidos, además la resistencia R_2 es ajustable. El valor de la fuente de voltaje (E) es indiferente y no afecta la medida.

Figura 36. Disposición del puente de Wheatstone



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Wheatstone. julio 2010.

Si la relación de las dos resistencias conocidas R_1/R_2 es igual a la relación de R_x/R_3 , el voltaje entre los dos puntos medios, será nulo y por tanto no circulará corriente entre esos dos puntos C y B, en tal condición de equilibrio se cumple que:

$$R_x = \frac{R_1 \times R_3}{R_2}$$

En caso de desequilibrio, se puede calcular la diferencia de potencial entre los puntos C y B (V_{BC}) por medio de la siguiente fórmula:

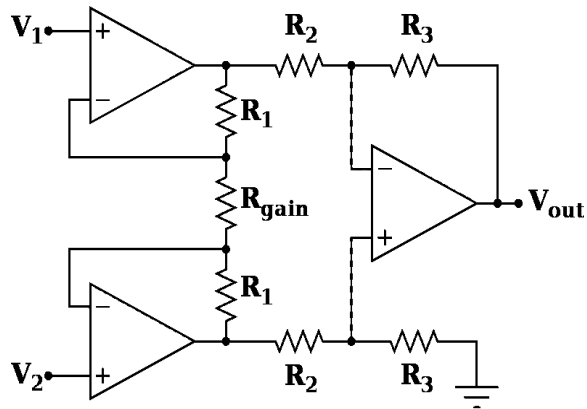
$$V_{BC} = E \left[\frac{R_3}{R_x + R_3} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right]$$

A partir de estas propiedades, se desarrolló un circuito que varía su señal de salida en función de la temperatura, para ello se sustituyó la resistencia R_x por un termistor. Un termistor es un sensor resistivo de temperatura, existen dos tipos de termistor; los que al aumentar la temperatura disminuye su resistencia y los que al aumentar la temperatura aumenta también su resistencia. Se les conoce como termistor con coeficiente de temperatura negativo y coeficiente de temperatura positivo respectivamente.

Durante los ensayos se utilizaron tres termistores con coeficiente de temperatura negativo de diversos valores, uno de ellos se obtuvo de un medidor de hilo-caliente que utilizaba un vehículo y los dos restantes son termistores de aplicaciones múltiples.

Debido a que la señal de salida del puente es muy débil (cercana al punto de equilibrio), se colocó un amplificador de instrumentación para minimizar el error de medida. Un amplificador de instrumentación, es un dispositivo que resta sus dos entradas y las multiplica por un factor determinado. En la figura 37, se muestra la estructura del amplificador.

Figura 37. Esquema de un amplificador de instrumentación



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_de_instrumentaci3n. julio 2010.

La ganancia de un amplificador de instrumentación es:

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R_1}{R_g} \right) \frac{R_3}{R_2}$$

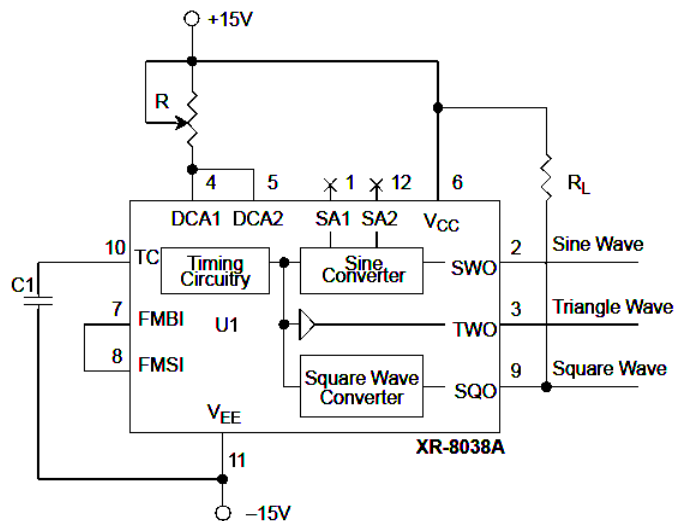
En donde $(V_2 - V_1)$ es equivalente a V_{BC} , la señal de salida del puente.

Para poder medir el flujo de aire que ingresa en un motor, se utilizó la carcasa de un medidor de hilo-caliente, de un vehículo y se instaló el termistor acoplado al puente de *Wheatstone* y al amplificador de instrumentación. Los resultados de las pruebas mostraron que la señal varía conforme aumenta o disminuye el flujo de aire al motor, sin embargo no es tan sensible como un medidor común, por lo que no es posible medir los pequeños cambios en el flujo de aire utilizando este medidor.

4.1.2. Elaboración de un medidor de vórtices

Otro de los métodos que se utiliza para medir un flujo de masa aire, es por medio de sensores ultrasónicos que miden los cambios en la densidad del aire, provocados por el paso de vórtices. Para construir un medidor de vórtices se necesita un transmisor y un receptor de señales ultrasónicas y un generador de señales de alta frecuencia. Los transductores ultrasónicos utilizados en el desarrollo de este instrumento, trabajan a 40 kHz. Para generar dicha señal se utilizó el circuito integrado XR-8038A en la siguiente configuración.

Figura 38. Diagrama de un generador de funciones



Fuente: http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/151/285029_DS.pdf. julio 2010.

En la configuración mostrada, la frecuencia de oscilación está dada por:

$$f = \frac{0.15}{RC}$$

A la salida del generador de señales (onda senoidal), se ha conectado el transmisor ultrasónico. Tanto el transmisor como el receptor, se han insertado dentro de un tubo PVC, con un diámetro similar a la tubería del sistema de admisión de un vehículo. También se insertó un objeto no aerodinámico para cumplir con la función de generador de vórtices de Karman. A la salida del receptor ultrasónico se ha conectado un circuito para amplificar la amplitud de la señal.

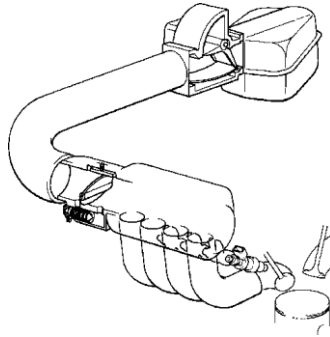
El objetivo, es detectar los cambios en el flujo de masa de aire, a través del conducto por medio de ultrasonidos cuya intensidad se ve atenuada en proporción a la velocidad del aire y a la frecuencia de los torbellinos generados.

Durante las pruebas no fue posible observar ninguna diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida, es decir; la señal de salida no presento ningún cambio en proporción al flujo de aire a través del conducto. Ambas señales se midieron de forma simultánea con un osciloscopio de 5 MHz y 2 canales.

4.2. Detección de fallas en el sistema de admisión de aire, por medio de la señal de un medidor de flujo de masa de aire

El objetivo de la presente sección, es hacer un breve estudio de los principales problemas que se pueden presentar en los diferentes elementos que conforman el sistema de admisión de aire de un vehículo y determinar de qué forma se pueden ver reflejados en la señal eléctrica del medidor de flujo de aire.

Figura 39. **Componentes del sistema de admisión**



Fuente: <http://www.autoshop101.com/forms/h21.pdf>. octubre 2010.

El primer elemento en el sistema de admisión, es el filtro de aire, su propósito es evitar que partículas abrasivas ingresen en los cilindros del motor y causen un desgaste mecánico y la contaminación del aceite del motor, además de dejar pasar bastante aire para obtener una combustión completa y eficiente.

Por lo regular el sistema de filtración está sobredimensionado para poder funcionar correctamente, hasta el punto que la resistencia (combinación de codos, diámetro de tubos, mangueras, juntas y contaminación del filtro) llega a tal nivel que afecta la habilidad del motor de aspirar aire.

Una manera de saber el punto correcto para el cambio de filtro es colocar un medidor de restricciones, el medidor de restricciones, es un sensor que se instala entre el filtro y el carburador o múltiple de admisión, indica el momento correcto para reemplazar el filtro, es decir; cuando le falte aire al motor, estos sensores se utilizan mucho en camiones y vehículos 4x4, aunque pueden ser instalados en todo tipo de vehículos.

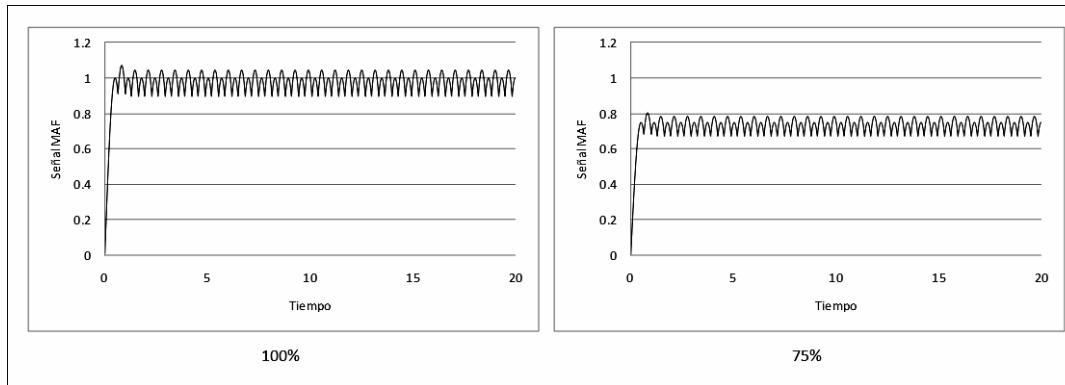
Si no se tiene un medidor, es prácticamente imposible determinar el momento preciso de cambiar el filtro; ya que a simple vista un filtro puede presentar una apariencia de no estar obstruido y presentar demasiada restricción en el flujo de aire, además cada vez que se abre el cobertor del filtro para observarlo o “limpiarlo”, se corre el riesgo de dañarlo o dejar suelta alguna manguera o sensor.

Probablemente solo se puedan detectar problemas muy serios o evidentes a través de una inspección, otra forma de determinar el momento del cambio es seguir las indicaciones del manual del automóvil donde recomiendan cambiar el filtro cada cierta cantidad de kilómetros o millas recorridas, este dato es un estimado de la distancia que se puede recorrer en condiciones normales, en condiciones extremas, etc. Sin embargo, el momento exacto del cambio depende del ambiente en que se circule y de la condición del motor.

Por lo tanto, si no se conoce el momento justo para hacer el cambio, el auto, puede estar trabajando con el filtro restringido lo cual reduce la potencia del motor y aumenta el consumo de combustible y si se cambia el filtro muy temprano se gasta dinero y se reduce la eficiencia del filtro.

Por medio de la señal del sensor de flujo de aire, es posible observar en que porcentaje se ha reducido el ingreso del flujo de aire al motor al compararlo con el nivel óptimo de operación. En la gráfica 40, es posible observar que el ingreso de aire al motor se ha reducido en un 25% respecto a su estado óptimo, esto puede ser un efecto de un filtro contaminado.

Figura 40. **Efecto de un filtro contaminado en el flujo de masa de aire**



Fuente: elaboración propia.

Con esta información, es posible definir un límite que indique que ha llegado el momento de cambiar el filtro de aire.

Normalmente, después del filtro de aire se ubica el sensor de flujo de masa de aire. La información que provee este dispositivo es utilizada por la computadora del vehículo para calcular la cantidad de combustible que necesita suministrar para mantener la correcta proporción aire-combustible (14,7:1, combustión estequiométrica). La señal de salida del sensor varía de 0 a 5V (CD), el valor generado depende de la cantidad de flujo de aire entrando al motor. Si se utiliza un escáner el valor es mostrado como libras por minuto.

Existen diversos síntomas que se pueden presentar en un vehículo, cuando este sensor falla, entre los más comunes se tienen; ahogo del motor por exceso de combustible, mayor consumo de combustible, falta de potencia, humo negro, explosiones en el motor, respuesta lenta al acelerar, etc.

Para determinar si el sensor es el motivo de la falla, éste se puede probar utilizando un voltímetro, aunque es mejor utilizar un osciloscopio debido a que tiene una mejor respuesta a los cambios de la señal. Existen sensores de 4 ó 5 terminales que suelen tener el sensor de la temperatura del aire combinado en una sola unidad. También hay sensores que sólo tienen tres terminales, más sencillos de probar, donde un terminal será el cable de tierra, uno tendrá una señal de 5 V y el tercero tendrá la señal que varía de amplitud según la velocidad del motor, entre 0,6 V a ralentí y alrededor de 4,5 V con la mariposa totalmente abierta.

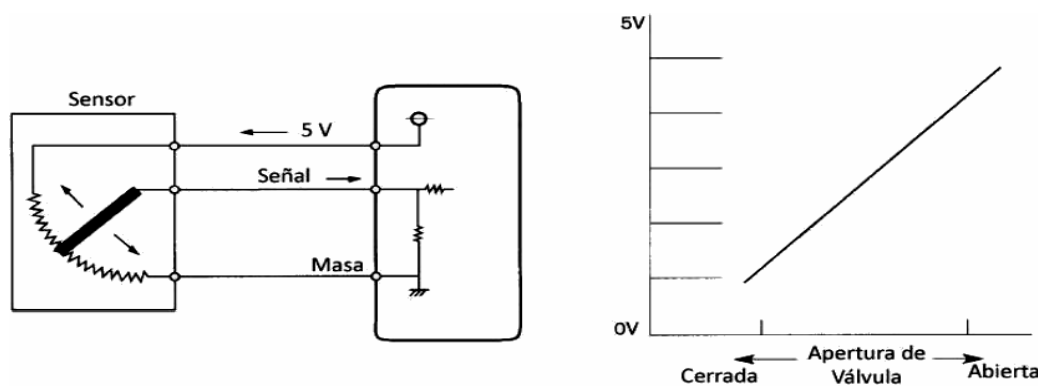
Una vez se ha identificado este último cable, al aumentar o disminuir las revoluciones del motor, si la señal aumenta a medida que incrementa la velocidad del motor y disminuye de igual manera al reducir la velocidad, el sensor cumple su función. Si la señal no cambia o si la respuesta a los cambios de velocidad es muy lenta es muy probable que el sensor no se encuentre trabajando correctamente.

Luego del sensor de flujo de masa de aire, se encuentra la mariposa del colector de admisión, que es el mecanismo que ajusta la cantidad de aire que entra al motor. Puede haber una para todos los cilindros o una para cada cilindro; es una pieza redonda y plana con un eje central sobre el que gira. Cuando está cerrada obstruye el paso de aire, para abrirse gira sobre el eje; cuando está completamente abierta, queda de perfil y prácticamente no opone resistencia al paso de aire.

La válvula está conectada al pedal del acelerador mediante un cable, o bien tiene un motor eléctrico que la abre o cierra según las ordenes de la computadora del vehículo.

Situado sobre la mariposa, hay un sensor conocido como TPS por sus siglas en inglés *Throttle Position Sensor*, su función radica en registrar la posición de la mariposa y enviar la información a la computadora. El sensor consiste en una resistencia variable lineal alimentada con 5 V. A medida que la mariposa se desplaza, el valor de la resistencia, cambia y la señal de voltaje de salida varía proporcionalmente al desplazamiento. En la figura 41, se puede observar el circuito del sensor TPS y su respectiva señal eléctrica.

Figura 41. **Señal del sensor de posición de mariposa, TPS**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf3/curso-sensores-tps/curso-sensores-tps.pdf>.
octubre 2010.

En ralentí, el voltaje de la señal del sensor es entre 0,6 V – 0,9 V. En aceleración, la señal de voltaje es aproximadamente 3,5 V – 4,7 V.

Para detectar fallas en este mecanismo, existen dos pruebas sencillas que se pueden hacer, una de ellas consiste en medir con un voltímetro el voltaje cuando no se ejerce ninguna acción sobre la mariposa y cuando la mariposa está abierta al máximo, es decir, el voltaje mínimo y máximo respectivamente.

También se puede hacer un barrido de la señal, con un voltímetro de aguja o con un osciloscopio, debiéndose comprobar que el voltaje se mantenga uniforme y sin ningún tipo de interrupción durante su ascenso. Dicha señal se debería reflejar de igual forma en el sensor de flujo de masa de aire.

Un problema común causado por un TPS en mal estado, es la pérdida de control a baja velocidad, quedando el motor acelerado o regulado en un régimen incorrecto. La causa suele ser una modificación en el valor de la resistencia del TPS, debida al efecto del calor producido por el motor, provocando cambios violentos en el voltaje mínimo. Esta es una de las fallas más comunes y se puede detectar mediante el chequeo del barrido de la señal del TPS.

Una vez que el aire ingresa al motor regulado en caudal por la mariposa, es guiado al interior de cada cilindro por conductos que, reunidos en una sola pieza, reciben el nombre de múltiple o colector de admisión. Su función principal es distribuir la mezcla aire-combustible en forma equitativa a cada cilindro. Un problema que se puede presentar en el múltiple de admisión es que se dañen los empaques, lo que ocasionaría el ingreso de aire adicional no medido en el sistema de admisión. El aire que ingresa al múltiple de admisión sin ser medido puede resultar en una mezcla extremadamente pobre de aire-combustible.

Además de las fugas en el múltiple de admisión, es posible que ingrese aire adicional al sistema, sin ser medido a través de la tubería posterior al medidor de flujo de masa de aire.

Posteriormente, el aire que ingresa al múltiple de admisión es guiado a cada uno de los cilindros del motor, donde las válvulas de admisión controlan la entrada de los gases a los cilindros durante el tiempo de admisión y cierran herméticamente los conductos de acceso durante los tiempos de compresión, explosión y escape. Debido al trabajo que llevan a cabo, las válvulas están sometidas a grandes cargas mecánicas y termodinámicas que combinadas con otros factores pueden ocasionar que estas fallen.

Las fallas de válvulas se pueden clasificar en dos categorías principales: quemaduras y roturas, siendo esta última la más común de todas. En la tabla I, se detallan las fallas más comunes en el trabajo de una válvula.

Tabla I. **Análisis de fallas de válvulas**

Tipo de falla	Causa	Factores
Quemaduras	Excesivo calor	Sobrecarga del motor
		Mezcla pobre
		Pre ignición
		Combustible inadecuado
		Asentamiento defectuoso
		Válvula rectificada con exceso de material removido
		Desgaste excesivo
		Circulación restringida de refrigerante
		Relación de compresión inadecuada
		Holgura insuficiente
Picado de asiento	Partículas sólidas atrapadas en la zona de contacto de los asientos	Consumo excesivo de aceite
		Combustión incorrecta
		Largo período en ralentí
		Termostato defectuoso
Corrosión	Acción mecánica de los gases en movimiento (erosión) sumada a su carácter corrosivo a altas temperaturas	Colocar válvulas inadecuadas
		Excesiva sobrecarga (recalentamiento)
		Combustible incorrecto
		Mezcla incorrecta
Deformación	Excesiva fuerza de cierre con los efectos combinados de elevadas temperaturas de operación y presiones de combustión	Sobrecarga
		Encendido prematuro
		Detonación
		Presión excesiva de los resortes
		Relación de compresión inadecuada
		Mezcla pobre de combustible
		Muy diferente ángulo de asientos
Retención o pegado	Elevada temperatura por rozamiento severo	Falta de alineación vástago-guía-asiento de la tapa
		Sellos de aceite incorrectos
		Vástago de válvula doblado
		Motor sobrecargado (marcha lenta)
		Lubricación deficiente
Desgaste	Desgaste con pérdida de material	Uso de combustible con bajo porcentaje de plomo
		Resortes de válvulas débiles
		Asientos de tapa de cilindros y guías, desalineados
		Resortes de válvulas con mucha tensión
		Lubricación deficiente
		Sellos de aceite incorrectos
		Excesivo juego del levanta válvula

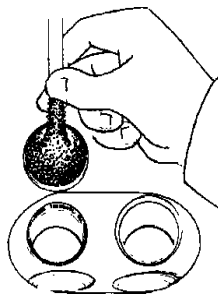
Continuación Tabla I...

Tipo de falla	Causa	Factores
Roturas	Fatiga	Sobre velocidad
		Juego excesivo entre el vástago y la guía
		Resortes débiles o rotos, presión excesiva del resorte
	Impacto	Resorte con excesiva presión
		Excesivo juego en el tren de balancines y válvulas
		Choque de pistón con válvula

Fuente: elaboración propia.

Otro problema que se puede manifestar, es el depósito de carbono endurecido en la parte de atrás de las válvulas de admisión, como se puede apreciar en la figura 42. La severidad puede variar dependiendo del motor, la calidad de la gasolina y los hábitos de conducción.

Figura 42. **Depósitos de carbono en las válvulas de admisión**



Fuente: <http://www.autoshop101.com/forms/h21.pdf>. octubre 2010.

Los depósitos de carbono en las válvulas de admisión, presentan un doble problema; primero, los depósitos restringen el flujo de aire y la mezcla de combustible al interior del cilindro, reduciendo la eficiencia volumétrica y afectando potencialmente el desempeño del motor a altas revoluciones. Adicionalmente, estos depósitos de carbono actúan como esponjas absorbiendo el vapor de combustible. Esto puede causar problemas durante la operación en frío del motor.

La mejor forma de identificar esta condición, es por síntomas y luego por medio de una inspección visual. La inspección visual utilizando un boroscopio para confirmar el problema, el motor se puede hacer girar de forma manual hasta que la válvula de admisión este completamente abierta, luego el boroscopio se puede insertar a través del agujero de una bujía para hacer la inspección, también se puede retirar la culata o el múltiple de admisión para confirmar la existencia y el grado de severidad de esta condición.

Como se puede observar, las causas que pueden hacer fallar a una válvula, son numerosas. Aquí se han detallado las más comunes, pero es posible que haya otras más.

Por último, en el sistema de admisión de aire, se encuentran los pistones y los cilindros. El pistón tiene la forma de un vaso cilíndrico invertido que se desplaza con movimiento alternativo en el interior del cilindro del motor, entre la pared del cilindro y el pistón se debe mantener una perfecta hermeticidad para evitar la fuga de gases.

No es una buena práctica ajustar demasiado el pistón al cilindro para evitar fugas, por consiguiente se utilizan anillos de pistón para obtener la hermeticidad, estos anillos se instalan en las ranuras laterales que lleva el pistón.

Hay 2 tipos de anillos: de compresión y de control de aceite o engrase. Los primeros confinan herméticamente la mezcla aire-combustible mientras se va comprimiendo, manteniendo también las presiones de combustión cuando se quema la mezcla. Los anillos de control de aceite, rascan las cantidades excesivas de aceite en las paredes del cilindro y lo devuelven al cárter de aceite.

En los anillos de compresión, se utilizan diferentes revestimientos para facilitar un eficaz rodaje y evitar el rápido desgaste, cuando los anillos son nuevos no ajustan perfectamente con la pared del cilindro, pero al cabo de un tiempo, debido a su ligero desgaste se obtiene un ajuste mucho más perfecto.

Otro factor que se debe tomar en cuenta al seleccionar los revestimientos de los anillos de compresión, es el tipo de desgaste a que éstos estarán sometidos en servicio. Hubo un tiempo en que la clase más común de desgaste del anillo y de la pared del cilindro era debida a las sustancias abrasivas que se introducen a través del filtro de aire y de la gasolina.

Estos abrasivos, finas partículas de polvo, se depositaban en las paredes del cilindro siendo causa de su desgaste y del desgaste de los anillos, para combatir el problema del desgaste se utilizan anillos de compresión revestidos de cromo. Éste es un metal muy duro y a los anillos revestidos con él se les da un acabado que presenta una superficie muy lisa por lo que los anillos producen muy poco desgaste en la pared del cilindro.

Hoy día, el desgaste abrasivo, es menos importante a causa que los sistemas de filtrado de aire, se han mejorado considerablemente. Sin embargo, ha aparecido un nuevo tipo de desgaste.

En los motores modernos, las paredes de los cilindros, anillos y pistones funcionan a temperaturas muy altas, estas altas temperaturas aumentan la posibilidad de que las superficies metálicas en frotamiento alcancen el punto de fusión en algunos puntos. Esto quiere decir, que se pueden desarrollar puntos calientes en que los metales alcancen temperaturas tan altas que se fundan por un momento.

Entonces se producen soldaduras en pequeñas superficies, estas soldaduras son breves y es más probable que solamente se produzcan cuando el pistón está brevemente en reposo en el punto muerto superior. El movimiento del pistón y de los anillos rompe las soldaduras dejando superficies ásperas. Los anillos, los pistones y las paredes del cilindro quedan rayados por lo que existe la posibilidad de que pronto pueda ocurrir una avería.

A medida que se desgastan las paredes de los cilindros, el motor pierde potencia y se va quedando aceite en las cámaras de combustión. Llega un momento en que es tanta la potencia perdida por el motor y tanto el aceite quemado, que se necesita su reparación. Cuando el motor esta desmontado, lo primero que hay que decidir es si el cilindro está en mal estado que debe ser rectificado o esmerilado, o si puede ser suficiente la renovación de los anillos. En el caso de que el desgaste no es muy grande, usualmente se puede reparar instalando un juego de anillos especiales.

Como ya se ha visto, no es fácil identificar las condiciones que pueden causar una falla en el sistema de admisión, por tal razón es importante explorar todas las posibilidades, obtener el máximo de información sobre los eventos que produjeron las fallas antes de hacer un diagnóstico. En algunos casos el procedimiento para revisar los diferentes elementos que conforman el sistema de admisión es sencillo y no requiere de muchos recursos, sin embargo, en otros casos aumenta la complejidad y surge la necesidad de desmontar piezas para poder hacer una inspección que permita buscar fallas en elementos tales como válvulas o pistones.

De ahí la mayor utilidad de un dispositivo que permita identificar que válvula y/o cilindro está operando incorrectamente sin necesidad de revisarlos físicamente.

Comúnmente, para saber si un motor está trabajando de forma correcta, se hace una prueba de compresión. En una prueba de compresión se mide la presión alcanzada por la mezcla de gases en la cámara de combustión, antes de su encendido. Esta revisión provee buena información sobre el estado de desgaste del motor.

La prueba de compresión se puede hacer utilizando un manómetro. Se deben de seguir los siguientes pasos:

- El motor debe estar en su temperatura normal de operación.
- Con el motor detenido, se deben retirar los cables de las bujías.
- Desenroscar una bujía y colocar allí el manómetro cuidando de tapar completamente el orificio de la culata donde se inserta la bujía.

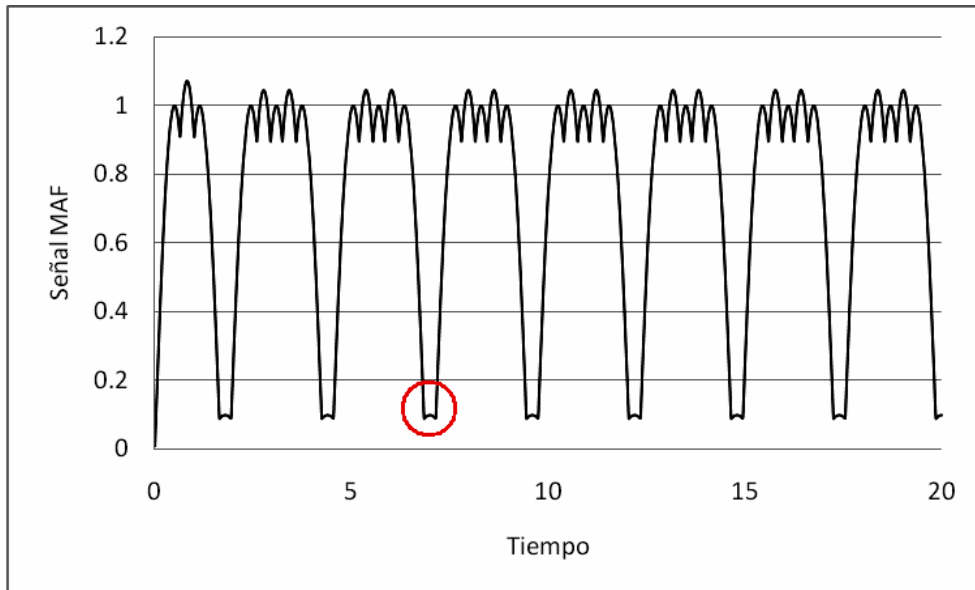
- Para medir la compresión en el cilindro se acciona el motor de arranque durante unos segundos con el pedal del acelerador a fondo.
- Colocar la bujía retirada y repetir los pasos 3 y 4 para cada uno de los cilindros del motor.

Para que un motor obtenga una lectura óptima en la prueba de compresión, las válvulas deben asentar correctamente en su posición evitando cualquier fuga, los anillos del pistón deben sellar el contorno con los cilindros, el empaque de la culata debe sellar la unión con el bloque del cilindros, las bujías deben enroscar correctamente en su posición y el bloque de cilindros y/o la culata no deben tener grietas. Además, el motor debe estar sincronizado.

La presión leída en el manómetro debe ser igual para todos los cilindros y coincidir con la indicada por el fabricante del motor, se permite una diferencia menor al 5% entre cilindros para motores de gasolina. Si no se tiene el dato del valor de compresión dado por el fabricante, se puede usar como una norma general el valor de relación de compresión del motor sumándole 1.

Cuando se hace una prueba de compresión se debe observar que la aguja del manómetro suba rápidamente y se mantenga en la lectura, si no se obtiene una lectura en ninguno de los cilindros, significa que la banda o cadena de tiempo no está sincronizada. Ahora, si un sólo pistón no da lectura, quiere decir que una válvula se dañó. A continuación se aplica el sistema de detección de fallas “simulando” la señal que proporcionaría el sensor y que es procesada por la computadora; en este caso una válvula del cuarto cilindro está dañada.

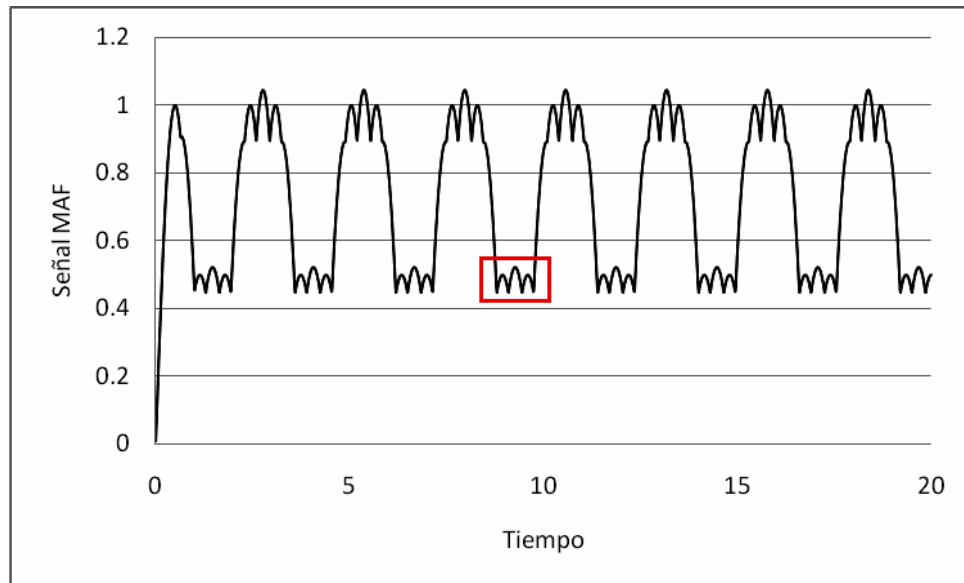
Figura 43. **Síntoma de válvula dañada**



Fuente: elaboración propia.

Si dos pistones adyacentes dan baja lectura; quiere decir que la compresión se está pasando de un cilindro a otro a través del empaque de la culata, es posible identificar este tipo de problema por medio de la señal del medidor de flujo de masa de aire, por ejemplo, en la figura 44, se puede observar que los cilindros tres y cuatro están operando al 50% de su capacidad, debido a que es una señal en función del tiempo, el orden de los cilindros en la gráfica depende del orden de encendido del motor y no tiene relación con la forma en que estos están dispuestos en la estructura física del motor.

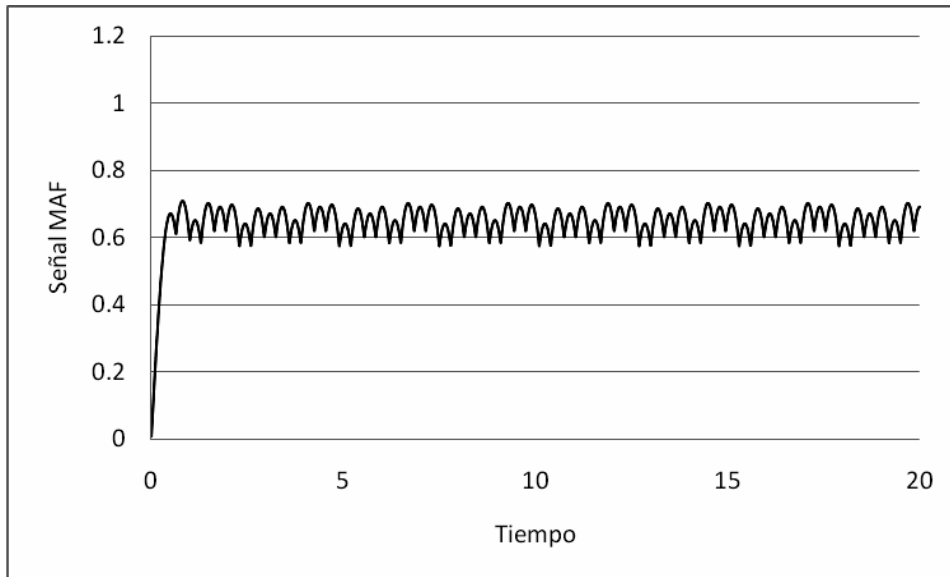
Figura 44. **Síntoma de empaque de la culata dañado**



Fuente: elaboración propia.

Si la presión es baja, puede ser que los anillos de los pistones, las paredes de los cilindros y/o las válvulas se han desgastado. El desgaste de estos elementos se ve reflejado en la señal eléctrica del sensor de flujo de masa de aire, como una atenuación proporcional al desgaste.

Figura 45. **Síntoma de desgaste de cilindros, anillos y/o válvulas**



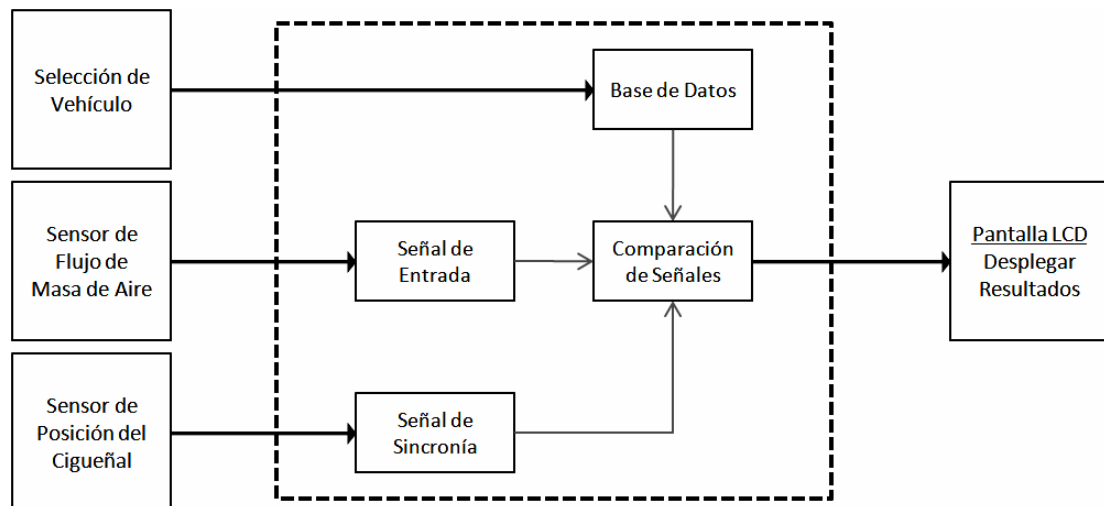
Fuente: elaboración propia.

4.3. Diseño de un dispositivo para la detección de fallas en el sistema de admisión por medio de la señal de un medidor de flujo de masa de aire

La figura 46, muestra el principio de operación del dispositivo de detección de fallas. Requiere de tres señales de entrada; la primera es para seleccionar de la base de datos el vehículo en el que se harán las mediciones; luego está la señal del sensor de flujo de masa de aire y la señal de sincronía.

El dispositivo utiliza las tres señales para detectar fallas en el sistema de admisión, lo hace comparando la señal actual que envía el sensor de flujo de masa de aire, con una señal almacenada en la base de datos que provenía del mismo modelo de vehículo cuando éste era nuevo y se encontraba en óptimas condiciones. Ambas señales se sincronizan a través de la señal del sensor de posición del cigüeñal.

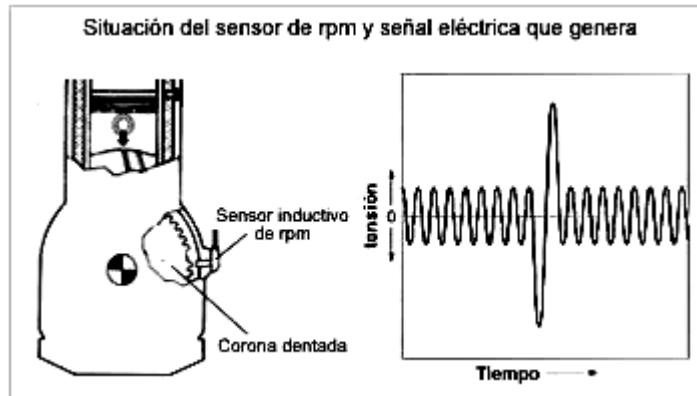
Figura 46. **Esquema del dispositivo de detección de fallas**



Fuente: elaboración propia.

El sensor de posición del cigüeñal, envía una señal a la computadora del vehículo, a fin de sincronizar la activación de los inyectores y la chispa de encendido en las bujías. El sensor forma parte del sistema de encendido y se encuentra ubicado cerca de la polea principal del cigüeñal o incrustado en el bloque de cilindros. El dispositivo detecta la velocidad de rotación del motor y la posición del cigüeñal.

Figura 47. **Sensor de posición del cigüeñal**

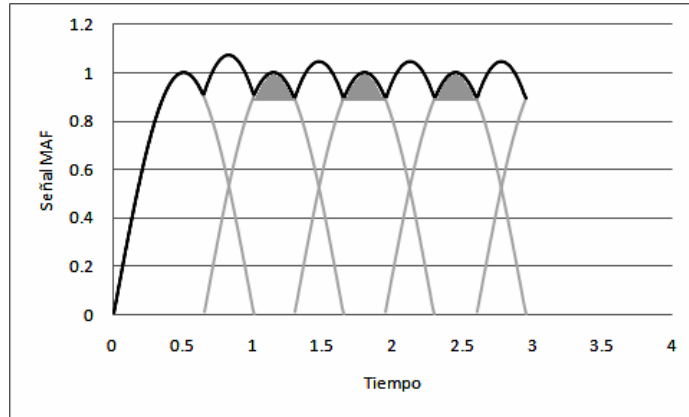


Fuente: <http://www.mecanicavirtual.org/encendido-electronico-integral.htm>. octubre 2010.

Se utiliza la señal de dicho sensor para detectar el momento exacto en que cada pistón alcanza el máximo de su recorrido (punto máximo superior), y de esta forma sincronizar y comparar la señal original (óptima) almacenada en la base de datos con la señal que se ha obtenido al hacer la medición.

La comparación de las señales se debe hacer en el período de tiempo, donde no se traslapan las válvulas de admisión (figura 46), para poder hacer un diagnóstico por cada cilindro de forma individual.

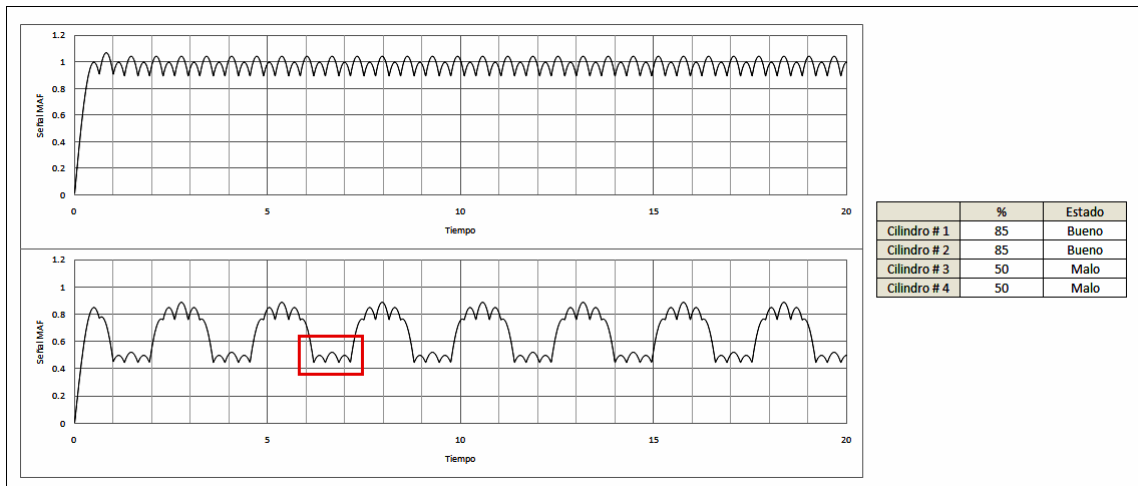
Figura 48. **Período sin traslape de válvulas de admisión**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 49, se pueden observar los resultados de una prueba que indica que existe un problema asociado a los cilindros 3 y 4.

Figura 49. **Interfaz para desplegar los resultados**



Fuente: elaboración propia.

En la parte superior se ha graficado la señal almacenada en la base de datos, ésta se utiliza como medida de comparación. Debajo se ha trazado la señal sujeta a la prueba y que proviene del sensor de flujo de masa de aire. Al lado derecho de ambas gráficas se muestra el resultado de la comparación en forma porcentual y a la vez se describe el estado de cada cilindro en función de los siguientes parámetros.

Tabla II. **Indicadores de estado**

Estado		Porcentaje (%)	Compresión (psi)
Óptimo	Desgaste de cilindro, anillos o válvulas	90 – 100	170 – 190
Bueno		80 – 89	150 – 169
Regular		70 – 79	130 – 149
Regular – Malo		60 – 69	110 – 129
Malo		50 – 59	90 – 109
Malo – Malo		30 – 49	60 – 89
Válvulas dañadas o pistón perforado		< 29	< 60

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Aunque han habido modificaciones, mejoras e innovaciones en los motores de combustión interna que lo han convertido en una máquina altamente sofisticada con avanzados sistemas de control electrónico, sus características fundamentales se han conservado hasta el día de hoy.
2. El rendimiento, es el principal parámetro que caracteriza a un ciclo termodinámico, y se define como el trabajo obtenido dividido por el calor gastado en el proceso.
3. El eje de levas es el dispositivo mecánico responsable en gran parte del rendimiento de un motor, ya que junto con la cantidad de gases que dejan pasar las válvulas permite que el motor aspire aire, siendo más eficiente en un cierto rango de revoluciones.
4. El trabajo desarrollado por un motor, depende de la cantidad de energía liberada al quemarse una mezcla de aire y combustible.
5. Si un motor de combustión interna no induce la mayor cantidad de aire posible, el trabajo entregado por él será limitado, sin importar la cantidad de combustible que se añada.
6. La información sobre el flujo de masa de aire, dentro de un motor de combustión interna, es esencial si la mezcla de aire-combustible del motor y posteriormente la combustión deben ser efectivamente controladas.

7. Con la introducción del control de emisiones, se volvió evidente que la utilización del carburador por sí solo, no era suficiente para controlar la relación aire-combustible con suficiente precisión para cumplir con los requerimientos críticos de los gases de escape. La solución fue utilizar la inyección mecánica y posteriormente electrónica de combustible en conjunto con un método de medición del flujo de masa de aire que entra al motor.
8. La medición directa del flujo de aire en el múltiple de admisión del motor, ha sido considerada por muchos años ser el mejor y más preciso método.
9. El sensor de hilo-caliente, es el único que hace una medición directa, los otros dispositivos requieren de algunos cálculos para obtener la medida del flujo de masa de aire.
10. De la misma forma que hay un traslape entre las válvulas de admisión y escape de un cilindro, existe un traslape entre las válvulas de admisión de los demás cilindros que componen el motor de combustión interna.
11. En base a los resultados de las distintas pruebas que se hicieron durante el desarrollo experimental, se determinó que no es factible detectar fallas en la operación de un motor de combustión interna a gasolina de 4 tiempos, mediante la señal del sensor de flujo de masa de aire, fabricado para ser utilizado en el sistema de inyección, debido a las limitaciones en el nivel de la señal de los sensores, principalmente con el tiempo de respuesta a los cambios en el flujo de masa de aire.

12. Es posible desarrollar un modelo matemático simplificado de la señal eléctrica del sensor de flujo de masa de aire, para simular los efectos que sufriría la señal al presentarse una falla en el funcionamiento de un motor de combustión interna a gasolina de 4 tiempos.

RECOMENDACIONES

Debido al creciente uso de sensores y sistemas de control electrónico en los vehículos modernos, se recomienda a la Facultad de Ingeniería:

1. Incluir en el contenido de los cursos de electrónica aplicada, temas que permitan al estudiante conocer las aplicaciones de la electrónica en el campo automotriz.
2. Implementar en el laboratorio de electrónica equipos que permitan al estudiante conocer y analizar los principios de operación de los sensores y sistemas de gestión electrónica utilizados en los automóviles para poder detectar fallas en su funcionamiento.
3. Dotar a la biblioteca de libros y manuales con temas diversos sobre la electrónica aplicada al automóvil.
4. Capacitar a los estudiantes, técnicos y profesionales a través de cursos y talleres prácticos en el campo de la electrónica automotriz.
5. Diseñar e implementar un programa a nivel de posgrado en electrónica automotriz, para especializar a los ingenieros profesionales que estén interesados en dicha temática.

6. Desarrollar proyectos multidisciplinarios, asesorados por profesionales donde participen estudiantes de las diferentes carreras de ingeniería para que puedan adquirir conocimientos y habilidades a través de la experiencia como parte de su formación integral.

BIBLIOGRAFÍA

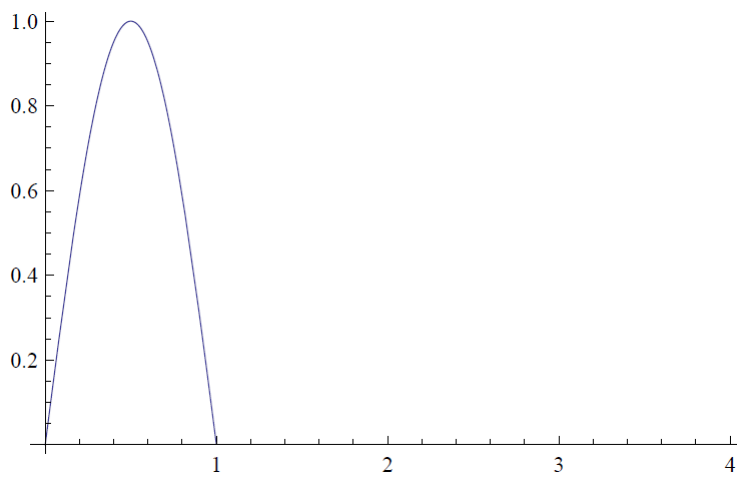
1. FERGUSON, Colin. *Internal combustion engines*. Estados Unidos de América: John Wiley & Sons, 1986. 546p.
2. GIL, Hermógenes. *Sistema de encendido*. España: CEAC, 2002. 284p.
3. HACK, Gert; INDRA, Fritz. *Motores multiválvulas, desarrollo-técnica-modelos*. España: CEAC, 2005. 394p.
4. MEHLHOFF, Bob. "Under the curve". *Chevy high performance*. (U.S.A.) (May 2005):43. 2005.
5. OBERT, Edward F. *Motores de combustión interna. Análisis y aplicaciones*. 2ª, ed. México: Continental, 1966. 762p.
6. PUENTE ROMERO, Guillermo Antonio. "Diseño de circuitería y programación para controlar un motor de combustión interna por medio de microprocesador". Trabajo de graduación de Ing. Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1998. 132p.
7. Society of Automotive Engineers. *Sensors & Actuators*. s.l. Sae Global Mobility Database: 1990. 151p.

8. Westbrook, M.H; Turner, J.D. *Automotive sensors*. s.l: B.E. Jones, 1994.
253p.

APÉNDICE

Para construir y graficar los modelos matemáticos (normalizados) de las figuras 34 y 35, utilizando el software de cómputo *Mathematica* se utilizan las siguientes instrucciones:

```
f(t_) = Abs[Sin[t]] (UnitStep[t] - UnitStep[t-1]);
Plot[f[t], {t, 0, 4}]
```



```
d = 0.65;
```

```
g1[t_] =  $\sum_{n=0}^{10} f[t - 4dn];$ 
```

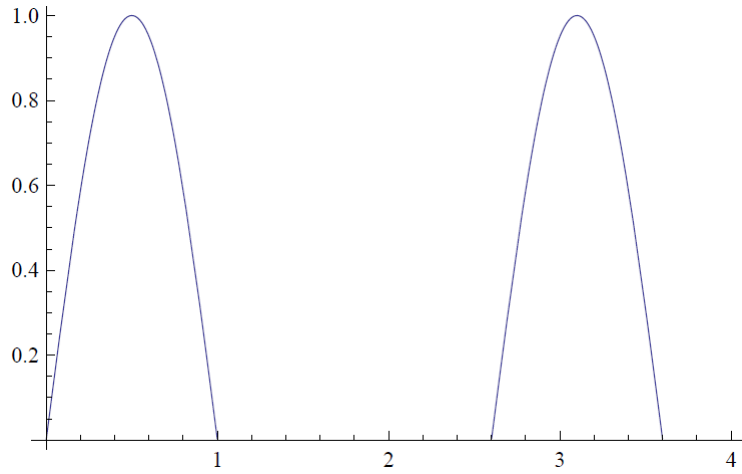
```
g2[t_] = g1[t - d];
```

```
g3[t_] = g2[t - d];
```

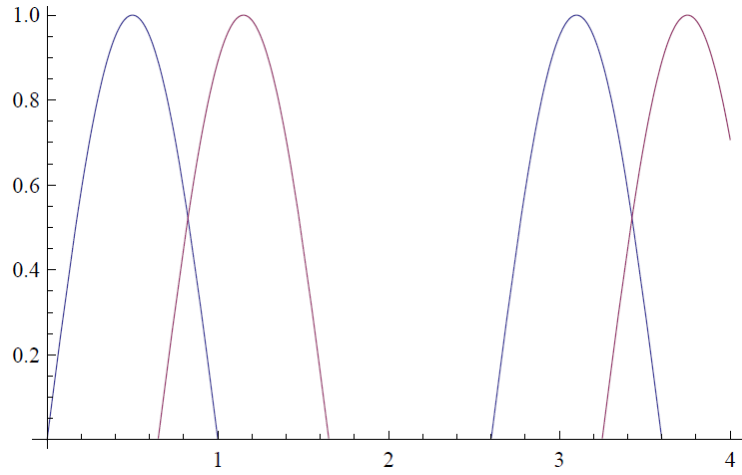
```
g4[t_] = g3[t - d];
```

```
h[t_] = g1[t] + g2[t] + g3[t] + g4[t];
```

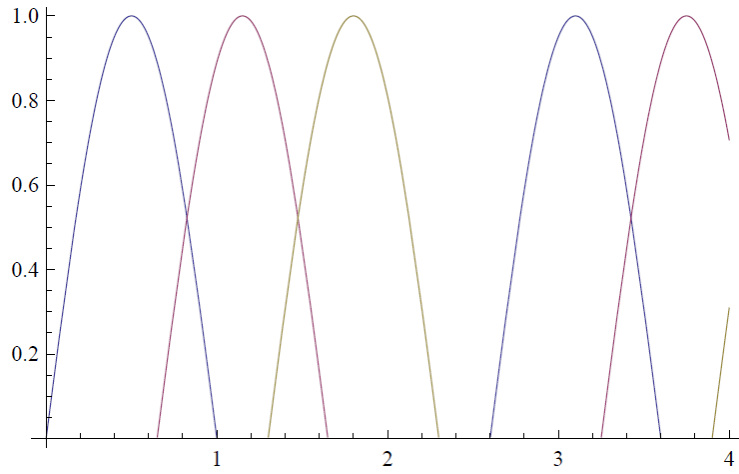
```
Plot[g1[t], {t, 0, 4}]
```



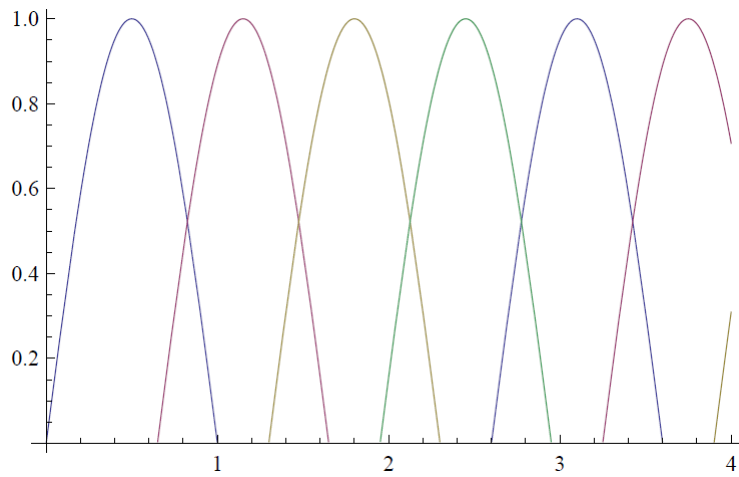
```
Plot[{g1[t], g2[t]}, {t, 0, 4}]
```



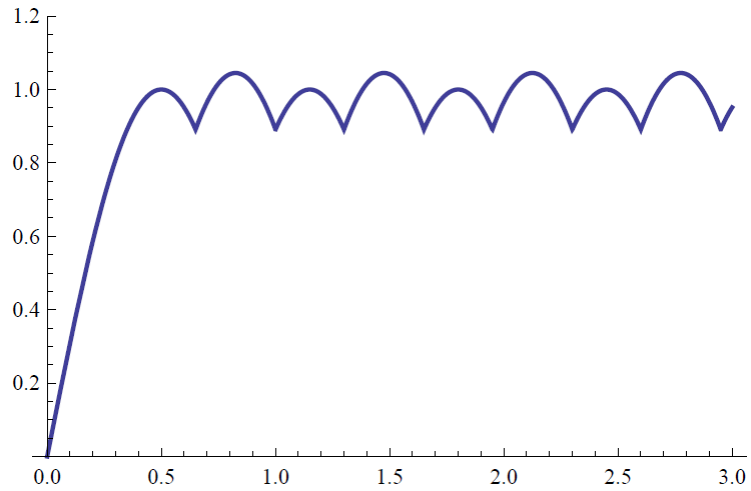
```
Plot[{g1[t], g2[t], g3[t]}, {t, 0, 4}]
```



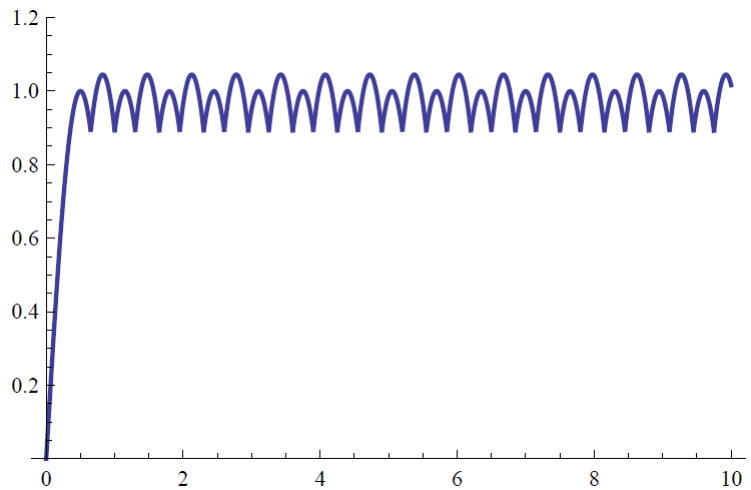
```
Plot[{g1[t], g2[t], g3[t], g4[t]}, {t, 0, 4}]
```



```
Plot[h[t], {t, 0, 3}, PlotRange -> {0, 1.2}, PlotStyle -> Thickness[0.006]]
```



```
Plot[h[t], {t, 0, 10}, PlotRange -> {0, 1.2}, PlotStyle -> Thickness[0.006]]
```




```
Plot[h[t], {t, 0, 20}, PlotRange -> {0, 1.2}, PlotStyle -> Thickness[0.006]]
```

