



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Propuesta de práctica de  
sistemas de inyección de  
combustible en motor de  
combustión interna  
encendido por chispa**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

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

JOSE ALBERTO LOPEZ AVILA

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Armando Maldonado Susano



Ciudad Universitaria, CDMX, abril 2018



***A mis padres Avril y Santiago,***



# Contenidos

<b>Objetivo .....</b>	<b>7</b>
<b>Hipótesis .....</b>	<b>7</b>
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>9</b>
1.1. Carburadores .....	10
1.1.1. Ahogador .....	10
1.1.2. Mecanismo de bypass de aire en ralentí .....	10
1.1.3. Bomba de acelerador .....	11
1.2. Mezclas de aire y combustible.....	11
1.3. Curvas características de los motores de combustión interna encendidos por chispa .....	14
1.3.1. Curvas de potencia .....	14
1.3.2. Curvas de consumo .....	14
1.3.3. Curvas de emisiones .....	14
<b>Capítulo 2. Sistemas de inyección de combustible para los motores de combustión interna encendidos por chispa.....</b>	<b>17</b>
2.1. Breve historia del sistema de inyección de combustible .....	18
2.1.1. Primeros sistemas de inyección de combustible .....	18
2.2. Clasificación de los sistemas de inyección .....	20
2.2.1. Clasificación de acuerdo al punto donde se realiza la mezcla .....	20
2.2.2. Clasificación de acuerdo a la forma en la que se inyecta el combustible .....	20
2.2.3. Clasificación de acuerdo al principio de operación.....	21
<b>Capítulo 3. Componentes del sistema de inyección de motores de combustión interna encendidos por chispa.....</b>	<b>23</b>
3.1. Sensores .....	24
3.1.1. Sensores de posición.....	24
3.1.2. Sensores de temperatura .....	31
3.1.3. Sensores de carga .....	33
3.1.4. Sensores de lazo cerrado.....	36
3.2. Actuadores .....	41
3.2.1 Tipos de Actuadores.....	41
3.2.2. Inyectores .....	42
3.2.3. Válvula del acelerador .....	43

3.2.4. Recirculación de gases de escape (EGR).....	43
3.2.5. Sistema de encendido .....	44
3.2.6. Control de marcha mínima .....	45
3.2.7. Tiempo variable de válvulas .....	45
3.3. Módulo de control electrónico.....	46
3.3.1. Funcionamiento básico .....	46
3.3.2. Componentes electrónicos.....	46
3.3.3. Principales tareas realizadas por el módulo de control .....	47
3.3.4. Software utilizado .....	48
3.3.5. Funciones del módulo de control .....	49
3.3.6. Métodos de seguridad .....	51
<b>Capítulo 4. Sistema de diagnóstico a bordo y reducción de emisiones contaminantes .....</b>	<b>53</b>
4.1. Reducción de emisiones contaminantes.....	54
4.1.1. Formación de mezclas .....	54
4.1.2. Convertidor catalítico .....	54
4.1.3. Control de válvulas.....	56
4.1.4. Recirculación de gases de escape .....	56
4.1.5. Sistemas de ventilación de tanque .....	56
4.2. Sistema de diagnóstico a bordo (OBD) .....	56
4.2.1. Diagnóstico .....	57
4.3. Regulaciones legales .....	61
4.3.1. Normatividad Mexicana .....	62
<b>Capítulo 5. Propuesta de práctica .....</b>	<b>65</b>
5.1. Sistemas de conversión de energía térmica.....	67
5.1.1. Introducción teórica .....	67
5.1.2. Desarrollo del experimento .....	69
5.1.3. Cálculos.....	71
5.1.4. Resultados por obtener .....	76
5.2. Sistemas termoenergéticos.....	77
5.2.1. Introducción teórica .....	77
5.2.2. Desarrollo del experimento .....	79
5.2.3. Cálculos.....	81
5.2.4. Resultados por obtener .....	84

5.3. Material y equipo necesario para la realización de la práctica .....	85
<b>Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>87</b>
Conclusiones y Recomendaciones:.....	88
<b>Referencias.....</b>	<b>89</b>

# Índice de figuras

Figura 1 - Potencia del motor vs. Relación aire-combustible .....	12
Figura 2 - Consumo específico de combustible vs. Potencia .....	13
Figura 3 - Consumo específico vs. Potencia a lo largo de diferentes velocidades del motor .....	13
Figura 4 - Sensor de posición del cigüeñal.....	25
Figura 5 - Sensor de posición de reluctancia magnética .....	25
Figura 6 - Comportamiento del voltaje de salida en un sensor de posición de reluctancia magnética.....	26
Figura 7 - Efecto Hall.....	26
Figura 8 - Sensor de posición de efecto Hall.....	27
Figura 9 - Comportamiento del voltaje de salida en un sensor de posición de efecto Hall .....	28
Figura 10 - Sensor de efecto Hall de campo protegido .....	28
Figura 11 - Comportamiento del voltaje de salida de un sensor de posición de efecto Hall de campo protegido .....	29
Figura 12 - Sensor de posición óptico.....	29
Figura 13 - Patrón de la señal otorgada por el sensor de posición para la identificación de cilindros .....	31
Figura 14 - Sensor de temperatura .....	32
Figura 15 - Comportamiento del voltaje de salida de un sensor de temperatura del líquido de enfriamiento .....	33
Figura 16 - Sensor de posición del acelerador .....	34
Figura 17 - Sensor de flujo de aire de placa móvil .....	35
Figura 18 - Ubicación del sensor de oxígeno .....	37
Figura 19 - Comportamiento del voltaje del sensor de oxígeno según $\lambda$ .....	38
Figura 20 - Esquema de construcción del sensor de oxígeno .....	39
Figura 21 - Curva de operación normal del sensor de oxígeno.....	39
Figura 22 - Línea Willan's.....	72
Figura 23 - Diagrama de instalación del sistema.....	86





# Objetivo

Realizar una descripción de los sistemas de inyección para los motores de combustión interna encendidos por chispa y su forma de funcionamiento para poder así proponer la manera en la que se podría realizar una práctica de laboratorio utilizando las tecnologías actuales.

# Hipótesis

La investigación teórica de los principios de operación de los elementos que conforman un sistema de inyección de un motor de combustión interna encendido por chispa permitirá idear formas para la medición de los parámetros de operación de este sistema que podrán ser aplicadas a una práctica de laboratorio que permitirá a los alumnos tener un mejor aprendizaje sobre su forma de funcionamiento.



# Capítulo 1. Introducción

Desde el comienzo en el uso de los motores de combustión interna se ha necesitado una manera de mezclar aire con combustible de una manera eficiente; labor para la cual se han empleado diferentes dispositivos que han cambiado a lo largo de los años.

Realizar esta mezcla para un motor de combustión interna encendido por chispa, es una labor extremadamente complicada, ya que, normalmente este opera en un amplio rango de condiciones de velocidad y carga para cada una de las cuales se necesita una mezcla con diferentes características.

A lo largo del tiempo para realizar esta mezcla se han empleado principalmente dos sistemas; los carburadores y los sistemas de inyección de combustible.

Inicialmente los carburadores fueron los sistemas más utilizados por su bajo costo y facilidad de construcción y operación, sin embargo, con el paso de los años se fue descubriendo que los sistemas de inyección tenían grandes ventajas sobre los carburadores, por lo que estos se volvieron menos utilizados.

## 1.1. Carburadores

El funcionamiento de los carburadores consiste en un tubo Venturi que produce una diferencia de presiones al pasar el aire por este, en la sección de baja presión cuenta con un orificio que conecta hacia el depósito de combustible y a partir de la diferencia de presiones el combustible es enviado hacia el flujo de aire realizando con esto la mezcla aire-combustible.

El gran problema de este mecanismo radica en que no permite realizar una mezcla óptima en todos los rangos de operación del motor. Debido a su método de operación; la mezcla se enriquece a altas velocidades y empobrece a bajas, su respuesta es lenta a las necesidades de cambio de velocidad, y la cantidad de combustible suministrado es muy similar para diferentes condiciones de temperatura y presión atmosférica. Por estos motivos los carburadores deben de estar dotados por una variedad de dispositivos auxiliares que tratan de contrarrestar estos problemas, aunque no logran eliminarlos completamente.

Algunos de estos dispositivos son:

### 1.1.1. Ahogador

Consiste en uno o más juegos de válvulas de mariposa colocadas en la entrada de aire del carburador; estas aletas están cerradas cuando el motor se encuentra a baja temperatura y abiertas cuando el motor se encuentra en temperatura de operación. De esta forma cuando el motor se encuentra a baja temperatura, se reduce la cantidad de aire que pasa a través del carburador enriqueciendo así la mezcla aire-combustible. Este dispositivo puede ser manual donde el operador del motor lo abre o cierra, o automático que consta de un termostato que lo va abriendo conforme la temperatura del motor va en aumento.

### 1.1.2. Mecanismo de bypass de aire en ralentí

En la mayoría de los casos cuando un motor de gasolina está completamente desacelerado, las válvulas del carburador se encuentran completamente cerradas por lo que el paso del aire hacia el motor es casi imposible, además en el Venturi no se produce la diferencia de presiones necesaria para que el

combustible sea suministrado a la corriente de aire. Por lo tanto, la mayoría de los carburadores se encuentran dotados de un sistema alternativo para el paso para el aire.

El sistema consiste en pequeños agujeros colocados en el carburador por los cuales el aire pasa por un camino alternativo a las válvulas de mariposa principales. En este camino alternativo existen puertos por los que la gasolina es arrojada al flujo de aire por diferencia de presiones, el flujo de combustible es normalmente controlado mediante unos tornillos de ajuste.

### 1.1.3. Bomba de acelerador

El principio de operación de los carburadores los vuelve poco sensibles a los cambios en la posición del acelerador, especialmente a los bruscos. Al abrir repentinamente las válvulas de mariposa del carburador se deja pasar más aire, pero el cambio de presión que impulsa el combustible hacia el flujo del aire no se da de forma inmediata por lo que, en el momento de transición, la mezcla aire-combustible se empobrece. Este fenómeno provoca que el cambio de velocidad del motor no sea tan rápido como es esperado por el operador.

La bomba del acelerador es un dispositivo mecánico que responde a la apertura de las válvulas del carburador rociando directamente al paso de aire cierta cantidad de combustible, enriqueciendo la mezcla para lograr así la respuesta del motor deseada.

Las principales desventajas que existen en los carburadores son:

- Posibilidad de congelamiento alrededor del Venturi.
- Evaporación de combustible a altas temperaturas.
- Incapaz de utilizarse con combustibles no vaporizables.
- Restricción de flujo de aire debido al Venturi.
- El suministro de combustible al motor puede verse afectado por ángulo del automóvil.
- Pueden existir problemas en la formación de la mezcla por el suministro central de combustible.
- Ajuste complicado para la mezcla ideal en todos los rangos de operación.

Debido a los problemas mencionados anteriormente se buscaron alternativas que pudieran eliminar estos inconvenientes y la solución que se dio fue el sistema de inyección de combustible que se describirá en los siguientes capítulos de este trabajo.

## 1.2. Mezclas de aire y combustible

La mezcla de aire combustible ideal depende de muchos factores. Teóricamente la mezcla perfecta se denomina: "mezcla estequiométrica", la cual consiste en que para cada molécula de combustible existe la cantidad exacta de oxígeno para que la primera sea oxidada completamente.

La mezcla estequiométrica no es la mezcla perfecta para la combustión, ya que, para que la combustión sea completa se requiere que exista un exceso de aire en la mezcla, este exceso de aire deja a cada molécula de combustible rodeada por oxígeno para que este sea quemado. Con la cantidad de aire estequiométrica o con una cantidad menor se tendrá una combustión incompleta del combustible.

En los motores de combustión interna existen tres tipos de mezcla aire-combustible:

- Mezcla rica: es una mezcla con la cantidad de aire menor a la necesaria para la combustión completa.
- Mezcla estequiométrica: es una mezcla con la cantidad teórica de oxígeno necesaria para la combustión completa.
- Mezcla pobre: es una mezcla con una cantidad de oxígeno mayor a la necesaria para la combustión completa.

Comúnmente es aceptado que para la gasolina la relación de aire combustible estequiométrica en base masa es de alrededor de 14.7:1, pero debido a que la gasolina es una mezcla de hidrocarburos que cambian de acuerdo al fabricante, a la estación del año o algunos otros factores, la relación de aire combustible estequiométrica no es siempre la misma y normalmente varía en un rango de 13:1 a 15:1.

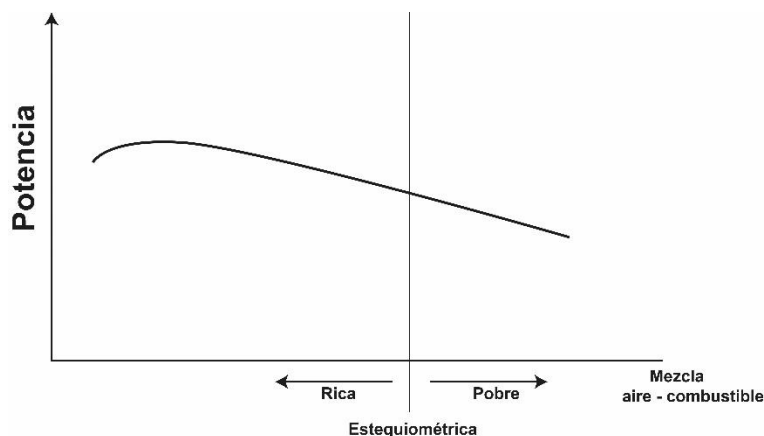
El rango de mezclas en las que un motor de combustión interna de encendido por chispa puede operar se encuentra entre 6:1 y 24:1.

La relación de aire-combustible con la que opera un motor está relacionada directamente con la potencia, eficiencia y nivel de emisiones contaminantes que este produce. Los efectos producidos se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1 – Efectos de la relación aire-combustible**

	Potencia	Eficiencia de combustible	CO	HC	NOX
<b>Mezcla ligeramente pobre</b>	↓	↑	↓	↓	↑
<b>Mezcla ligeramente rica</b>	↑	↓	↑	↑	↓

En la Figura 1 se ilustra el comportamiento de la potencia producida dependiendo de la relación aire combustible que ingresa al motor.



*Figura 1 - Potencia del motor vs. Relación aire-combustible*

Normalmente los sistemas de inyección de combustible están diseñados para operar buscando la máxima eficiencia del combustible por lo que a bajas aceleraciones trabajan mayormente produciendo una mezcla

pobre, pero, cuando se requiere una gran potencia a altas aceleraciones del motor tienden a producir una mezcla rica. Encontrar la mezcla precisa para la operación del motor de combustión interna es una labor muy larga que se realiza de manera práctica.

El proceso consiste en colocar el motor con la válvula del acelerador con una apertura fija, manteniendo la velocidad de giro de la flecha constante. Se empieza introduciendo una mezcla rica de combustible y esta se va empobreciendo gradualmente midiendo: el consumo de combustible, la cantidad de aire que entra al motor y la potencia entregada, a lo largo de muchos puntos. Al terminar este proceso se grafica la potencia contra el consumo específico de combustible, de esto resulta una curva como la que se muestra en la Figura 2:

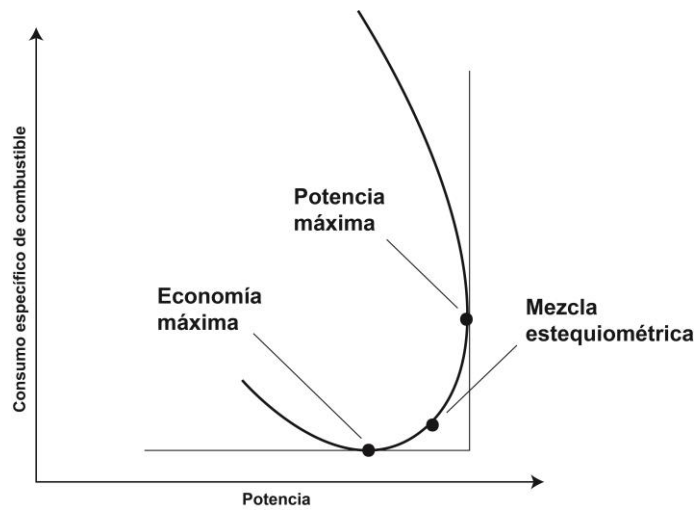


Figura 2 - Consumo específico de combustible vs. Potencia

Este proceso se repite a lo largo del rango de velocidades de operación del motor para obtener una curva como la que se muestra en la Figura 3:

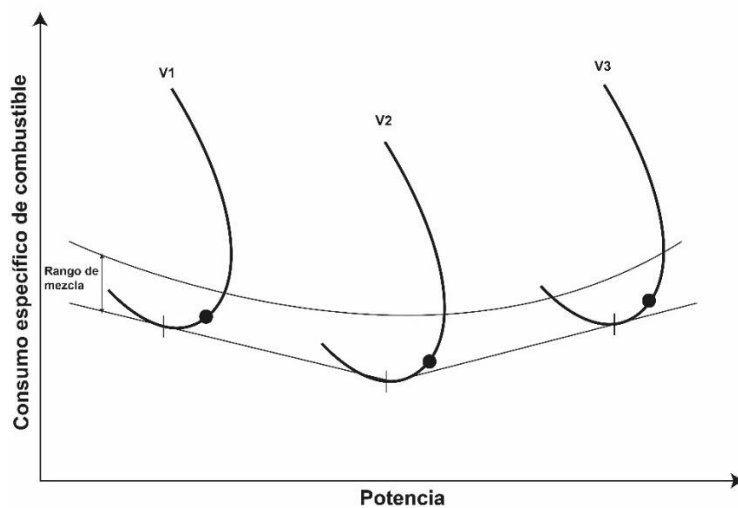


Figura 3 - Consumo específico vs. Potencia a lo largo de diferentes velocidades del motor

De esta forma es como se evalúa la cantidad de combustible que será suministrada al aire que se ingresa al motor y así lograr el efecto de potencia y economía determinado por el fabricante del motor.

## 1.3. Curvas características de los motores de combustión interna encendidos por chispa

El rango de operación de un motor de combustión interna de encendido por chispa puede representarse en distintas curvas.

Estas curvas pueden ser utilizadas como registro de los parámetros de operación, estrategias de operación, y/o evaluación de los parámetros resultantes para un motor de combustión interna encendido por chispa.

Dependiendo del uso de las curvas estas pueden ser de distintos tipos:

- Curvas de potencia
- Curvas de consumo específico de combustible
- Curvas de emisiones
- Curvas de inyección
- Curvas de tiempo de encendido

### 1.3.1. Curvas de potencia

Las curvas de potencia normalmente comparan la velocidad del motor con la potencia útil producida por este.

### 1.3.2. Curvas de consumo

Las curvas de consumo pueden comparar el consumo de combustible del motor con:

- Velocidad de giro
- Potencia de salida
- Torque de salida

Dependiendo de las necesidades del usuario también se puede utilizar el consumo específico de combustible. Definido como la cantidad de combustible suministrada al motor entre la potencia producida por este.

### 1.3.3. Curvas de emisiones

Las curvas de emisiones contaminantes son importantes sobre todo en motores con control de emisiones contaminantes. Estas permiten observar el comportamiento de salida de emisiones contaminantes dependiendo de:

- Velocidad de giro del motor
- Potencia de salida
- Torque de salida
- Cantidad de aire aspirado por el motor



Estas curvas normalmente se enfocan a los principales cuatro productos de la combustión contaminantes: monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y combustible no quemado.



# Capítulo 2. Sistemas de inyección de combustible para los motores de combustión interna encendidos por chispa

El sistema de inyección de combustible busca eliminar las desventajas de los carburadores al suministrar al motor una mezcla aire-combustible de una manera óptima para todos sus rangos de operación.

## 2.1. Breve historia del sistema de inyección de combustible

El desarrollo de los sistemas de inyección de combustible comenzó como una forma de satisfacer las necesidades de los motores diésel.

Debido a la sencillez y bajo costo del carburador en aplicaciones de motores de encendido por chispa no existía la necesidad de sistemas de inyección para estos motores. Sin embargo, con el paso del tiempo se empezaron a descubrir las ventajas que existen en el sistema de inyección sobre el carburador y por lo tanto se empezó con la aplicación de este a los motores de gasolina.

La producción de la primera aplicación del sistema de inyección de combustible se debe a la compañía de tractores alemana Deutz, que construyó alrededor de 300 motores estacionarios con sistema de inyección.

En 1927 Bosch compra la compañía Acro junto con los derechos de patente del equipamiento necesario para inyección de combustible a alta presión. Poco después Bosch empieza a fabricar su primer sistema de inyección diésel.

El sistema de inyección se empezó a adaptar a los motores de encendido por chispa en los años treinta inicialmente para su uso en aviación lo cual tenía una gran cantidad de ventajas entre ellas permitir maniobras más agresivas y el vuelo invertido.

### 2.1.1. Primeros sistemas de inyección de combustible

Algunos de los sistemas de inyección que se desarrollaron inicialmente fueron los siguientes:

#### 2.1.1.1. Bomba Diesel Jerk

La tecnología para inyección de combustible utilizada en motores Diésel consistía en una bomba “Jerk”. Esta bomba representó el inicio de los sistemas de inyección para los motores encendidos por chispa al ser adaptada para esto. El problema de esta adaptación era que la dificultad para su instalación en un motor de encendido por chispa era mucho mayor a uno diésel debido a las diferencias de control de la potencia otorgada por el motor. En los motores encendidos por chispa la bomba “Jerk” no debía ser simplemente conectada al acelerador, sino también a un sistema que censara la cantidad de aire que estaba entrando al motor. Este sistema resulta muy complicado, difícil de ajustar correctamente y representaba un costo aun mayor que el de la bomba.

#### 2.1.1.2. Sistemas de inyección continua

Los sistemas de inyección continua fueron específicamente diseñados para los motores encendidos por chispa. Como su nombre lo dice suministran continuamente el combustible hacia el flujo de aire que ingresa al motor.

#### 2.1.1.2.1. Sistema de inyección Wright

A principios del siglo XX el avión de los hermanos Wright contaba con una bomba de desplazamiento positivo conectada al motor, esta bomba rociaba en cada revolución una cantidad de combustible determinada directamente al flujo de aire.

#### 2.1.1.2.2. Sistema de inyección Winfield

En los años 30, Ed Winfield desarrolló un sistema de inyección continua de baja presión para los autos Indy, este sistema contaba con una provisión para variar la cantidad de flujo de combustible dependiendo de la posición del acelerador.

#### 2.1.1.2.3. Sistema de inyección Hilborn

El método de Stuart Hilborn en los años 40 consistía en incorporar una válvula dosificadora controlable que era conectada al mecanismo del acelerador, dependiendo de la posición del acelerador suministraba una cantidad de combustible hacia el flujo de aire y regresaba una cantidad de combustible al tanque. El problema de este sistema se encuentra en la eficiencia en la aspiración del motor; esto quiere decir que, a lo largo de las distintas posiciones del acelerador, el motor no aspira una misma cantidad de aire. Aunque este sistema se utilizó bastante en aplicaciones con metanol ya que este tolera variaciones en la mezcla sin afectar considerablemente la potencia.

#### 2.1.1.2.4. Sistema de inyección Rochester

Utilizado en automóviles Corvette de los años 1957 a 1965, es el sistema de inyección continua histórico mejor conocido.

Consiste en una válvula dosificadora que sirve como regulador de la cantidad de combustible. El combustible es suministrado a la válvula mediante una bomba de engranes con una presión variable de acuerdo a la velocidad del motor a un máximo de 200 psi.

La válvula dosificadora consiste en una manga con un número de puertos acomodados de forma radial y un flotador que cubre o expone los puertos de acuerdo a su posición. La posición del flotador depende de un balance entre la presión del combustible y una fuerza aplicada en la parte superior del flotador por un mecanismo de control de la mezcla. Aumentar la presión de combustible resulta en que el flotador sube y descubre los puertos reduciendo una parte de la presión. El mecanismo de control de la mezcla consiste de una computadora mecánica sencilla que aplica una fuerza de resorte a la parte superior del flotador la cual es modificada mediante dos diafragmas; uno conectado directamente al múltiple de admisión y otro a un Venturi por el cual pasa todo el aire admitido al motor.

### 2.1.1.3. Uso de válvulas solenoides

El primer registro que se tiene del uso de válvulas solenoides para sistemas de inyección de combustible se remonta a 1932 cuando un ingeniero de "Atlas Imperial Diesel Engine Co." llamado Kennedy instaló un equipo para un motor marino.

En los años 60 A.H. Wintler y R.W. Sutton de "Eclipse Machine Division, Bendix Aviation Corporation", mostraron al mundo uno de los primeros sistemas de inyección de combustible como lo conocemos actualmente. Este era un sistema de inyección de gasolina que utilizaba las válvulas solenoide como inyectores en conjunto a un módulo de control electrónico. El proyecto fue nombrado "inyección de combustible electrónica"; contaba con un inyector de puerto para cada cilindro, cada uno alimentado por

un riel de combustible (un tubo con una entrada de combustible y que suministra el combustible a cada uno de los inyectores que se encuentran conectados a este) a 20 psi en común. Tenía sensores para la presión del múltiple, velocidad del motor, presión atmosférica y temperatura del aire y refrigerante; los cuales daban información al módulo de control electrónico que calculaba los requerimientos instantáneos de combustible del motor. De acuerdo con esto el módulo de control entregaba un pulso de corriente a un distribuidor que direccionaba esta corriente al inyector correspondiente. Este sistema fue instalado en algunos vehículos como 1953 Buick, 1957 Rambler Rebel, 1958 Chrysler 300D y DeSoto. Debido a la falta de tecnología de estos años este sistema no era muy confiable.

Para 1965 Bendix había desarrollado un sistema completo, aunque esta vez decidieron llevarlo al mercado por medio de la compañía Bosch.

## 2.2. Clasificación de los sistemas de inyección

Existe una gran variedad de sistemas de inyección por lo cual es clasificarlos de varias maneras, a continuación, se da una breve clasificación de estos:

### 2.2.1. Clasificación de acuerdo al punto donde se realiza la mezcla

#### 2.2.1.1. Central

La mezcla aire-combustible se realiza en un punto central del múltiple de admisión.

Ventajas: sistema simple y económico, de ajuste sencillo.

Desventajas: el diseño del múltiple de admisión es complicado y el trayecto que tiene que recorrer la mezcla aire-combustible causa que esta no sea uniforme para todos los cilindros además que algunas veces puede existir una acumulación indeseable en algunas partes de este múltiple lo que a veces empobrece la mezcla y otras la enriquece.

#### 2.2.1.2. Multipuntos

La mezcla se realiza en diversos puntos del sistema de admisión ya sea en el puerto de admisión de cada cilindro o dentro de este.

Ventajas: se eliminan los problemas de llevar la mezcla a lo largo de todo el múltiple de admisión, la mezcla es prácticamente igual para cada uno de los cilindros y el combustible es vaporizado de una mejor manera.

Desventajas: el sistema es más complicado, costoso y con un mayor número de partes.

### 2.2.2. Clasificación de acuerdo a la forma en la que se inyecta el combustible

#### 2.2.2.1. Indirecta

El combustible es inyectado fuera de la cámara de combustión.

#### 2.2.2.2. Directa

El combustible es inyectado dentro de la cámara de combustión.

## **2.2.3. Clasificación de acuerdo al principio de operación**

### **2.2.3.1. Mecánico**

El sistema de inyección es completamente mecánico y basa su funcionamiento en principios como la diferencia de presiones.

### **2.2.3.2. Electrónico**

El sistema de inyección es electrónico y basa su funcionamiento en sensores, actuadores y módulos de control.





# Capítulo 3. Componentes del sistema de inyección de motores de combustión interna encendidos por chispa

En este capítulo se describen los componentes principales y más comunes de los sistemas de inyección de combustible para los motores de combustión interna encendidos por chispa.

A grandes rasgos estos componentes se pueden dividir en tres categorías distintas:

- Sensores
- Actuadores
- Módulo de Control

A continuación, se describirán estas categorías con sus respectivas subdivisiones y un ejemplo para cada una de ellas, se considera para ello un motor Chevrolet LT1 de 1994.

## 3.1. Sensores

Los sensores son aquellos elementos que están encargados de medir las diversas variables de operación del motor de combustión interna. Son transductores que normalmente convierten una variable física en una eléctrica que puede ser utilizada por el módulo de control del motor de combustión interna.

Los elementos que entran dentro de la categoría de sensores son:

- Sensores de posición
  - Sensor de posición de cigüeñal
  - Sensor de posición de árbol de levas
- Sensores de temperatura
  - Sensor de temperatura del líquido de enfriamiento
  - Sensor de temperatura del aire de admisión
  - Sensor de temperatura del sensor de oxígeno (sonda lambda)
- Sensores de carga
  - Sensor de posición del acelerador
  - Sensor de flujo de aire
- Sensores de lazo cerrado
  - Sensor de oxígeno
  - Sensor de golpeteo

### 3.1.1. Sensores de posición

Los sensores de posición del árbol de levas y del cigüeñal son los encargados de determinar el estado angular con respecto a un punto de referencia que se tiene en el cigüeñal o en el árbol de levas. La posición angular es medida en grados; de 0 a 360. Esta información es utilizada por el módulo de control (computadora) para determinar la velocidad de giro del motor y la ubicación del pistón dentro de cada cilindro.

La ubicación del pistón dentro de cada cilindro es información de gran importancia para el módulo de control para determinar el tiempo de encendido y de inyección.

Estos sensores se pueden localizar tanto en el cigüeñal como en el árbol de levas y dependiendo el diseño del sistema de inyección que se tenga un motor puede contar con uno solo o ambos.

Los sensores de posición operan en condiciones bastante adversas por lo cual es deseable que en su diseño se evite cualquier contacto mecánico entre este y las partes con movimiento del motor; por lo que, en general basan su funcionamiento en fenómenos magnéticos u ópticos; a continuación, se describen sus principios de operación.

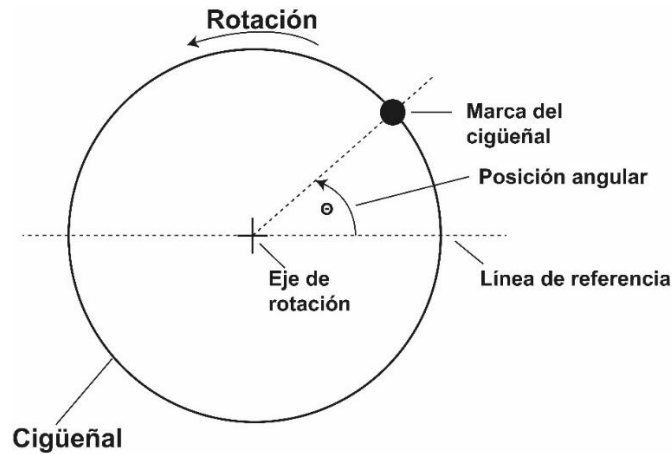


Figura 4 - Sensor de posición del cigüeñal

### 3.1.1.1. Sensores de tipo magnético

Los sensores de tipo magnético basan su funcionamiento en efectos magnéticos y pueden ser:

- Sensores de reluctancia magnética
- Sensores de efecto Hall

#### 3.1.1.1.1. Sensores de reluctancia magnética

La reluctancia es aquella propiedad que determina el flujo magnético  $\phi$  que resulta de una fuerza magnética  $F$  a lo largo de un circuito magnético.

Los sensores consisten de una bobina alrededor de un imán sobre un disco de acero dentado que está montado en el eje (árbol de levas o cigüeñal). El número de dientes del aro depende del número de cilindros del motor y cada uno representa una posición de los pistones dentro de los cilindros, por ejemplo, que el pistón número uno se encuentra en el punto muerto superior.

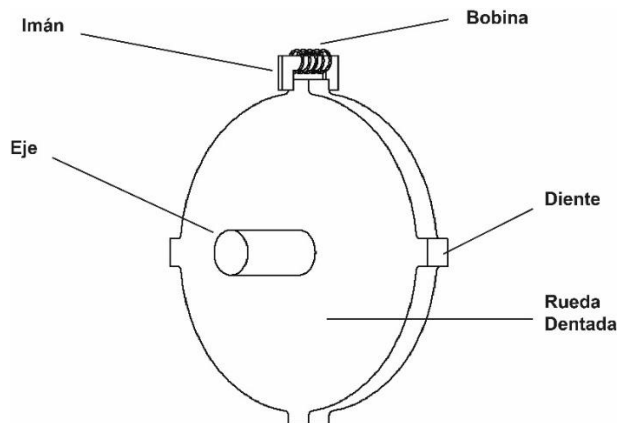


Figura 5 - Sensor de posición de reluctancia magnética

El imán y la bobina generan un campo magnético que es afectado cada vez que un diente del disco pasa entre este.

La variación del campo magnético genera una salida de voltaje, esto es lo que representa una de las mayores desventajas de este tipo de sensor; ya que para que exista un voltaje diferente de cero, el eje debe de estar girando por lo que cuando el motor se encuentra en estado estático este sensor no brinda ninguna información útil.

La imagen siguiente muestra el comportamiento del voltaje de salida del sensor de acuerdo a la posición del diente alrededor de este.

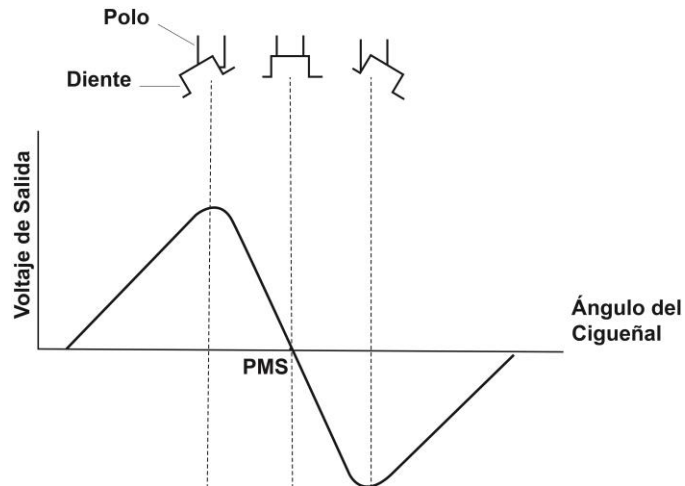


Figura 6 - Comportamiento del voltaje de salida en un sensor de posición de reluctancia magnética

### 3.1.1.1.2. Sensores de Efecto Hall

El efecto Hall es un fenómeno físico descubierto en 1879 por Edwin Hall y se da en estado estacionario. El fenómeno consiste en que una carga eléctrica sometida a un campo magnético sufre una fuerza que la desvía a través del conductor por el cual esta circula. Por ejemplo, si la carga eléctrica está viajando a través de un cable, este se moverá hacia un lado o si se mide la diferencia de potencial existente a una misma altura de un conductor, pero de lados opuestos esta será diferente de cero.

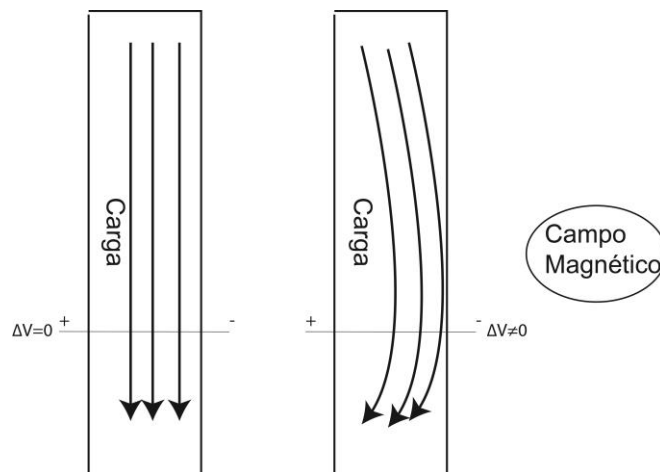
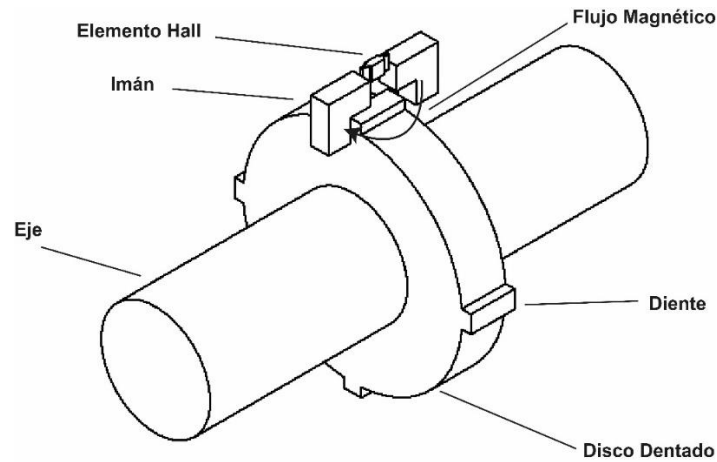


Figura 7 - Efecto Hall

El fenómeno ocurre en estado estacionario por lo que representa la respuesta al problema de los sensores reluctivos se tiene en los sensores de efecto Hall, donde estos permiten medir la posición del eje, aunque este no se encuentre girando.

La construcción de los sensores de efecto Hall es muy similar a la de los sensores de reluctancia magnética, utilizan un disco de acero dentado y un imán. De igual forma que en el sensor anterior, el disco de acero cambia la reluctancia del campo magnético mientras los dientes pasan por el imán.



*Figura 8 - Sensor de posición de efecto Hall*

Aplicado a los sensores, el efecto Hall es utilizado de la siguiente manera:

El elemento Hall está construido a partir de un semiconductor, cuando el elemento Hall está sometido a un campo magnético genera un voltaje que es proporcional a este. La operación del sensor se basa en la variación del campo magnético normal al elemento Hall y su relación con el voltaje de la terminal.

La densidad del flujo magnético es baja para las posiciones en las que los dientes del disco se encuentran lejos del sensor. Cuando un diente se acerca al sensor y obstruye con material magnético, la magnitud de la densidad del flujo magnético incrementa en proporción a la proyección del diente sobre el sensor incrementando el voltaje de salida del sensor como se puede apreciar en el siguiente diagrama:

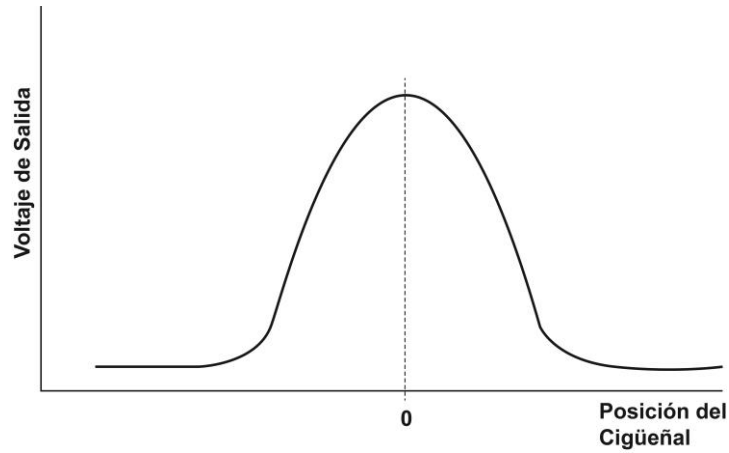


Figura 9 - Comportamiento del voltaje de salida en un sensor de posición de efecto Hall

### 3.1.1.1.3. Sensor de efecto Hall de campo protegido

Este sensor utiliza el efecto Hall de una forma diferente a la anterior. En este método el elemento Hall está expuesto de forma normal a un campo magnético y produce un voltaje de salida. Cuando un diente pasa entre el imán y el elemento sensor, los bajos valores de reluctancia del diente y disco dan un camino para el flujo magnético que no pasa por el elemento sensor de efecto Hall y la salida del sensor baja a casi cero, teniendo una onda de señal opuesta a la del tipo anterior.

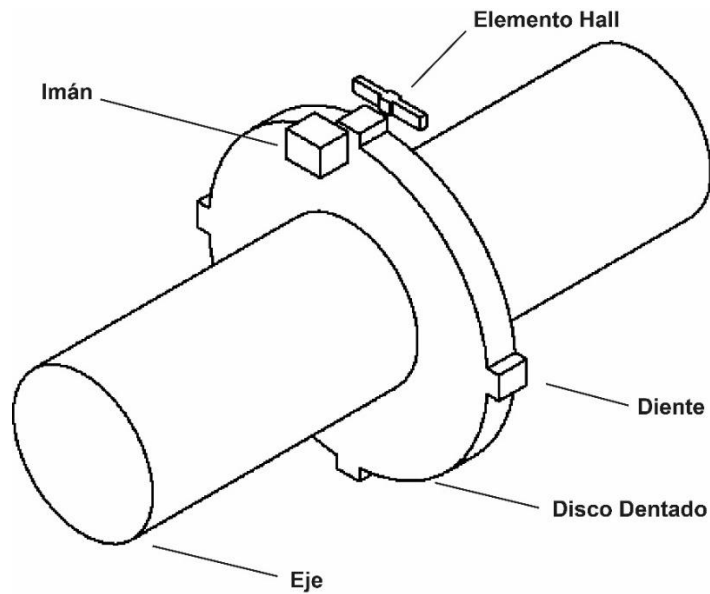


Figura 10 - Sensor de efecto Hall de campo protegido

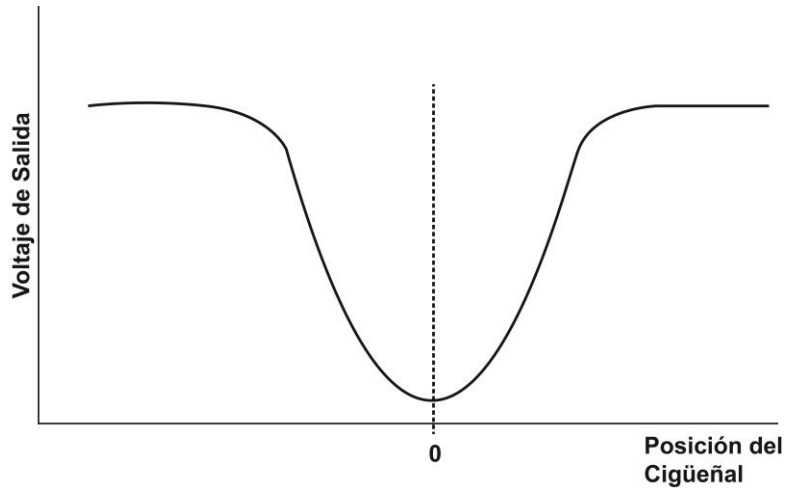


Figura 11 - Comportamiento del voltaje de salida de un sensor de posición de efecto Hall de campo protegido

### 3.1.1.2. Sensores de tipo óptico

Los sensores de tipo óptico constan de un disco ranurado colocado en un extremo del eje. Montado a un lado de este disco ranurado se encuentran unos diodos emisores de luz y del otro unos fototransistores que sirven como sensores receptores de luz.

Mientras el disco se encuentra en una posición sin ranura la luz no será recibida por los fototransistores y cuando esta gira hacia una ranura permite el paso de la luz y envía una señal. Las ranuras en el disco están colocadas similarmente a las de los dientes en los sensores magnéticos; normalmente indicando el punto muerto superior de cada uno de los pistones dentro del cilindro.

La señal de salida de este tipo de sensores consiste en un tren de pulsos de voltaje que el módulo de control tendrá que identificar como una señal binaria.

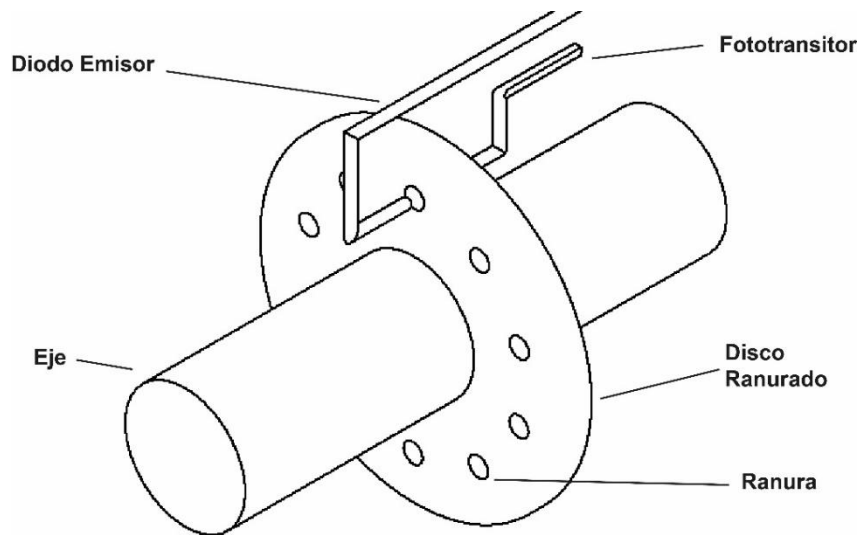


Figura 12 - Sensor de posición óptico

La desventaja de este tipo de sensores es que deben ser protegidos especialmente de la mugre y el polvo y sus ventajas radican en que envían una señal así el motor no esté girando y que la amplitud del pulso es casi constante con la variación en la velocidad.

### 3.1.1.3. Sensores de posición del cigüeñal

Los sensores de posición del cigüeñal son los sensores primarios para los sistemas de inyección de combustible.

Estos sensores permiten determinar la posición angular relativa a un punto de referencia (normalmente 0, cuando el pistón número 1 se encuentra en el punto muerto superior) de cada uno de los pistones del motor dentro de los cilindros y también para determinar la velocidad angular a la que el motor se encuentra trabajando.

El sensor es ampliamente utilizado en los sistemas de inyección de combustible gracias a su gran precisión en las mediciones de posición dadas, sin embargo, debido a las características de los motores donde el ciclo se completa cada dos vueltas del cigüeñal es necesario un dispositivo auxiliar que permita al módulo de control evitar las ambigüedades que este sistema puede presentar. Las ambigüedades en el sistema significan que: un pistón en el punto muerto superior puede encontrarse en el principio de la carrera de admisión o de la carrera de potencia. Para este fin son utilizados los sensores en el árbol de levas.

### 3.1.1.4. Sensores de posición del árbol de levas

A diferencia del cigüeñal el árbol de levas solo gira una vez por cada ciclo que el motor completa, lo que significa que: en este punto es donde se puede determinar con precisión en qué punto exacto está el motor dentro del ciclo.

El sensor de posición del árbol de levas es el sensor más importante en determinar la posición de los elementos del motor ya que el árbol de levas está íntimamente relacionado con el tiempo en el que se encuentra cada uno de los cilindros del motor. Puede ser de tipo óptico o magnético y también puede ser utilizado como un sensor primario realizando mediciones precisas de su posición o simplemente como un sensor para solucionar las ambigüedades del sensor de posición del cigüeñal.

La mayor desventaja de este tipo de sensores es la pérdida de exactitud en la medición del estado real debido a la flexión que se tiene en los componentes de transmisión de giro hacia el árbol de levas.

#### **Por ejemplo:**

Sensor de posición del árbol de levas:

Distribuidor GM "Optispark"

Tipo de sensor: Óptico

Ubicación: Frente al motor directamente en el final del árbol de levas.

Funcionamiento: De acuerdo al descrito para los sensores de tipo óptico.

El disco está compuesto por dos juegos de ranuras:

- 360 de alta resolución; las cuales son utilizadas para ir midiendo los grados para el avance del encendido



- 8 de identificación de cilindro; cada marca identifica un cilindro el cual se encuentra en el PMS
  1. 4 ranuras de 2 grados para los cilindros; 1, 4, 6 y 7
  2. 4 ranuras con diferente longitud (número de grados)
    1. Cilindro 8: 7°
    2. Cilindro 3: 12°
    3. Cilindro 5: 17°
    4. Cilindro 2: 22°

Entonces se tiene que los cilindros con ranuras de dos grados son identificados de acuerdo al orden de encendido del motor (1-8-4-3-6-5-7-2).

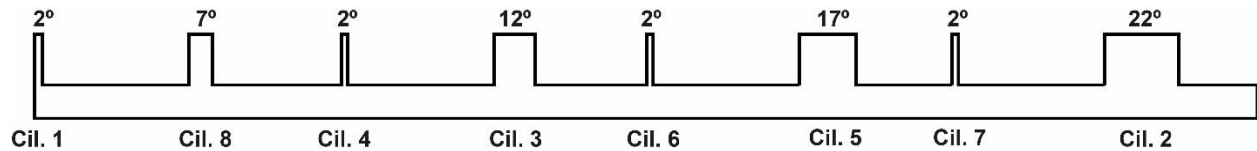


Figura 13 - Patrón de la señal otorgada por el sensor de posición para la identificación de cilindros

Sensor de posición del cigüeñal:

Este sistema de inyección de combustible no cuenta con este dispositivo.

### 3.1.2. Sensores de temperatura

Una de las variables más importantes a medir dentro de los motores de combustión interna ya sea como parámetro de control o como de protección es la temperatura, entre las variables más importantes de temperatura a medir se encuentran:

- Temperatura de admisión de aire
- Temperatura del sensor de oxígeno
- Temperatura del líquido de enfriamiento

Las características del sensor a utilizar dependen del lugar donde se requiere tomar las mediciones, ya que los rangos de temperatura dentro de un motor de combustión interna son amplios, por ejemplo:

Aplicación	Rango de temperaturas
Temperatura de admisión	-40 a 170 °C
Temperatura ambiente	-40 a 60 °C
Temperatura del líquido de enfriamiento	-40 a 130 °C
Temperatura de gases de escape	100 a 1000 °C

Los sensores de temperatura normalmente consisten de un termistor. Un termistor es un semiconductor de dos terminales cuya resistencia varía inversamente a la temperatura a la que este se encuentra, la resistencia es una función no lineal de la temperatura.

El sensor es conectado a un voltaje de referencia y como salida entrega un voltaje de acuerdo a la temperatura a la que este se encuentra, entre mayor es la temperatura del sensor, menor es la resistencia y mayor es el voltaje de salida.

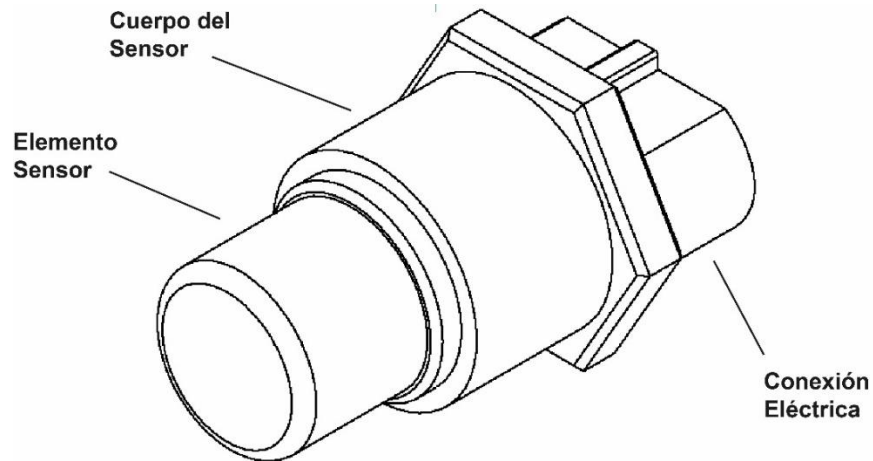


Figura 14 - Sensor de temperatura

### 3.1.2.1. Sensor de temperatura de admisión de aire (IAT)

Es el encargado en determinar la temperatura del aire en la admisión del motor. De acuerdo a esta temperatura y en conjunto con el sensor de flujo de aire, el módulo de control determina la masa de aire que está ingresando al motor. Este cálculo es importante para determinar la cantidad de combustible que debe ser inyectado.

**Por ejemplo:**

Sensor de temperatura de admisión de aire

Ubicación: entre el sensor de flujo de aire y el cuerpo de aceleración.

Funcionamiento: mediante un termistor.

### 3.1.2.2. Sensor de temperatura del sensor de oxígeno

Es el encargado de determinar la temperatura del sensor de oxígeno.

Conocer la temperatura a la que se encuentra el sensor de oxígeno, como es muy importante para el módulo de control ya que los valores arrojados por el sensor de oxígeno son dependientes de la temperatura a la que éste se encuentre; Inclusive, de acuerdo a esta temperatura el sistema de control opera en lazo cerrado o en lazo abierto.

**Por ejemplo:**

Este sistema no cuenta con este dispositivo instalado.

### 3.1.2.3. Sensor de temperatura del líquido de enfriamiento (ECT)

Se encuentra colocado dentro del flujo del líquido de enfriamiento del motor. El parámetro de temperatura del motor es importante para determinar que éste se encuentre operando en las condiciones para las que fue diseñado. También es bastante importante para determinar la operación en lazo cerrado o abierto del módulo de control.

**Por ejemplo:**

Sensor de temperatura del refrigerante

Ubicación: en la bomba de agua

Funcionamiento: de acuerdo al descrito para los sensores de temperatura.

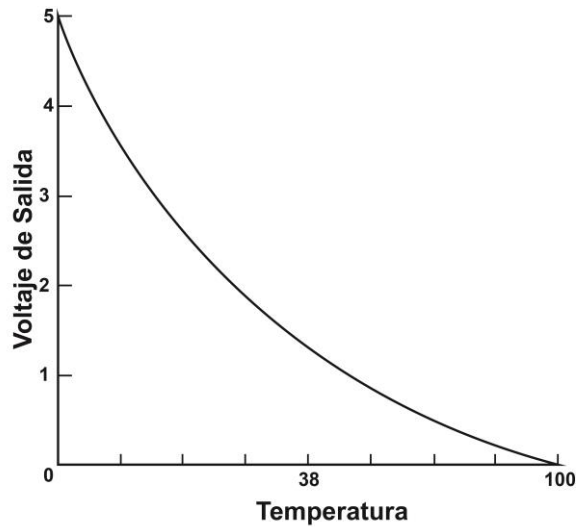


Figura 15 - Comportamiento del voltaje de salida de un sensor de temperatura del líquido de enfriamiento

### 3.1.3. Sensores de carga

Los sensores de carga determinan las condiciones y requerimientos de potencia y velocidad demandadas por el usuario o por el medio en el que está operando el motor de combustión interna.

#### 3.1.3.1. Sensores de posición del acelerador

Los motores de combustión interna encendidos por chispa operan en un amplio rango de condiciones rápidamente variables de carga y velocidades para las cuales su respuesta deber ser muy rápida. Las condiciones de carga son controladas por el acelerador que permite tener una mayor velocidad o un mayor torque.

El usuario del motor al acelerar o desacelerar requiere una respuesta rápida, pero los elementos para medir la carga del motor (sensor de flujo de aire y sensor de presión del múltiple de admisión) tardan en recibir la señal, ya que el cambio en las condiciones de flujo y presión de aire no se modifica instantáneamente. Esto requiere que los sistemas de inyección a su vez cuenten con un sensor que le diga al módulo de control los requerimientos instantáneos del conductor para una respuesta inmediata, este dispositivo es el sensor de posición del acelerador.

Los sensores de posición del acelerador se utilizan para medir el ángulo de apertura de la válvula del acelerador, cuando el conductor pisa el pedal del acelerador la válvula del acelerador gira y decrece su ángulo aumentando el flujo de aire hacia el motor, cuando el conductor suelta el pedal del acelerador el ángulo de la válvula aumenta reduciendo el flujo de aire hacia el motor. Este cierre o apertura puede darse por medios mecánicos donde la transmisión del movimiento será por un cable o electrónicos donde un

sensor en el pedal determina el grado de apertura que el conductor requiere del sistema y activa un actuador que mueve la placa.

La medición del ángulo instantáneo de la válvula del acelerador es muy importante para el sistema de control ya que permite determinar si existe una variación en lo que el conductor requiere del motor. Este sensor proporciona una información instantánea al módulo de control si se requiere una transición en la potencia otorgada del motor ya sea aumentando o disminuyendo la cantidad de combustible suministrada al motor.

El sensor de posición del acelerador también es utilizado por el módulo de control para escoger el modo en el que opera el sistema de inyección dependiendo de las necesidades del conductor se puede escoger entre dos modos de operación:

1. Potencia moderada, consumo eficiente de combustible y bajas emisiones contaminantes
2. Máxima potencia, alto consumo de combustible y altas emisiones contaminantes.

La mayoría de los sensores de posición del acelerador funcionan de acuerdo al principio de resistencia variable y normalmente son potenciómetros.

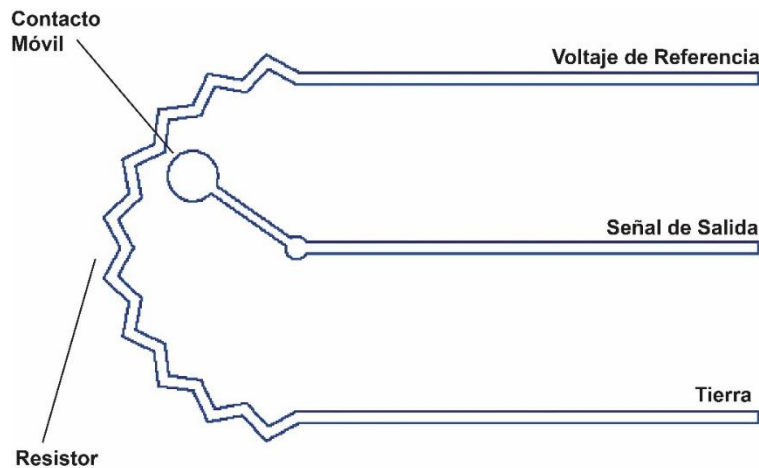


Figura 16 - Sensor de posición del acelerador

La salida del sensor de posición del acelerador es una señal de voltaje que varía de acuerdo al ángulo que tenga la placa del acelerador. En el sensor se introduce un voltaje de referencia y después de pasar por la resistencia variable la salida es un voltaje que depende de la posición de la placa del acelerador.

**Por ejemplo:**

Sensor de posición del acelerador

Ubicación: a un costado del cuerpo de aceleración, conectado directamente al eje de la válvula de mariposa.

Funcionamiento: El sensor de posición del acelerador recibe un voltaje de referencia de 5V, si la placa está completamente cerrada el voltaje de salida es de 0V y este va aumentando dependiendo de la posición hasta 5V cuando la placa está completamente abierta.

### 3.1.3.2. Sensores de flujo de aire

Los sensores de flujo de aire son utilizados en conjunto con los sensores de temperatura de admisión del aire por el módulo de control para determinar la cantidad de aire que está ingresando en determinado momento al motor.

Existen dos tipos principales de este tipo de sensores:

- Sensor de placa móvil
- Sensor de hilo caliente

#### 3.1.3.2.1. Sensor de placa móvil

Consiste en una caja por la cual pasa todo el aire que ingresa al motor. En la parte superior de esta caja se encuentra instalada una placa unida mediante una bisagra a la caja y cargada con un resorte para mantenerla cerrada, el eje de esta placa está conectado a un potenciómetro. Al entrar el aire a la caja la placa es forzada hacia una posición de apertura modificando la resistencia del potenciómetro, el sistema esta calibrado de tal forma que, el peso de la solapa, la tensión del resorte y la forma del piso de la caja es proporcional al aire que ingresa al motor de tal forma que la resistencia del sensor es modificada de acuerdo con la cantidad de aire que ingresa al motor.

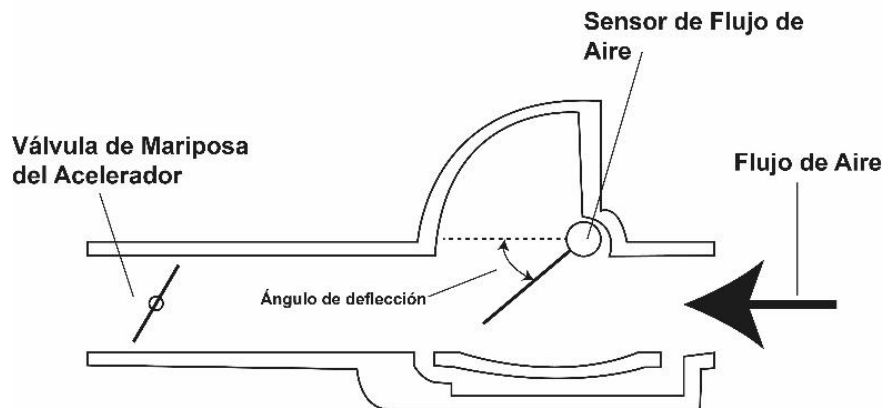


Figura 17 - Sensor de flujo de aire de placa móvil

#### 3.1.3.2.2. Sensores de hilo caliente

Los sensores de flujo de aire de hilo caliente, constan de dos alambres; uno calentado por el paso de corriente y otro de referencia a baja temperatura.

Ambos hilos se encuentran sometidos al flujo de aire, la temperatura de operación del sensor de alta temperatura es de 100 a 200°C mayor a la del ambiente y la del de baja temperatura es la del ambiente.

Estos sensores pueden ser de tipo analógico o digital, los sensores de tipo analógico tienen una señal de salida con un voltaje variable de 0 hasta 5 V, los de señal digital consisten en el mismo principio que el de tipo analógico, pero, en este caso la señal de salida de voltaje está conectado a un oscilador controlado por voltaje, esta señal en frecuencia es interpretada por el módulo de control.

**Por ejemplo:**

Medidor de flujo de aire (MAF)

Ubicación: entre el filtro de aire y el múltiple de admisión.

Funcionamiento: De acuerdo al funcionamiento de los sensores de hilo caliente digitales. La temperatura del hilo caliente es 200°C mayor a la temperatura ambiente.

La señal de salida de este sensor será digital con una frecuencia variable entre 32 y 150 mHz.

### 3.1.3.3. Sensores de presión del múltiple de admisión

Los sensores de presión del múltiple de admisión miden los cambios en presión posteriores a la válvula del acelerador respecto de la presión atmosférica que se tienen dentro del múltiple de admisión.

Este tipo de sensores se utilizan para medir la cantidad de aire que entra al motor y pueden usarse en conjunto con el sensor de flujo de aire.

Existen dos tipos de principios de funcionamiento para los sensores de presión:

- Piezoresistivo
- Capacitivo

#### Sensor piezoresistivo

Utiliza celdas de medición de presión piezoresistivas, las cuales consisten de un diafragma unido a unos piezoresistores. Cuando la presión actúa sobre la celda causa que los piezoresistores se expandan. Lo que resulta en un cambio de la resistencia dependiente de la presión. La señal de salida de este tipo de sensores es una señal de voltaje que varía desde 0 hasta 5V.

#### Capacitivo

Utiliza celdas de presión capacitivas, las cuales consisten en un chip elaborado con procesos semiconductores. Cuando la presión actúa sobre la celda, la distancia entre las superficies del capacitor es modificada lo que resulta en una modificación en la capacitancia del circuito. La señal de salida de este tipo de sensores es una señal de voltaje que varía desde 0 hasta 5V.

**Por ejemplo:**

Este sistema de inyección no cuenta con este sensor, solo utiliza la información del sensor de flujo de aire.

### 3.1.4. Sensores de lazo cerrado

Los sensores vistos anteriormente indican al módulo de control parámetros de entrada de lo que está sucediendo dentro del motor; en qué posición se encuentra, cuanto aire está entrando, que temperaturas se tienen en distintos elementos. Esta información le sirve al módulo de control para determinar las acciones que va a tomar en un momento dado.

Los sensores de lazo cerrado retroalimentan al módulo de control, estas retroalimentaciones le indican al módulo de control que tan bien está tomando las acciones y si debe modificar alguna.

En esta categoría de sensores se tiene:

- Sensores de oxígeno
- Sensores de detonación o golpeteo

### 3.1.4.1. Sensores de oxígeno

El sensor de oxígeno es uno de los elementos más importantes para determinar la relación aire-combustible del motor, este sensor mide la cantidad de oxígeno que se tiene en los gases de escape del motor. A partir de esta medición se puede obtener un cálculo indirecto de si la mezcla aire-combustible es rica o pobre. Este tipo de sensor también puede ser utilizado para determinar la eficiencia del convertidor catalítico.

Los sensores de oxígeno son construidos a partir de materiales cerámicos como; óxido de Zirconio ( $ZrO_2$ ) u oxido de Titanio ( $TiO_2$ ) siendo el óxido de Zirconio el más utilizado actualmente.

El sensor de oxígeno consiste de una pequeña sección de óxido de Zirconio con pequeños electrodos de platino en las partes interior y exterior de este. El electrodo central está expuesto a aire atmosférico, mientras el exterior a los gases de combustión del motor.

El óxido de zirconio atrae a los iones de oxígeno que se acumulan en la superficie del sensor justo en los electrodos de platino, el oxígeno en el lado del aire atmosférico es mayor que en el lado de los gases de combustión, esto genera distintas cargas en ambos lados del sensor y entonces existe una diferencia de potencial entre ambos lados del sensor. El voltaje creado es negativo del lado atmosférico y positivo de lado de los gases de combustión y la magnitud de este depende directamente de la concentración de oxígeno en los gases de combustión.

Para un sensor de oxígeno a temperatura de operación el valor para una mezcla rica es alrededor de 1[V] y para una pobre de 0.1 [V].

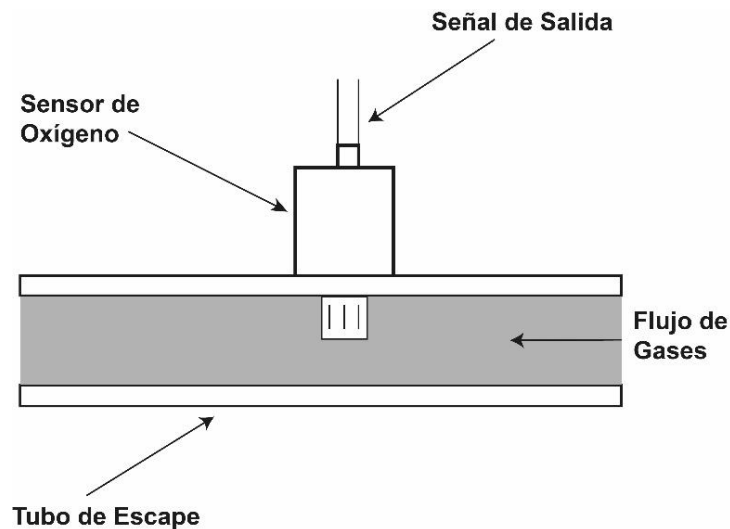


Figura 18 - Ubicación del sensor de oxígeno

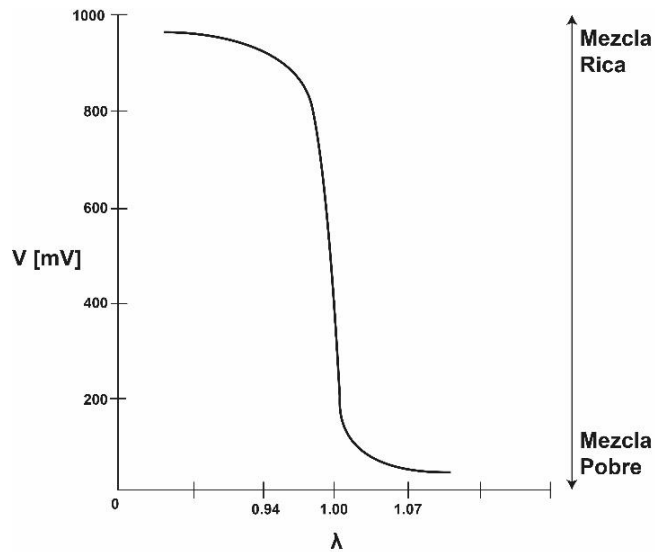


Figura 19 - Comportamiento del voltaje del sensor de oxígeno según  $\lambda$

El comportamiento de los sensores de oxígeno es dependiente de la temperatura a la que se encuentran, para su correcta operación esta temperatura debe ser mayor a 350°C por lo que se han adoptado varios métodos para que cuando inicia la operación de los motores su calentamiento sea lo más rápido posible. Entre estos métodos se encuentran:

- Colocar el sensor lo más cerca del motor
- Calentadores eléctricos

Un sensor de oxígeno frío tiene una respuesta más lenta a las variaciones de oxígeno, la cual puede ser hasta 2 veces más lenta que en las condiciones de temperatura ideales. Además de este problema la salida de voltaje también es proporcional a la temperatura de este sensor, si la temperatura es baja la salida de voltaje es mucho menor que a una alta temperatura.

Esto significa que el sensor de oxígeno no es útil para el módulo de control a bajas temperaturas por lo que, el motor debe de operar en forma de sistema de lazo abierto hasta que la temperatura del sensor llegue a una de operación en donde el sistema de control pasará a lazo cerrado.

**Por ejemplo:**

Sensor de oxígeno

Ubicación: uno en cada múltiple de escape.

Funcionamiento: De acuerdo al funcionamiento de sensores de oxígeno de óxido de titanio.

La computadora mide la señal de salida del sensor, si esta es de 450mV se considera que se tiene una mezcla estequiométrica si esta señal se encuentra sobre los 450mV la mezcla se considera rica, si es menor a 450mV se considera una mezcla pobre. La señal de salida del sensor se encuentra en un rango de 300 a 600mV

Este sensor debe de encontrarse a una temperatura mayor a 315°C para operar de manera correcta, por lo que en este motor se tiene un sensor con calentamiento eléctrico.



Entrada $V_{ref}$ [mV]	Condicionante	Salida [mV]
450	Mezcla pobre	<450
	Mezcla estequiométrica	450
	Mezcla rica	>450

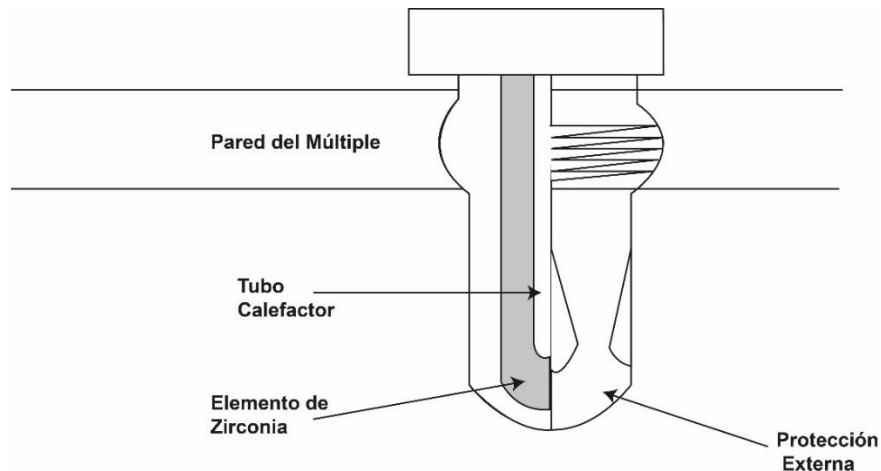


Figura 20 - Esquema de construcción del sensor de oxígeno

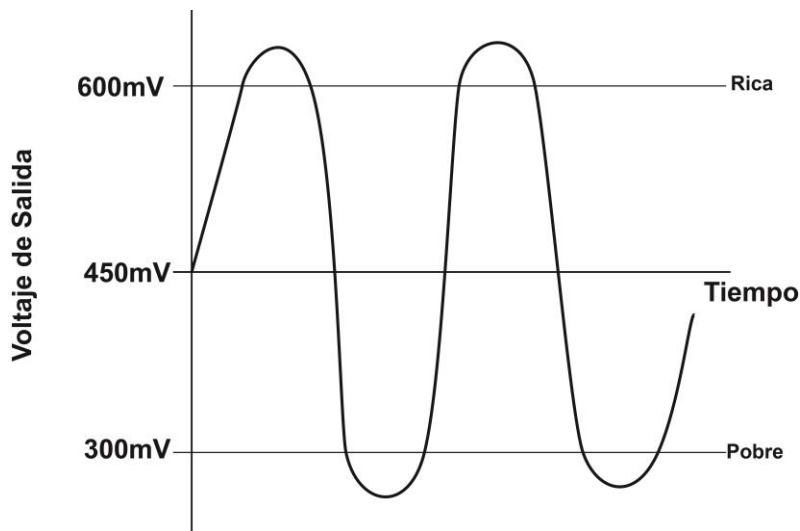


Figura 21 - Curva de operación normal del sensor de oxígeno

### 3.1.4.2. Sensores de golpeteo

El golpeteo es un fenómeno también conocido como pre ignición o cascabeleo en el que la combustión de la mezcla aire-combustible se da antes del tiempo requerido dentro de la cámara de combustión, por lo que, no existen en el motor las condiciones adecuadas para un buen funcionamiento, además de que este fenómeno puede llegar a dañar los componentes del motor.

Son los sensores encargados de dar el lazo cerrado al control del tiempo de encendido.

Los sensores de golpeteo detectan vibraciones y son calibrados para detectar las que son características del fenómeno de golpeteo dentro del motor.

Son colocados en posiciones estratégicas en el motor con la finalidad de detectar el golpeteo para cada cilindro, en motores multi cilíndricos se requiere la instalación de varios sensores.

Estos sensores pueden ser de dos tipos:

- Sensores magnéticos
- Sensores piezoeléctricos

#### 3.1.4.2.1. Sensores magnéticos

Utilizan el fenómeno de magnetoestricción.

La magnetoestricción es un fenómeno que consiste en que las propiedades magnéticas de un material son dependientes del estrés debido a una fuerza aplicada. Los materiales ferromagnéticos que se encuentran en un campo magnético tienen sus cargas alineadas en una cierta dirección, cuando una fuerza magnética externa es aplicada, estas cargas son realineadas de tal forma que sean paralelas al campo aplicado, esta reorientación genera estrés dentro del material.

Ahora bien, si estos materiales están magnetizados y son sometidos a una carga, modifican el campo magnético que existe, conocido como magnetoestricción inversa que es el principio de funcionamiento de los sensores de golpeteo.

En un sensor de golpeteo magnetoestrictivo existe un campo magnético y unas barras magnetoestrictivas que cambian el flujo del campo con las vibraciones. Estas vibraciones son transmitidas a través del cuerpo de montaje del sensor hacia las barras y generan una carga sobre las barras magnetoestrictivas

#### 3.1.4.2.2. Sensores piezoeléctricos

El fenómeno piezoeléctrico se da en ciertos materiales cristalinos, cuando estos materiales son sometidos a presiones, cargas positivas y negativas aparecen en diversas partes de la superficie del cristal.

Los sensores piezoeléctricos son sensores calibrados para vibrar en una cierta banda de frecuencias. Cuando el sensor piezoeléctrico es sometido a alguna de esas frecuencias, la vibración comienza a presionar el cristal y este a producir voltaje, cuando la vibración se encuentra en las frecuencias asociadas por el fabricante a golpeteo el voltaje producido es el mayor.

#### **Por ejemplo:**

Sensor de golpeteo

Ubicación: uno de cada lado en la parte inferior del bloque

Funcionamiento: Mediante el funcionamiento de sensores piezoeléctricos. Si existe un golpeteo la señal de salida será de 5 V, si no existe golpeteo la señal de salida será de 1.5 V

Entrada $V_{ref}$ [V]	Condicionante	Salida [V]
5	Golpeteo	5
	Sin golpeteo	1.5

## 3.2. Actuadores

Los actuadores de los sistemas de inyección de combustible en los motores de combustión interna de encendido por chispa son dispositivos que transforman señales eléctricas en salidas de diferente forma física, son los dispositivos mediante los cuales el módulo de control realiza los ajustes y operaciones necesarias en los diversos sistemas y subsistemas para el correcto funcionamiento del motor.

En general los actuadores pueden operar mediante principios neumáticos, eléctricos o hidráulicos.

### 3.2.1 Tipos de Actuadores

#### 3.2.1.1 Actuadores neumáticos

Los actuadores neumáticos están compuestos por una unidad con un diafragma que opera por medio de vacío. El vacío es suministrado por el motor de combustión interna y es llevado hacia el actuador mediante una válvula de control.

Entre las ventajas de este tipo de actuadores se encuentran: alto torque con respecto a su tamaño y un bajo costo, la principal desventaja de este tipo de sistema es la dificultad con la que se puede obtener posiciones intermedias donde normalmente se requiere de sistemas adicionales.

#### 3.2.1.2. Actuadores eléctricos

Como su nombre lo dice, los actuadores eléctricos utilizan motores eléctricos para realizar las tareas. Estos dispositivos pueden ser de tres tipos:

##### 3.2.1.2.1. Motor de pasos

Son utilizados como actuadores debido a su capacidad de moverse con gran precisión (en pasos como su nombre lo dice) este motor otorga la capacidad de contar los pasos de posición lo que permite determinar la posición relativa del eje con respecto a la inicial. Para aplicaciones sencillas no es necesario un sensor adicional para determinar la posición actual. Aunque, con estos dispositivos solo es posible obtener una posición relativa y no una posición total.

La principal desventaja de este tipo de motor es el bajo torque de salida que puede otorgar.

##### 3.2.1.2.2. Motor de corriente directa

Los motores de corriente directa son utilizados en conjunto a una caja de engranes como actuadores, las cajas de engranes pueden dar una gran versatilidad en torques y velocidades de salida.

Las ventajas de este sistema es la gran versatilidad y torque de salida, las desventajas del sistema son: complejidad en la construcción, desgaste, y que forzosamente requieren un sensor de posición para determinar la posición en la que se encuentran.

##### 3.2.1.2.3. Motor torque

Son utilizados como actuadores donde se tienen bajas demandas de torque con tiempos de respuesta rápidos.

Las ventajas de este tipo de motor son: compacto y de fácil construcción. Las desventajas son: un bajo torque de salida y un alto peso en relación con el torque de salida.

#### 3.2.1.2.4. Solenoides

Los solenoides normalmente son utilizados en lugares donde se requiere abrir o cerrar rápidamente una válvula.

Un solenoide consiste de un marco fijo de un material ferromagnético rodeado por una bobina, en la parte interior de este marco existe un elemento móvil de acero mantenido en una posición relativa mediante un resorte.

#### 3.2.1.3. Actuadores hidráulicos

Los actuadores hidráulicos son dispositivos que utilizan la presión de un fluido no compresible para realizar las tareas requeridas.

En el sistema de inyección de combustible de un motor de combustión interna los elementos que entran dentro de la categoría de actuadores son:

- Inyectores
- Válvula del acelerador
- Sistema de encendido
- Control de la marcha mínima
- Recirculación de gases de combustión
- Tiempo variable de válvulas

### 3.2.2. Inyectores

Los inyectores son las piezas más significativas de un sistema de inyección, en esencia son válvulas solenoides que permiten o interrumpen el flujo de combustible hacia el motor.

En este caso; el elemento móvil del solenoide está unido a un pivote con una punta cónica que asienta en una sección cónica formando una boquilla, detrás de la boquilla se encuentra una pequeña cámara llena de combustible a presión que comúnmente es llevado hasta ahí por un riel de inyectores.

Cuando la bobina es energizada se abre la boquilla dejando pasar combustible al motor y cuando la bobina se des-energiza el resorte fuerza el cierre de la boquilla impidiendo el paso de combustible.

Los inyectores se pueden colocar en:

- El puerto de admisión de cada cilindro
- El múltiple de admisión
- Dentro de cada cilindro

Dependiendo de esta ubicación las características de presión y temperatura a las cuales es sometido cada inyector es diferente, aunque el principio de operación es el mismo.

#### **Por ejemplo:**

Inyectores

Ubicación: Uno en cada puerto de admisión.

Funcionamiento: El sistema consiste de 8 inyectores todos conectados individualmente a una señal específica de la computadora y unidos a un riel común de inyectores el cual suministrara el combustible a una presión relativa entre el riel y el múltiple de admisión de 285 kPa controlada por un regulador de presión de combustible.

Voltaje de operación [V]	Presión de operación kPa
5	285

### 3.2.3. Válvula del acelerador

La válvula del acelerador restringe el flujo de aire hacia el motor como manera de controlar la potencia de salida de este. La posición de esta válvula puede ser controlada por dos métodos:

- Mecánico
- Electrónico

#### 3.2.3.1. Mecánico

El método mecánico para el control del acelerador consiste en una serie de elementos que transmiten el movimiento del pedal del acelerador hacia la válvula, este sistema no es de gran interés para el sistema de inyección pues este no tiene ningún control sobre la posición que se tenga en la válvula por lo que, únicamente se encarga a responder a los movimientos que esta tenga.

#### 3.2.3.2. Electrónico

El método electrónico o “*drive by wire*” para el control del acelerador consiste en un servomotor conectado a la válvula del acelerador, este servomotor es controlado por el módulo de control en respuesta a los parámetros de operación necesarios calculados por el módulo de control y en respuesta a los deseos del conductor (mediante el sensor de posición del pedal del acelerador), siempre considerando los datos clave obtenidos por medio los sensores. No existe ningún tipo de unión mecánica entre el pedal y la válvula del acelerador por lo que la posición de la válvula es totalmente independiente de la posición del pedal.

En algunos casos este sistema puede ser ocupado para funciones adicionales como pueden ser:

- El control de marcha mínima
- Control de cruceo
- Control de tracción
- Control de estabilidad.

**Por ejemplo:**

El motor cuenta con una válvula del acelerador conectada directamente al pedal.

### 3.2.4. Recirculación de gases de escape (EGR)

El sistema de recirculación externa envía una cantidad de gases desde el escape hacia el múltiple de admisión, la cantidad de gases de combustión enviada depende de: carga y velocidad del motor, debido a esto se requiere de un actuador que regule la cantidad de gases que fluyen del escape hacia la admisión.

El actuador EGR es una válvula de posición variable que regula la cantidad de gases de combustión que son enviados hacia el múltiple de admisión y puede haber de dos tipos distintos:

- Vacío
- Eléctrica

### 3.2.4.1. Vacío

Consta de un diafragma que se mantiene cerrado por acción de un resorte cuando no existe vacío en el diafragma, el vacío es producido en el múltiple de admisión y su paso es regulado hacia el diafragma mediante una válvula solenoide controlada por el módulo de control.

La cantidad de paso de gases de combustión hacia el múltiple de admisión es controlada por la presión media en el lado del diafragma que es controlada de acuerdo al ciclo de trabajo de la válvula solenoide (regulado mediante pulsos eléctricos).

### 3.2.4.2. Eléctrica

Consta de una válvula eléctrica con un sensor de posición muy sensible. La válvula abre o cierra dependiendo de las indicaciones del módulo de control. Este sistema permite una adición muy precisa de gases de combustión hacia el flujo de admisión y es el método más usado en los motores actuales.

#### **Por ejemplo:**

Recirculación de gases de escape EGR

Ubicación: en gran parte del motor.

Funcionamiento: mediante el método de vacío.

## 3.2.5. Sistema de encendido

El sistema de encendido puede ser controlado por medios mecánico – eléctricos o por el módulo de control del sistema de inyección.

Los sistemas de encendido se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Sistemas de distribuidor: constan de una sola bobina de encendido y un distribuidor que conduce la corriente producida en la bobina hacia el cilindro correspondiente.
- Sistemas de chispa perdida: constan de una o más bobinas cada una conectada normalmente a dos cilindros, cuando esta produce la chispa el alto voltaje es conducido hacia los dos cilindros a los que está conectada por lo que existe una chispa en las bujías de cada uno de los cilindros una encendiendo la mezcla y la otra se desperdicia.
- Sistemas de bobina individual: los sistemas de bobina individual constan de una bobina para cada cilindro, esta es controlada individualmente por el módulo de control y enciende la chispa en el momento indicado para cada cilindro.

Para crear la chispa de alto voltaje el módulo de control envía señales de corriente hacia la base de un transistor que permite el paso de corriente del embobinado primario de la bobina lo que genera un alto voltaje en el embobinado secundario. Este voltaje es transmitido según los métodos descritos anteriormente hacia la bujía lo que enciende la mezcla aire–combustible.

**Por ejemplo:**

Control de chispa distribuidor Optispark

Ubicación: frente al motor, directamente en el final del árbol de levas.

Funcionamiento: el distribuidor cuenta con un rotor dentro de su interior el cual conduce corriente a una de 8 puntas las cuales están conectadas mediante un cable hacia la bujía del cilindro en el que se requiere encender la mezcla. La computadora controla las señales del circuito para activar la bobina en el momento exacto.

### 3.2.6. Control de marcha mínima

El control de marcha mínima se obtiene principalmente modificando la cantidad de aire que entra el motor y se ajusta finamente con el tiempo de encendido y la cantidad de combustible suministrada al motor, utilizando la mayoría de los sensores con los que cuenta el motor. El control de flujo de aire hacia el motor es controlado principalmente mediante dos formas:

- Mediante el control de la válvula del acelerador
- Mediante una válvula adicional paralela a la del acelerador

#### 3.2.6.1. Mediante el control de la válvula del acelerador

Este sistema es aplicable en sistemas “*fly by wire*” en donde el módulo de control utiliza el actuador de la válvula del acelerador para colocarla en una posición donde pueda pasar la cantidad de aire necesaria al motor.

#### 3.2.6.2. Mediante válvula adicional

Este sistema es utilizado en sistemas que no cuentan con actuador en la válvula del acelerador, el sistema consiste en un ducto adicional a la vía principal de entrada de aire en el que se encuentra una válvula activada mediante un servomotor que dependiendo del módulo de control abre o cierra para dejar pasar cierta cantidad de aire hacia el motor.

**Por ejemplo:**

Control de ralentí Válvula IAC

Ubicación: en el cuerpo de aceleración, debajo de las válvulas principales se encuentra un ducto de bypass con la válvula.

Funcionamiento: De acuerdo al método de válvula adicional.

### 3.2.7. Tiempo variable de válvulas

Los actuadores del tiempo variable de válvulas son diseñados de acuerdo al tipo de dispositivo de tiempo variable de válvulas con el que cuente el motor.

### 3.2.7.1. Tiempo variable con apertura fija

Actualmente es el método más utilizado en los sistemas de tiempo variable. El sistema consiste en variar el momento en el que la válvula es abierta o cerrada en relación al giro del cigüeñal, pero, no modifica ni la cantidad de apertura ni la duración de esta.

Todos los sistemas utilizados en los motores de combustión interna de producción se encuentran ubicados en el sistema impulsor del árbol de levas y mediante actuadores hidráulicos o electrónicos modifican la posición angular del árbol de levas con respecto del cigüeñal.

### 3.2.7.2. Apertura Variable

Consiste en modificar el tiempo o la cantidad de apertura de la válvula, normalmente los actuadores se encuentran localizados en los balancines y permiten modificar la superficie de contacto entre estos y el árbol de levas.

Los sistemas de apertura variable normalmente son utilizados en conjunto con los de tiempo variable.

El sistema es muy versátil ya que puede aumentar la potencia en cada cilindro o puede inactivarlo para reducir el consumo de combustible en ciertas circunstancias.

Actualmente están surgiendo sistemas que no utilizan árbol de levas, en su lugar utilizan para cada válvula un actuador electromecánico que permite modificaciones tanto al tiempo como a la amplitud de la apertura.

## 3.3. Módulo de control electrónico

También conocido ECM del inglés *Engine Control Module* o Modulo de control del motor, el módulo de control electrónico es el encargado de calcular y enviar señales de salida hacia los actuadores a partir de las señales de entrada de los sensores.

La ubicación del módulo de control depende de las características de costos de cableado y reducción de interferencia deseadas. De acuerdo con esto se requieren parámetros de diseño de resistencia a la humedad, suciedad y temperatura. La ubicación del módulo normalmente se da en tres lugares principales:

- Compartimiento del motor montado en el chasis
- Compartimiento de los pasajeros
- Compartimiento del motor montado sobre el motor

### 3.3.1. Funcionamiento básico

Las señales de los sensores son enviadas a través de un filtro hacia la computadora. A partir de las señales recibidas, el módulo de control calcula a partir de parámetros preestablecidos programados en la memoria, la salida que es enviada hacia los actuadores o hacia otros módulos de control.

### 3.3.2. Componentes electrónicos

Existen seis componentes básicos en los que se basa la operación del módulo de control. Estos elementos son:



### 3.3.2.1. Filtros

Algunas de las señales de los sensores son procesadas por los filtros para eliminar señales de ruido y que estas se encuentren dentro de un parámetro útil para el módulo de control.

### 3.3.2.2. Componente controlador

Este componente es ocupado para dirigir hasta cuatro actuadores a partir de las señales del micro controlador. Este componente puede monitorear las salidas para identificar; una sobre corriente, cortocircuito, voltaje y/o exceso de temperatura. A través de una interface en serie estos datos pueden ser recolectados por el micro controlador, evaluados y guardados.

### 3.3.2.3. Micro controlador

Es un controlador diseñado especialmente para aplicaciones automotrices, este cuenta con altas capacidades computacionales para evaluar las señales de entrada y dirigir a los diversos controladores.

### 3.3.2.4. Fuente de poder y regulador de voltaje

Alimenta el sistema de inyección con un voltaje constante a pesar de las condiciones variables en las que se encuentre el sistema eléctrico del motor. Este voltaje es utilizado para alimentar al módulo de control, a los sensores y a los actuadores. Este es un sistema muy importante ya que las variaciones de voltaje en estos elementos pueden causar errores de funcionamiento o la falla de los componentes.

### 3.3.2.5. Memoria

Las unidades de memoria juegan un rol muy importante en los módulos de control, en estas se aloja la información de los parámetros permanentes o temporales de operación para el micro controlador y los datos de error del sistema. La unidad de memoria permanente es la ROM del inglés *Read Only Memory* (memoria de solo lectura) y la temporal es la RAM del inglés *Random Acces Memory* (memoria de acceso aleatorio).

En la memoria ROM se guarda toda la información necesaria para que el módulo de control pueda calcular a partir de las señales de los sensores las salidas a los actuadores, entre otras características del motor.

En la memoria RAM se guarda información temporal de lo que está calculando el módulo de control o datos de operación que no son medidos constantemente por los sensores.

### 3.3.2.6. Interface CAN

Del inglés Controller Area Network CAN (controlador de red de área) es un sistema de comunicación en serie utilizado para conectar sensores, actuadores y controladores del sistema de inyección electrónico.

En este sistema los bits se transmiten en serie y con esto permite tener un menor número de receptores. Cada receptor decide de acuerdo con el identificador del remitente si la información recibida es procesada o no.

## 3.3.3. Principales tareas realizadas por el módulo de control

Las principales tareas que lleva a cabo el módulo de control para el funcionamiento de un sistema de inyección son:

### 3.3.3.1. Acondicionamiento de señales

Como se describió anteriormente las señales enviadas por los sensores pueden ser de dos tipos: analógicas o digitales. El acondicionamiento de señales consiste en tratarlas y convertirlas en voltajes y frecuencias digitales que representen señales que el micro controlador es capaz de utilizar.

### 3.3.3.2. Evaluación de la señal

Ya que la señal se encuentra en condiciones de ser utilizada por el micro controlador, es utilizada como una variable y de acuerdo a los programas guardados en la memoria del módulo de control son calculadas las señales de salida necesarias para los actuadores u otros módulos de control.

### 3.3.3.3. Señal de salida

Las señales de salida del micro controlador son utilizadas por los controladores para operar los actuadores. Estos controladores pueden ser clasificados en tres categorías:

- Controladores de baja  
Se encuentran conectados a la terminal negativa del actuador y controlan actuadores conectados permanentemente al lado positivo de la batería y cuando es necesario cierran el circuito hacia tierra. Como ejemplo de algunos de estos actuadores se encuentran: válvulas, relevadores, bobinas de ignición, interfaz lógica de controladores.
- Controladores de alta  
Se encuentran conectados a la terminal positiva del actuador y los controlan permitiendo o interrumpiendo el paso de corriente eléctrica de la batería hacia ellos, los actuadores se encuentran permanentemente conectados a tierra.
- Controladores de Puente  
Se encuentran conectados a ambas terminales del actuador. Son utilizados en actuadores que pueden presentar movimientos hacia dos sentidos.

### 3.3.4. Software utilizado

El software del sistema de inyección es la parte del módulo de control que le indica al microcontrolador la manera mediante la cual las señales de entrada serán utilizadas como variables para realizar cálculos a través de los cuales se determinan las señales de salida que se tendrán hacia los actuadores del sistema de inyección. El software se encuentra almacenado en la memoria ROM del módulo de control y requiere tener las siguientes características:

- Tener programadas las funciones de: control de motor, control de emisiones, monitoreo de fallas, ser capaz de ser reprogramado, modo de operación en caso de falla y de comunicación con otros módulos de control.
- Proveer de respuestas rápidas a nivel de operación de a lo mucho 1 segundo.

Para la elaboración del software del módulo de control existen dos estructuras funcionales relevantes; la basada en torque y la basada en la admisión de aire.

### **3.3.4.1. Estructura funcional para el control del motor basada en torque**

En esta estructura funcional todos los cálculos para las señales de salida del módulo de control (admisión de aire, suministro de combustible, tiempo de encendido, etc.) son calculados a partir de los requerimientos de torque indicados al módulo de control por los sensores.

Este sistema busca el mejor arreglo entre manejo, consumo de combustible y emisiones de escape. Actualmente es el método más utilizado en la producción de automóviles.

### **3.3.4.2. Sistema basado en la admisión de aire**

En esta estructura funcional todos los cálculos para las señales de salida son calculados a partir de la cantidad de aire admitido hacia el motor.

Es uno de los métodos más utilizados para el software de los sistemas de inyección, en estos la cantidad de combustible inyectada al motor es determinada mediante la medición de aire que entra al motor mediante el múltiple de admisión.

En este sistema se tienen tablas multidimensionales que de acuerdo con la velocidad del motor y cantidad de aire que ingresa se determina el tiempo de apertura de cada inyector, además de esto el sistema cuenta con factores de corrección que son afectados dependiendo de las señales de entrada de otros sensores.

El problema de esta estructura funcional radica en los periodos de transición que se producen cuando la válvula del acelerador se encuentra abriendo o cerrando, en estos periodos el múltiple de admisión es llenado o vaciado según sea el caso lo que genera que la medición del sensor de flujo de aire no indique la cantidad que realmente está siendo aspirada por cada uno de los cilindros.

La corrección al sistema de medición de flujo de aire se da mediante la inclusión de un sensor de presión de aire del múltiple de admisión ya que cuando el múltiple es llenado o vaciado la presión de aire dentro de él se modifica. En los periodos de transición la masa de aire que está fluyendo hacia cada cilindro se encuentra en las tablas como función de la variación en la presión en el múltiple de admisión.

## **3.3.5. Funciones del módulo de control**

Actualmente las funciones indispensables con las que debe de contar el software del módulo de control para la correcta operación del sistema de inyección son:

### **3.3.5.1. Control de la relación aire-combustible**

El regular la relación aire-combustible o “factor lambda” es uno de las tareas más importantes del sistema de inyección.

Para los sistemas anticontaminantes que cuentan con un convertidor catalítico de tres vías es necesario que la mezcla aire-combustible sea estequiométrica con un muy pequeño margen de error.

Este tipo de convertidor catalítico requiere que la mezcla aire-combustible se encuentre fluctuando con una variación de lambda de aproximadamente el 3%, el motor debe operar en ciertos momentos con exceso de aire y en otros con falta de este, para que las reservas de oxígeno del convertidor catalítico se llenen y vacíen como este requiere.

La señal del sensor de oxígeno es utilizada como un elemento de pre control para la corrección de combustible inyectada.

### **3.3.5.2. Control de recirculación de gases de escape**

La recirculación de gases de combustión hacia la admisión es un método utilizado para reducir las temperaturas pico que se alcanzan dentro de la cámara de combustión y de esta forma reducir la formación de óxidos de nitrógeno dentro de esta, además de esto el sistema ayuda a reducir el consumo de combustible en condiciones de carga media.

La recirculación de gases se puede dar de dos maneras: interna o externa, la recirculación interna se da mediante el traslape valvular y la recirculación externa se da mediante una válvula que envía los gases de escape hacia el múltiple de admisión.

### **3.3.5.3. Control de tiempo variable de válvulas**

En la enseñanza teórica las válvulas de admisión abren en el punto muerto superior al final de la carrera de escape y cierran en el punto muerto inferior terminando la carrera de admisión y las de escape abren en el punto muerto inferior después de la carrera de trabajo y cierran en el punto muerto superior terminando la carrera de escape.

En un caso real las válvulas de admisión y de escape abren o cierran antes o después del tiempo teórico, con esto mejora la eficiencia volumétrica y la capacidad de recircular internamente los gases de escape.

De acuerdo a lo anterior dependiendo del tiempo y la apertura de las válvulas se pueden realizar modificaciones a: la potencia de salida, la curva de torque, y el comportamiento de las emisiones contaminantes.

De acuerdo al punto de operación en carga y velocidad del motor de combustión interna, el tiempo y la apertura de las válvulas es variable por lo que es necesario modificar el tiempo en el que las válvulas abren y cierran para que el motor en todos los rangos de operación pueda otorgar las mejores características de salida.

### **3.3.5.4. Control anti jaloneos**

Es un método para mejorar el confort de los usuarios del vehículo y consiste en evitar repentinos cambios en el torque del motor como resultado de abrir o cerrar la válvula del acelerador. La función de corrección se encuentra activa solamente cuando ocurren oscilaciones en la velocidad del motor y por cortos periodos de tiempo.

### **3.3.5.5. Control de la válvula del acelerador**

En el método de control determinado por torque, la posición de la válvula del acelerador es calculado a partir del torque deseado del motor en un método inverso al de flujo de aire.

Este sistema calcula la masa de aire requerida para otorgar la salida de torque deseada y a partir de esta coloca la válvula del acelerador en la posición que permite el flujo de aire calculado.

### 3.3.5.6. Control de marcha mínima

El motor de combustión interna debe de estar girando para que no se apague, cuando el conductor no tiene presionado el pedal del acelerador el módulo de control debe de mantener el motor funcionando a una velocidad mínima requerida.

Las condiciones para mantener al motor girando a esa velocidad mínima pueden cambiar de acuerdo a la temperatura, presión ambiental o condiciones de carga del motor.

### 3.3.5.7. Control de golpeteo

El golpeteo es un fenómeno en el que existe un incremento rápido e indeseado en las presiones internas del cilindro. Puede ser causado por: altas temperaturas y presiones dentro del cilindro, combustible con bajo octanaje, un adelanto muy grande en el tiempo de encendido. El problema de este fenómeno es que puede ocasionar grandes daños al motor.

Uno de los métodos para evitar este fenómeno es retrasando el tiempo de encendido para lo cual se utiliza el sensor de golpeteo.

El fenómeno del golpeteo es un problema muy común en los motores actuales debido a que en las relaciones de compresiones utilizados actualmente (10 – 12) el momento de encendido en el que se da la operación más eficiente del motor es también el momento en el que se produce el fenómeno de golpeteo. Debido a la razón de la eficiencia el motor es necesario que el módulo de control opere el motor lo más cerca del punto en el que se produce el golpeteo.

El sensor de golpeteo envía la señal al módulo de control para ser evaluada, dependiendo de los límites establecidos, comparando con el ángulo que se tiene en el cigüeñal y la amplitud de la fuerza de la detonación, el módulo de control puede determinar en qué cilindro se está produciendo el fenómeno y corrige el ángulo de encendido.

Cuando existe un error en el sistema, el módulo de control retrasa la señal hacia un punto de operación menos eficiente pero seguro para la operación del motor.

### 3.3.5.8. Control del tiempo de apertura del inyector

El control de la cantidad de combustible suministrada al motor se realiza mediante la cantidad y duración de pulsos eléctricos dirigidos hacia los inyectores. En la mayoría de los sistemas de inyección utilizados actualmente, el riel de inyectores al cual están conectados los inyectores se encuentra a una presión relativa constante con lo que se asegura que el combustible suministrado para un mismo tiempo de apertura dado del inyector es el mismo. Los casos para los que la presión de combustible es variable son menores y para ellos se requiere que el módulo de control calcule el tiempo de apertura del inyector de acuerdo a la presión a la que este se encuentre.

## 3.3.6. Métodos de seguridad

Debido a que una falla en el sistema de inyección puede causar graves daños físicos a personas y a la propiedad, es necesario que se adopten medidas de seguridad para evitar que esto suceda.

Es requerido por ley que el sistema de control del motor sea capaz de reconocer errores en el sistema y en caso de que existan poder llevarlo a un estado seguro en menos de 500 milisegundos. Para lograr esto es necesario que el sistema de control cuente con las siguientes propiedades:

- La posición del pedal del acelerador es monitoreada por dos sensores de posición independientes.
- La posición de la válvula del acelerador es monitoreada por dos sensores independientes.
- Debe de contar con una unidad adicional monitoreando el sistema de control que es independiente del procesador principal.
- La computadora cuenta con diversas funciones de seguridad.

Las funciones de seguridad del módulo de control son divididas en tres niveles distintos:

Nivel 1: Funciones para controlar el motor incluyendo transformar la posición del pedal del acelerador en una apertura de la válvula del acelerador.

Nivel 2: Monitorea los procesos llevados a cabo en el nivel 1 con un enfoque en las funciones que podrían causar un incremento no deseado de torque en caso de un error. Es diseñado de tal manera que realiza algunas de las funciones también llevadas a cabo en el nivel 1 pero no utiliza los mismos datos. Calcula dos juegos de resultados, uno con los datos del nivel 1 y otros con el suyo, al ser comparados estos datos el sistema puede determinar si existe o no una falla en el sistema y decidir cómo se procederá.

Nivel 2': Es una copia de los procesos que lleva a cabo el nivel 2.

Nivel 3: Monitorea el procesador. Es ejecutado entre la computadora y la unidad de monitoreo. La unidad de monitoreo revisa la ejecución del programa, las instrucciones dadas y el área de memoria. Además de esto la unidad de monitoreo otorga a la computadora tareas aritméticas y revisa sus respuestas.

# Capítulo 4. Sistema de diagnóstico a bordo y reducción de emisiones contaminantes

## 4.1. Reducción de emisiones contaminantes

Los motores de combustión interna encendidos por chispa emiten una variedad de productos contaminantes hacia el ambiente, entre los cuales se encuentran:

- Dióxido de carbono
- Monóxido de carbono
- Hidrocarburos parcialmente quemados
- Hidrocarburos no quemados
- Óxidos de nitrógeno
- Partículas (hollín, sulfatos, cenizas, residuos debidos a la abrasión, residuos debidos a la corrosión, etc.)
- Componentes gaseosos (bencenos, toluenos, aldehídos, etc.)

En los años 40 surge la necesidad de reducir la cantidad de estos productos que son emitidos hacia el ambiente. Por esta razón, se empezaron a desarrollar diversos métodos y sistemas que reducen la cantidad de estas emisiones. Algunos de estos métodos son controlados por el módulo de control del vehículo (mezcla aire-combustible, recirculación de gases de combustión, tiempo de encendido, control de válvulas) y otros son establecidos por la construcción del motor o de sus componentes (diseño de la cámara de combustión, cantidad de válvulas, convertidor catalítico). A continuación, se describen los métodos más relevantes:

### 4.1.1. Formación de mezclas

La formación de la mezcla aire-combustible es una de las maneras más efectivas de controlar las emisiones de gases producto de la combustión contaminantes. Estas emisiones son dependientes de la mezcla formada, por ejemplo: una mezcla ligeramente pobre producirá una mayor cantidad de óxidos de nitrógeno que una ligeramente rica.

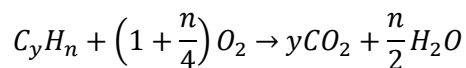
### 4.1.2. Convertidor catalítico

Es el componente esencial del sistema de reducción de emisiones contaminantes. Su trabajo consiste en oxidar monóxido de carbono e hidrocarburos parcialmente o no quemados en dióxido de carbono y agua, también reducir los óxidos de nitrógeno a nitrógeno y oxígeno. Aunque este es un dispositivo externo al motor, el módulo de control juega un importante rol en su correcto funcionamiento controlando la mezcla aire-combustible y monitoreando su eficiencia.

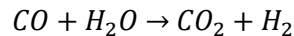
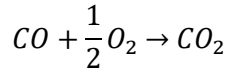
Un convertidor catalítico está compuesto por los metales: Platino, Paladio y Rodio dispuestos a lo largo de un material cerámico o metálico poroso dispuesto en forma de panal. Algunos de los materiales de los cerámicos utilizados son: alúmina, oxido de silicio u oxido de titanio.

Las reacciones que ocurren en el convertidor catalítico para reducir los productos más contaminantes de los gases de escape del motor son las siguientes:

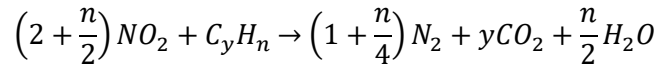
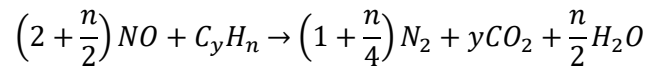
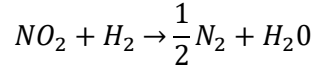
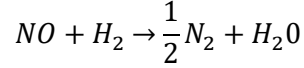
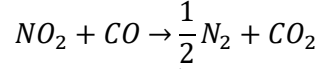
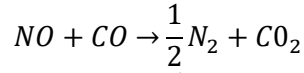
- Oxidación de monóxido de carbono e hidrocarburos en dióxido de carbono y agua







- Reducción de óxidos nitrosos en nitrógeno



Dependiendo del método de funcionamiento del motor de combustión interna (estequiométrico o pobre) es necesario un enfoque distinto para la conversión de los productos de la combustión.

#### 4.1.2.1. Enfoque para sistemas estequiométricos

El enfoque utilizado en motores de combustión interna que utilizan una mezcla estequiométrica para su funcionamiento consiste en un convertidor catalítico de tres vías. Este convertidor realiza las reacciones descritas anteriormente. Para poder realizar este tipo de reacciones es necesario que el convertidor catalítico cuente con un almacenamiento de oxígeno, para tener esta capacidad se agrega el compuesto de Cerio ( $Ce_2O_3$ ).

El sistema de inyección suministra al motor una mezcla aire–combustible oscilante entre rica y pobre pero muy cerca de la zona estequiométrica. Cuando la mezcla aire–combustible suministrada por el sistema de inyección al motor es pobre existe una cantidad de oxígeno disponible en los gases de escape que es almacenada por el convertidor catalítico y cuando la mezcla es rica existe una cantidad de oxígeno disponible menor en los gases de combustión y el convertidor catalítico es encargado de suministrar el oxígeno almacenado a los gases producto de la combustión oxidándolos.

#### 4.1.2.2. Enfoque para sistemas con mezcla aire–combustible pobre

El convertidor catalítico de tres vías no es útil en los motores que funcionan con una mezcla aire–combustible pobre. El oxígeno en exceso de esta mezcla impide que la conversión de las emisiones contaminantes sea la adecuada por lo que se han buscado métodos alternativos para realizar esta función entre los cuales se tienen:

- Descomposición directa de óxidos de nitrógeno
- Tecnologías plasma
- Reducción catalítica selectiva
- Convertidores catalíticos con almacenamiento de óxidos de nitrógeno

Actualmente las primeras dos opciones únicamente se han probado en laboratorios y aun no son viables para el uso de automóviles debido a que tienen una corta vida útil o requieren de un suministro de diferentes reactivos. La cuarta opción, los convertidores catalíticos con almacenamiento de óxidos de nitrógeno es la tecnología utilizada en los automóviles actuales.

Los convertidores catalíticos con almacenamiento de óxidos de nitrógeno consisten en un material metálico como bario o potasio con el cual los óxidos de nitrógeno reaccionan formando un nitrato del material correspondiente, el nitrato es almacenado y el material es consumido mientras el motor funciona con una mezcla aire-combustible pobre. Cuando el material es agotado, el motor cambia momentáneamente su método de funcionamiento a uno con una mezcla rica la cual regenera el material del convertidor catalítico descomponiendo los nitratos hasta llevarlos en nitrógeno diatómico.

### **4.1.3. Control de válvulas**

El control de válvulas que se maneja con el tiempo variable permite reducir las emisiones contaminantes y el consumo de combustible.

Esto es controlado mediante el tiempo de apertura y cierre de las válvulas y longitud de apertura. En algunos casos también cerrando completamente los cilindros.

### **4.1.4. Recirculación de gases de escape**

Consiste en redirigir los gases producto de la combustión que se encuentran en el ducto de escape hacia la admisión de aire del motor para sustituir una porción de aire fresco. El propósito de esto es disminuir la temperatura pico alcanzada dentro de la cámara de combustión ya que los gases de escape son capaces de absorber una gran cantidad de calor de acuerdo a los principios de disociación.

Al disminuir la temperatura de la cámara de combustión se evita la formación de óxidos de nitrógeno.

La cantidad de gases de combustión agregados no debe de exceder el 15% ya que mezclas con una cantidad mayor tendrán una mayor emisión de combustible no quemado y un comportamiento en ralentí errático.

### **4.1.5. Sistemas de ventilación de tanque**

Una gran fuente de emisión de hidrocarburos consiste en la evaporación del combustible que se tiene en el tanque. Existen sistemas de ventilación del tanque de combustible cuya tarea es prevenir que estos vapores formados en el tanque sean expulsados hacia la atmósfera.

Para esto, los sistemas utilizan un filtro de carbón activado el cual absorbe el combustible y permite la salida del aire hacia la atmósfera. Cuando el motor se encuentra operando este filtro es regenerado mediante un flujo de aire que lleva el combustible del filtro hacia el motor para que este sea quemado.

## **4.2. Sistema de diagnóstico a bordo (OBD)**

El sistema de diagnóstico a bordo es desarrollado a partir de la necesidad de que los automóviles tengan la capacidad de monitorear los elementos del sistema de reducción de emisiones contaminantes y en caso de una falla poder informar al usuario del vehículo para que de esta forma se proceda a la reparación de este. Inicialmente esta consistía en su única labor, pero posteriormente se fueron agregando capacidades

de diagnóstico hacia más sistemas y componentes del vehículo, llegando hasta el punto en que todos los componentes de control de un automóvil están conectados a este sistema.

### 4.2.1. Diagnóstico

El sistema debe de monitorear la operación adecuada de todos los componentes relevantes a la emisión de gases contaminantes. Si un error es encontrado, los componentes problemáticos son localizados y las condiciones en las que se produjo el error son guardadas mediante un código. Está programado para encender una luz de advertencia en el tablero de acuerdo al tipo de error o su frecuencia.

El vehículo cuenta con un puerto de conexión para la herramienta de diagnóstico. La herramienta en su forma más básica es una interfaz que se conecta a la computadora del automóvil y es capaz de proporcionar al usuario detalles específicos del tipo de falla mediante un código de falla que es un número único de identidad para cada respectiva falla expresado en sistema hexadecimal.

En los vehículos modernos no existe un dispositivo donde se puedan almacenar todas las fallas posibles por lo que es necesario que el puerto de diagnóstico se encuentre conectado hacia todos los módulos de control, la herramienta de diagnóstico accesa uno por uno a los módulos y en caso de existir un código lee el error grabado.

El método para realizar este diagnóstico ha sido estandarizado por la sociedad de ingenieros automotrices (SAE) y es llamado OBD-II (On Board Diagnostics).

#### 4.2.1.1. Monitoreo de los componentes y subsistemas del sistema de reducción de emisiones contaminantes

Para la revisión de los componentes y subsistemas del sistema de reducción de emisiones contaminantes, el sistema de diagnóstico a bordo cuenta con “monitores” los cuales son encargados de revisar y determinar que todos los componentes se encuentren funcionando correctamente. Dependiendo de los sistemas de reducción de emisiones contaminantes con el que estén equipados los automóviles fabricados actualmente pueden contar con algunos o todos los monitores. Estos monitores realizan diferentes pruebas preestablecidas por los fabricantes para determinar que los componentes que les corresponde evaluar se encuentren en correcto funcionamiento. Estas pueden ser de dos tipos:

- Intrusivas: la prueba requiere un cambio en el funcionamiento del componente que está revisando por lo que este componente deja de operar o modifica su comportamiento de acuerdo a las necesidades de la prueba realizada por el monitor.
- No intrusivas: la prueba al componente se realiza con el componente operando en las condiciones necesarias por el sistema de inyección y no requiere que este tenga ningún cambio para realizarla.

Para la realización de algunas de estas pruebas es necesario que el motor se encuentre dentro de ciertos parámetros de operación, las pruebas no se llevarán a cabo a menos que el motor opere precisamente dentro de estos parámetros. El fabricante de cada automóvil establece un “ciclo de manejo” que cumple con los parámetros de operación en el tiempo adecuado para activar ya sea todos o cada uno de los monitores, este ciclo de manejo puede cambiar también de acuerdo con la marca y modelo del vehículo.

Por ejemplo, revisemos el caso del ciclo de manejo para el motor Chevrolet LT1:

**Tabla 2 – Ciclo de manejo del motor Chevrolet LT1**

<b>Condiciones de prueba</b>	<b>Monitores en revisión</b>
Encendido en frío (temperatura del motor inferior a 50°C)	
2.5 minutos en ralentí	Calentador del sensor de oxígeno, Detección de condiciones inadecuadas de ignición en los cilindros, Sistema de Combustible, Sistema antievaporativo
Acelerar a 88 km/h a medio acelerador	Detección de condiciones inadecuadas de ignición en los cilindros, Sistema de Combustible, Sistema antievaporativo
3 minutos de manejo a 88 km/h en estado estable	Detección de condiciones inadecuadas de ignición en los cilindros, Recirculación de gases de escape, Inyección de aire secundaria, Sistema de Combustible, Sistema antievaporativo, Sensor de oxígeno
Desacelerar a 32 km/h sin clutch y sin freno	Recirculación de gases de escape, Sistema de Combustible, Sistema antievaporativo
Acelerar a 88 – 100 km/h a ¾ de acelerador	Detección de condiciones inadecuadas de ignición en los cilindros, Sistema de Combustible, Sistema antievaporativo
3 minutos de manejo a 88 – 100 km/h en estado estable	Monitor del convertidor catalítico, Detección de condiciones inadecuadas de ignición en los cilindros, Recirculación de gases de escape, Sistema de Combustible, Sensor de oxígeno
Desacelerar a 0 km/h sin freno	Recirculación de gases de escape, Sistema antievaporativo
Fin del ciclo	

A continuación se muestran los monitores más comúnmente instalados actualmente:

#### 4.2.1.1.1. Monitor del sistema de detección de condiciones inadecuadas de ignición en los cilindros

Este monitor es encargado de determinar condiciones en las que la mezcla aire-combustible no fue encendida dentro del cilindro. Esto causa que en los gases de escape exista una concentración mayor de hidrocarburos. Los hidrocarburos adicionales existentes en los gases de escape incrementan las emisiones contaminantes del vehículo y si su concentración es muy alta pueden dañar gravemente al convertidor catalítico. Este monitor se encuentra funcionando continuamente y cuenta el número de fallas existentes en un periodo establecido de vueltas del motor, de acuerdo con el porcentaje de fallas en el periodo establecido el monitor determina la existencia o no de una falla.

##### Forma de monitoreo de detección de condiciones inadecuadas de ignición en cilindros

El cigüeñal de un motor de combustión interna se acelera cada vez que un pistón es encendido, si no existe encendido el cigüeñal desacelera. El monitor utiliza este fenómeno para determinar si el pistón correspondiente encendió. Por lo que se encuentra monitoreando la velocidad del cigüeñal.

Debido a que diversos factores pueden variar la velocidad de giro del cigüeñal (forma del camino, temperatura del motor, cambios en la posición del pedal del acelerador), el monitor también se encuentra evaluando muy de cerca las señales de otros sensores del automóvil (posición del acelerador, velocidad de las ruedas, temperatura del refrigerante) para no dar falsos positivos.

#### 4.2.1.1.2. Monitor del sistema de combustible

Este monitor es encargado de determinar que las correcciones de la mezcla aire–combustible realizadas por el sistema de inyección sean las adecuadas. El monitor revisa que la mezcla aire–combustible no sea rica incrementando las emisiones de hidrocarburos y dañando el convertidor catalítico o pobre reduciendo la potencia del motor e incrementando las emisiones de óxidos de nitrógeno. También es uno de los monitores que se encuentra funcionando continuamente.

##### Forma de monitoreo del sistema de combustible

Mediante los sensores de oxígeno se encarga de revisar que la mezcla no sea demasiado rica o pobre y que el sistema de corrección de la mezcla aire–combustible a corto y largo plazo sea capaz de mantener la mezcla en el rango preestablecido.

#### 4.2.1.1.3. Monitor del sistema de sensores de oxígeno

Debido a que el sensor de oxígeno es uno de los elementos más importantes en el sistema de control de emisiones y que debido a las condiciones en las que opera su falla es muy probable, es necesario revisar que este se encuentre funcionando correctamente.

##### Forma de monitoreo del sistema de sensores de oxígeno

Para monitorear el correcto funcionamiento del sensor de oxígeno el monitor realiza las siguientes pruebas:

El sistema cuenta la cantidad de cruces de voltaje entre mezcla rica y pobre a través del voltaje de referencia que el sensor tiene. Si el sensor no realiza los cruces necesarios en un tiempo preestablecido se emite un código de error.

El sistema busca voltajes fuera de rango o fijos que indiquen que existe alguna falla en el circuito o que el sensor se encuentra fuera de funcionamiento.

#### 4.2.1.1.4. Monitor del sistema de componentes integrales

Este monitor se encarga de monitorear que los elementos del sistema de inyección que no se encuentran contemplados para su revisión por los demás monitores.

##### Forma de monitoreo del sistema de componentes integrales

El sistema tiene dos métodos para revisar el correcto funcionamiento de los componentes: primero evalúa las señales de entrada y salida, los circuitos son revisados por continuidad y las señales son revisadas por valores fuera de especificación. Después compara las señales que se tienen de diferentes sensores para realizar pruebas de racionalidad, lo que revisa que los sensores estén dando valores coherentes a lo que está sucediendo dentro del motor.

#### 4.2.1.1.5. Monitor de eficiencia del convertidor catalítico

El monitoreo del convertidor catalítico es necesario para establecer que el funcionamiento del convertidor es el óptimo para que la reducción de emisiones contaminantes se encuentre dentro de los parámetros establecidos por el fabricante.

##### Forma de monitoreo de eficiencia del convertidor catalítico

Un convertidor catalítico es deficiente cuando las emisiones de hidrocarburos u óxidos de nitrógeno que salen de este exceden el límite para el cual el convertidor fue diseñado.

El sensor de oxígeno del sistema de inyección se encuentra colocado antes del convertidor catalítico, para ayudar al monitoreo del convertidor catalítico es necesario instalar un sensor posterior a este. El sensor es utilizado para medir la cantidad de oxígeno almacenado en el convertidor.

La capacidad de almacenamiento de oxígeno de un convertidor catalítico es afectada con el uso. Un convertidor catalítico nuevo tiene una mayor capacidad de almacenamiento que uno viejo.

Cuando la mezcla aire-combustible suministrada por el sistema de inyección al motor es pobre existe una cantidad de oxígeno disponible en los gases de escape que es almacenada por el convertidor catalítico y cuando la mezcla es rica existe una cantidad de oxígeno disponible menor en los gases de combustión y el convertidor catalítico es encargado de suministrar el oxígeno almacenado a los gases producto de la combustión oxidando algunos gases producidos. Por este motivo si el convertidor catalítico se encuentra en buenas condiciones el sensor de oxígeno posterior al convertidor catalítico no recibe una cantidad de oxígeno en los gases de combustión fluctuante, más bien una cantidad constante.

Entonces el procedimiento de monitoreo del convertidor catalítico consiste en lo siguiente:

El módulo de control del motor determina la amplitud de las señales de los sensores de oxígeno antes y después del convertidor catalítico y obtiene la relación entre la amplitud de entrada y la de salida. Una relación igual o cercana a uno significa, que la conversión del convertidor catalítico es mala. Si la conversión del convertidor catalítico aumenta el resultado de la relación disminuye.

Otra forma de monitorear el funcionamiento del convertidor catalítico consiste en monitorear la temperatura previa y posterior a este mediante sensores de temperatura. Debido a que las reacciones que ocurren dentro del convertidor catalítico son exotérmicas, la temperatura de los gases de escape aumenta después de pasar por el convertidor catalítico. El aumento de temperatura es proporcional a la eficiencia del convertidor.

#### 4.2.1.1.6. Monitor del sistema de recirculación de gases de escape (EGR)

El ambiente en el que los componentes del sistema de recirculación de gases de escape opera, cuenta con condiciones muy adversas las cuales pueden causar que uno o varios de los elementos de este sistema tenga un mal funcionamiento incrementando así las emisiones de óxidos de nitrógeno. Es por esto que es necesario mantener una revisión cercana del correcto funcionamiento de estos componentes.

##### Forma de monitoreo del sistema de recirculación de gases de escape (EGR)

El sistema revisa que todos los circuitos y componentes se encuentren funcionando de acuerdo con los valores de voltajes y corrientes preestablecidos. Además de esto, de acuerdo a las características de diseño del automóvil en ciertas condiciones el monitor activa o desactiva el flujo de gases de escape hacia el motor y revisa muy de cerca los cambios en la corrección de combustible mediante el sensor de oxígeno.

Si el sistema permite el flujo de gases de escape se espera que una menor cantidad de aire fresco ingrese a los cilindros por lo que el módulo de control deberá reducir la cantidad de combustible suministrado, en el caso contrario, si el flujo de gases de escape es interrumpido se espera que el módulo de control aumente la cantidad de combustible suministrado.

#### 4.2.1.1.7. Monitor del sistema antievaporativo

Este monitor revisa que los componentes del sistema antievaporativo se encuentren en correcto funcionamiento, con esto evitando que combustible se evapore hacia la atmósfera.

##### Forma de monitoreo del sistema antievaporativo

El monitoreo de este sistema se da utilizando dos métodos:

Mediante sensores de presión: el sistema es dividido en secciones y cada una de ellas es dotada de sensores de presión, la prueba se da generando una presión de vacío en las secciones mediante el múltiple de admisión o una bomba de vacío y toma el tiempo en el que cada sección tarda en regresar a la presión atmosférica, un tiempo muy corto indica una fuga en alguno de los elementos de esa sección. Otra forma es mantener la presión de vacío constante y contando la cantidad de veces que se debe de tener una succión para mantener la presión, un gran número de veces indica una fuga en el sistema, por lo que se genera un código de error.

Mediante la corrección de inyección de combustible: cuando el motor se encuentra en funcionamiento el sistema abre la válvula de vacío que lleva hacia el tanque de recuperación de vapores. Si el sistema se encuentra funcionando correctamente el monitor espera ver un enriquecimiento de la mezcla aire-combustible, si no existe el enriquecimiento esperado en la mezcla significa que el sistema no está funcionando adecuadamente y se genera un código de error.

#### 4.2.1.1.8. Monitor del sistema de inyección de aire secundario

Se encarga de revisar que el sistema de inyección de aire hacia el catalizador se encuentre funcionando correctamente.

##### Forma de monitoreo del sistema de inyección de aire secundario

Este monitor utiliza los sensores de oxígeno del sistema de inyección.

El monitor busca el cambio de señal en el sensor de oxígeno posterior al convertidor catalítico que se da cuando el sistema de inyección entra en modo de control de lazo cerrado y cierra la entrada de aire secundario hacia el catalizador.

Otra forma de realizar esta revisión se da cuando el motor se encuentra encendido y operando en lazo cerrado, el sistema enciende la bomba de aire secundario y busca el cambio de voltaje en el sensor de oxígeno posterior al convertidor catalítico. Normalmente esta prueba no se efectúa a menos que el sistema no pase la prueba anterior.

## 4.3. Regulaciones legales

Debido a la importancia dada a la reducción de emisiones contaminantes de los vehículos impulsados por motores de combustión interna, todos los países iniciaron a formular una normatividad que permita regular la cantidad de productos contaminantes emitidos por los motores de combustión interna. El

estado de California en los Estados Unidos de América fue pionero en incursionar en esta normatividad en los años 40, y fue seguido por los países europeos en los años 60.

La normatividad establecida en los distintos países se enfoca en regular la emisión de solo algunos de los productos contaminantes que son: dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y partículas. Esta normatividad regula la emisión de estos productos en diferentes unidades como: gramos/km, gramos/prueba, gramos/milla.

Las normas establecidas más importantes y estrictas aplican para vehículos nuevos y aunque existe una gran variedad de estas, las más importantes según la región en la que se aplican son:

- Estados Unidos de América: Estándares de emisiones máximas como el Estándar Nacional de Vehículos de Bajas Emisiones (NLEV) basados en el procedimiento de prueba FTP 75 con ciclos de prueba añadidos SC03 y US06
- Europa: Límites de emisiones contaminantes basados en los métodos de prueba EC ECE 15/04 y EC MVEG-A
- Japón: Límites de emisiones contaminantes basados en: el modo de prueba 10.15 y el modo de prueba en frío 11

### 4.3.1. Normatividad Mexicana

Actualmente en México existen varias normas que regulan las emisiones contaminantes de los vehículos con un peso entre 400 y 3857 kilogramos. En este rango de pesos se encuentran la mayoría de los automóviles impulsados por motores de encendidos por chispa, entre los cuales se encuentran: vehículos particulares, camionetas utilitarias y camiones ligeros.

Estas normas tienen dos enfoques distintos; uno es regular las emisiones contaminantes para vehículos nuevos que serán vendidos en México, y el otro es regular las emisiones contaminantes de vehículos que ya circulan en México.

#### 4.3.1.1. Enfoque para vehículos nuevos

Los vehículos nuevos son regulados por la norma oficial mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003.

Esta norma establece los niveles máximos de emisión de productos contaminantes para los vehículos automotores nuevos que son fabricados o importados en México y aplica para aquellos que utilizan como combustibles: gasolina, gas natural, diésel o gas licuado de petróleo.

Cuenta con una clasificación que depende el uso del vehículo, su peso, el estándar de durabilidad (kilómetros recorridos en los cuales el vehículo debe de mantener emisiones iguales o menores a los establecidos) y el año en el que es fabricado. El valor máximo de emisiones contaminantes se asigna de acuerdo a la clase de cada vehículo.

Establece que para evaluar los niveles de emisión de contaminantes producidos por un vehículo se debe realizar la prueba correspondiente a la norma mexicana NMX-AA-11-1993-SCFI “Método de prueba para la evaluación de emisiones de gases del escape de los vehículos automotores nuevos en planta que usan gasolina como combustible”. Entre otras cosas esta norma establece:

- El equipo a utilizar para la medición, las normas que este debe de cumplir y como deben de ser calibrados los equipos.



- La forma en la que se opera el vehículo durante la prueba y como proceder a las posibles eventualidades.
- La manera en la que se realiza la medición de emisiones contaminantes y los cálculos correspondientes a estos.

La prueba correspondiente a esta norma se realiza sobre un dinamómetro que es calibrado para representar las características de carga e inercia del vehículo, y consiste en un ciclo de manejo que representa las condiciones a las cuales un vehículo es sometido (arranque en frío, periodos de aceleración, periodos de desaceleración, periodos de velocidad constante, y arranque en caliente). Al final de la prueba, mediante los cálculos establecidos se determinan las emisiones del vehículo.

Para el caso de vehículos con procedencia extranjera es válido presentar un certificado de cumplimiento con las emisiones máximas establecidas en la NOM-042-SEMARNAT-2003 emitido por un laboratorio acreditado por las autoridades de protección al ambiente del país de origen de este.

#### 4.3.1.2. Enfoque para vehículos en circulación

Las emisiones contaminantes de los vehículos en circulación son reguladas por la NOM-041-SEMARNAT-2015 (NOM-041).

Establece los niveles de emisión de contaminantes máximos permisibles para vehículos que se encuentran en circulación y que utilizan como combustible la gasolina. Los límites de emisión de contaminantes son establecidos dependiendo del año de fabricación del vehículo. Esta norma considera dos métodos de prueba que dependen de las características de fabricación del vehículo; el dinámico para los que pueden operarse en el dinamómetro y el estático para los que no.

Los métodos de prueba considerados en esta norma se encuentran establecidos en la NOM-047-SEMARNAT-2014 (NOM-047). En esta norma se encuentran las características del equipo de medición de emisiones contaminantes, los elementos necesarios para la calibración de estos equipos, las características del comprobante de aprobación o rechazo del vehículo y el método para realizar la prueba de estas.

La prueba establecida en la NOM-047 consiste en:

- Inspección visual de la existencia y la no modificación de los componentes del sistema de control de emisiones contaminantes, fugas de aceite en el motor, fugas en el escape del motor, fugas de combustible.
- Revisión de la no existencia de la luz de falla del motor y la revisión electrónica de las fallas del sistema de diagnóstico a bordo.

Y dependiendo de las características de fabricación del vehículo:

- Método dinámico
  - Revisión visual de humo a 24 km/h. No debe de existir humo en el escape del vehículo por un periodo mayor a 10 segundos.
  - Prueba a 24 km/h (PAS Fase 5024): En el dinamómetro con una carga correspondiente al peso del vehículo o en su defecto al número de cilindros de este.
  - Prueba a 40 km/h (PAS Fase 2540): En el dinamómetro con una carga menor a la de la prueba anterior correspondiente al número de cilindros del vehículo.

- Método estático
  - Acondicionamiento del motor: en caso de que el motor no se encuentre a temperatura normal de operación mantenerlo acelerado alrededor de 2500 rpm por cuatro minutos.
  - Revisión visual de humo con el motor acelerado a 2500 rpm: no debe existir humo en el escape por un periodo mayor a 10 segundos.
  - Etapa marcha cruce a 2500 rpm: por 30 segundos con medición de las emisiones en los últimos 5 segundos.
  - Etapa de marcha lenta en vacío: con el vehículo sin carga y sin ser acelerado en su velocidad de marcha mínima por 30 segundos con medición en los últimos 5 segundos

Todas las pruebas anteriormente mencionadas se deben llevar a cabo con el vehículo encendido, pero con todos los accesorios (aire acondicionado, estéreo, etc.) apagados.

El 5 de septiembre de 2017 es publicada en el DOF la norma NOM – 167 – SEMARNAT – 2017 que establece los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para los vehículos en circulación en los estados de: Ciudad de México, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala.

Esta norma al igual que la NOM-041 incluye tablas que dependiendo del año del vehículo establecen los límites de emisión de contaminantes máximos por categoría.

En esta norma se establece como un nuevo método de prueba para los vehículos automotores vendidos en México con un año modelo 2006 y posterior, la revisión por medio del sistema de diagnóstico a bordo en la que, mediante un conector, una computadora y un software especializado se determina el correcto funcionamiento de los componentes del sistema de reducción de emisiones contaminantes. Este sistema de verificación vehicular utiliza los monitores del vehículo siendo obligatorios los de:

- Sistema de detección de condiciones inadecuadas de ignición en cilindros
- Sistema de eficiencia del convertidor catalítico
- Sistema de combustible
- Sistema de sensores de oxígeno
- Sistema de componentes integrales

En los que para aprobar la prueba es necesario que no exista ningún código de falla y todos los monitores se encuentren en estado “completado”. La Norma también menciona que en los casos en los que el auto no aprueba por el método de sistema de diagnóstico a bordo se puede realizar las pruebas dinámicas o estáticas, contempladas en la NOM-047 según corresponda al tipo de automóvil.

Para vehículos con año modelo previo al 2006 las pruebas siguen siendo las contempladas en la norma 47

# Capítulo 5. Propuesta de práctica

De acuerdo a las ventajas que tiene un motor de combustión interna de encendido por chispa con sistema de inyección sobre de uno con carburador, establecidas en los capítulos anteriores, es necesario realizar un cambio en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Aunque el principio de funcionamiento térmico del motor es el mismo, un sistema de inyección facilita la medición de sus parámetros de operación y por lo tanto la calidad de enseñanza en el Laboratorio de Máquinas Térmicas gracias a la gran cantidad de sensores y programas con los que está equipado. Además de esto la preocupación por la reducción de emisiones contaminantes continúa aumentando y es un problema que no se ha abordado con profundidad en el laboratorio, aunque la mayoría de los procesos realizados en este se encuentran relacionados con la combustión, por lo tanto, es necesario enseñar a los alumnos sobre normatividad relacionada a las emisiones contaminantes y la forma de medirlas.

Como base para la propuesta de esta práctica se tomarán en cuenta los requerimientos establecidos en el plan de estudios 2016 para la carrera de ingeniería mecánica. En este plan existen dos asignaturas impartidas en el Laboratorio de Máquinas Térmicas a las cuales sería aplicable esta práctica de laboratorio: Sistemas de conversión de energía térmica y Sistemas termoenergéticos.

Sistemas de conversión de energía térmica es una asignatura puramente práctica con una duración por práctica de dos horas que se brinda en el quinto semestre al mismo tiempo que termodinámica aplicada en la que se establece que se debe de analizar el tema de ciclo Otto cuantificando el rendimiento de la transformación de energía.

Sistemas termoenergéticos es una asignatura teórico – práctica con una duración por tema de cuatro horas, obligatoria de elección en la que se establece el tema “Análisis energético del motor de combustión interna encendido por chispa” en la que los temas a revisar son los siguientes:

- Generalidades
- Sistemas principales del motor
- Desarrollo del experimento en un banco de pruebas. Medición de flujos de combustible y potencia al freno a velocidad constante y variable.
- Visualización de las curvas de encendido y medición de los grados de avance
- Cálculo de los parámetros característicos del motor: par y potencia al freno, consumo de combustible, consumo específico de combustible, eficiencias, presión media efectiva indicada y al freno.
- Obtención de las curvas características de su comportamiento.

Aunque ambas asignaturas utilizan el mismo equipo, el perfil y conocimientos del estudiante que las toma es completamente distinto por lo que ambas tienen una finalidad distinta.

Los requerimientos de aprendizaje de los alumnos no se ven completamente expresados en los temarios establecidos en el plan de estudios de las dos asignaturas antes mencionadas, ya sea porque no están contempladas como en el primer caso o no están actualizadas como es en el segundo. Es debido a esta situación que no se puede proponer solo una práctica de laboratorio, lo que se debe de hacer es proponer dos prácticas distintas y complementarias entre sí que las cumplan.

De acuerdo con la metodología de enseñanza establecida en el Laboratorio de Máquinas Térmicas las prácticas deben de componerse las siguientes partes principales:

- Introducción teórica
- Desarrollo del experimento
- Cálculos a realizar
- Resultados a obtener

A continuación, se describen ambas propuestas con sus partes principales de la práctica:

## 5.1. Sistemas de conversión de energía térmica

### 5.1.1. Introducción teórica

De acuerdo con el mapa curricular de la carrera de ingeniería mecánica, la asignatura de sistemas de conversión de energía térmica se da de manera simultánea a la de termodinámica aplicada. De acuerdo a los calendarios de prácticas y a mi experiencia como alumno de la Facultad. Donde en la mayoría de las asignaturas la parte práctica se da antes de la parte teórica de un tema, la mayoría de los alumnos llegarán con conocimientos nulos acerca del ciclo Otto y del motor de combustión interna encendido por chispa.

De acuerdo con este principio es necesario realizar una introducción teórica para que el alumno tenga las bases necesarias para esta práctica, ya que de otra manera el alumno no podrá relacionar los conocimientos prácticos obtenidos con los teóricos.

Estos temas básicos a desarrollar pueden ser divididos en dos categorías:

- Termodinámica del motor de combustión interna de encendido por chispa
- Funcionamiento del motor de combustión interna de encendido por chispa.

Se recomienda desarrollar estos temas en el siguiente orden y de la siguiente manera:

#### 5.1.1.1. Termodinámica del motor de combustión interna de encendido por chispa

Para iniciar el desarrollo teórico de esta práctica se debe de explicar el ciclo de Otto ideal describiendo claramente los procesos termodinámicos que se llevan a cabo en cada uno de los cuatro tiempos del ciclo (compresión isentrópica, suministro de calor, expansión isentrópica y rechazo de calor) esto se debe de acompañar del diagrama P-V correspondiente.

Ya que el alumno ha comprendido el ciclo Otto ideal se procede a explicar el ciclo Otto real, teniendo énfasis en las diferencias que existen contra el ciclo real, explicando los principios; físicos, mecánicos y de construcción de un motor de combustión interna de encendido por chispa que las causan. Para explicar esto es necesario elaborar una serie de esquemas, un modelo y/o una animación que represente el movimiento del pistón dentro del cilindro. Se debe de tener un gran énfasis en estos diagramas para que a lo largo de la práctica, el alumno logre comprender lo que está ocurriendo dentro del motor y de esta forma pueda relacionar la teoría con la práctica que está a punto de realizar.

### 5.1.1.2. Funcionamiento del motor de combustión interna de encendido por chispa con sistema de inyección de combustible

Cuando el alumno conoce las bases termodinámicas bajo las cuales opera el motor de combustión interna de encendido por chispa, es conveniente que aprenda la forma en la que este funciona conociendo las partes del motor y los principales sistemas que lo componen, esto se debe de realizar de una manera rápida y concisa, pues no es el objetivo de la asignatura, pero es importante que el alumno que ingresa al Laboratorio de Máquinas Térmicas las conozca como un extra otorgado ya que, es probable que no vuelvan a tener contacto con este equipo en lo que resta de la carrera.

#### 5.1.1.2.1. Partes y sistemas del motor

El alumno debe de conocer las partes y sistemas que componen el motor de combustión interna encendido por chispa, con el objetivo de que tenga conocimiento de que existen y cuál es su función dentro del motor. Como partes se deben de mencionar aquellas esenciales del motor de combustión interna como son:

- Monoblock
- Biela
- Cigüeñal
- Pistones
- Anillos y sus diferentes tipos
- Cabeza
- Válvulas
- Árbol de levas

Y como sistemas se deben de mencionar los sistemas con su función principal como son:

- Sistema de inyección de combustible
- Sistema de reducción de emisiones contaminantes

(En los dos casos anteriores se debe de tener un mayor énfasis que en los siguientes, pues son los sistemas que más se encuentran relacionados con el objetivo del tema y la práctica).

- Sistema de lubricación
- Sistema de enfriamiento

Como parte de la explicación es conveniente que el conocimiento del alumno no se límite solo a fotos y diagramas de los sistemas del motor, sino que tenga un acercamiento a un modelo físico del motor y sus partes antes del inicio de la práctica.

Como parte final de la explicación teórica de la práctica se debe de introducir al alumno a las normas de emisiones vigentes en México. Con el propósito de que tenga conocimiento de qué se mide y qué métodos se utilizan para hacerlo.

Cuando el alumno posee estos conocimientos se puede proceder a realizar la práctica de laboratorio.

## 5.1.2. Desarrollo del experimento

El desarrollo del experimento es la parte central de esta práctica y es en esta parte en la que el alumno debe de utilizar todos los conocimientos aprendidos en la parte teórica.

Actualmente en el Laboratorio de Máquinas Térmicas no existe un motor de combustión interna encendido por chispa con sistema de inyección, así tampoco existen todas las herramientas para realizar las mediciones necesarias. Esto permite que la propuesta para el desarrollo del experimento sea libre. Lo que significa que la propuesta puede ser desarrollada de acuerdo con las necesidades de aprendizaje de los alumnos y también como base para la elección del equipo e instrumental adecuado para este.

El experimento a proponerse debe de abordar los siguientes temas:

- Potencia útil
- Consumo de combustible
- Parámetros de operación de acuerdo al ciclo Otto
- Eficiencia del ciclo
- Emisiones contaminantes

### 5.1.2.1. Fase uno del experimento: Calentamiento del motor y emisión de contaminantes del motor en frío

Esta fase del experimento es para que el motor alcance su temperatura de operación y es muy importante para que el alumno pueda observar las diferencias en las emisiones contaminantes y en el rendimiento que existen entre un motor frío y uno con temperatura de operación.

1. Con el motor apagado, preferiblemente a temperatura ambiente se conecta la herramienta de diagnóstico y se pone en modo de leer datos en vivo, se registran las temperaturas del refrigerante ( $T_R$ ) y del convertidor catalítico ( $T_{CC}$ ) y el nivel de combustible dentro del tanque de día ( $h$ ).
2. Se enciende el motor y se empieza a tomar: el tiempo ( $t$ ), la velocidad de giro en ralentí ( $N$ ) y carga inicial en el dinamómetro ( $F$ ); estas serán las condiciones en las que se llevará a cabo esta prueba. Se registran estos datos.
3. Se realiza la toma de una muestra de emisiones en el escape; HC ( $E_{HC1}$ ), CO ( $E_{CO1}$ ), CO<sub>2</sub> ( $E_{CO21}$ ), O<sub>2</sub> ( $E_{O21}$ ) y NO<sub>x</sub> ( $E_{NOx1}$ ).
4. Cuando la temperatura del catalizador ( $T_{CC}$ ) mostrada en la herramienta de diagnóstico corresponde a la de temperatura de operación establecida por el fabricante se detiene el cronómetro y se toma registro de la diferencia en el nivel de combustible del tanque de día. ( $t$ ) y ( $\Delta_c$ ) respectivamente.
5. Se realiza la fase dos del experimento
6. El motor se regresa a las condiciones de carga ( $F$ ) y velocidad de giro en ralentí ( $N$ ), correspondientes a la fase uno del experimento. Se toman las mediciones de emisiones en el escape: HC ( $E_{HC2}$ ), CO ( $E_{CO2}$ ), CO<sub>2</sub> ( $E_{CO22}$ ), O<sub>2</sub> ( $E_{O22}$ ) y NO<sub>x</sub> ( $E_{NOx2}$ ).
7. Se da por finalizada la fase uno del experimento.

### 5.1.2.2. Fase dos del experimento: Curvas de potencia y eficiencias a velocidad constante

Para esta parte de la práctica se realiza una prueba a velocidad variable del motor con el fin de encontrar las curvas de potencia y eficiencias del motor.

1. Se procede a acelerar el motor a 3000 rpm y a aumentar manualmente la carga en el dinamómetro a un valor correspondiente al tipo de motor elegido manteniendo la velocidad de giro del motor constante. Se procede a registrar las mediciones de volumen de combustible consumido durante 30 segundos ( $\Delta_c$ ), velocidad de giro del motor (N) y carga en el dinamómetro (F).
2. Se aumenta la carga en el dinamómetro en 1 [kg] y se vuelven a registrar las mediciones de volumen de combustible consumido por 30 segundos ( $V_c$ ), y carga en el dinamómetro (F).
3. El procedimiento anterior se repite 5 veces más.
4. En el séptimo evento se registran los datos de: temperatura de admisión del aire ( $T_1$ ), presión del múltiple de admisión ( $P_1$ ), temperatura de gases de escape ( $T_{4i}$ ) y gasto de aire ( $G_{aire}$ ).
5. Se da por finalizada la parte dos del experimento y se regresa a terminar la fase uno del experimento.

Las mediciones se registran en las siguientes tablas:

**Tabla 3 – Datos de la fase uno para la asignatura de sistemas de conversión de energía térmica**

Fase uno del experimento				
	CO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	NOx [ppm]	HC [ppm]
E <sub>1</sub>				
E <sub>2</sub>				

**Tabla 4 – Datos de la fase dos para la asignatura de sistemas de conversión de energía térmica**

Fase dos del experimento			
Evento	$\Delta_c$ [mm]	N [rpm]	F [kg]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
P <sub>1</sub> [kPa]	T <sub>1</sub> [°C]	T <sub>4</sub> [°C]	G <sub>aire</sub> [g/s]



### 5.1.3. Cálculos

De acuerdo con las mediciones realizadas en el experimento es necesario establecer los cálculos correspondientes para que el alumno logre relacionar las mediciones realizadas con la teoría y de esa forma logre obtener las eficiencias y parámetros de operación del ciclo Otto y el motor de combustión interna encendido por chispa.

#### 5.1.3.1. Potencia al freno

Calcular la potencia al freno del motor a partir de las mediciones de carga en el dinamómetro hidráulico.

$$W_b = T \cdot w$$
$$T = F \cdot d$$
$$w = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$$

En donde:

$W_b$  – potencia al freno [kW]

$T$  – par torsional [kN•m]

$w$  – velocidad angular [1/s]

$F$  – fuerza al freno [kN]

$d$  – brazo de palanca [m]

$N$  – revoluciones por minuto [rpm]

Sustituyendo en la ecuación se tiene:

$$W_b = \frac{F \cdot d \cdot 2 \cdot \pi \cdot N}{60}$$

#### 5.1.3.2. Energía suministrada

Calculando el volumen consumido de combustible:

$$V_C = \Delta_c \cdot A_D$$

Calculando el gasto de combustible:

$$G_C = \frac{V_C \cdot \rho}{t}$$

Y calculando la energía suministrada:

$$Q = G_C \cdot PCA_{combustible}$$

En donde:

$\Delta_c$  – Altura de combustible consumida [m]

$A_D$  – Área del depósito de combustible [m]

$G_c$  – gasto de combustible [kg/s]

$V$  – volumen de combustible consumido [m<sup>3</sup>]

$\rho$  – densidad del combustible [kg/m<sup>3</sup>]

$t$  – tiempo de consumo de combustible [s]

$Q$  – energía suministrada [kW]

$PCA_{\text{combustible}}$  – poder calorífico del combustible [kJ/kg]

### 5.1.3.3. Consumo específico de combustible

Se calcula el consumo específico de combustible.

$$CEC = \frac{G_c}{W_b}$$

En donde:

$CEC$  – consumo específico de combustible [kg/(s•kW)]

$G_c$  – gasto de combustible [kg/s]

$W_b$  – potencia al freno [kW]

### 5.1.3.4. Potencia indicada

Se calculan las pérdidas por fricción y la potencia indicada del motor a partir de la línea Willan's (Figura 22).

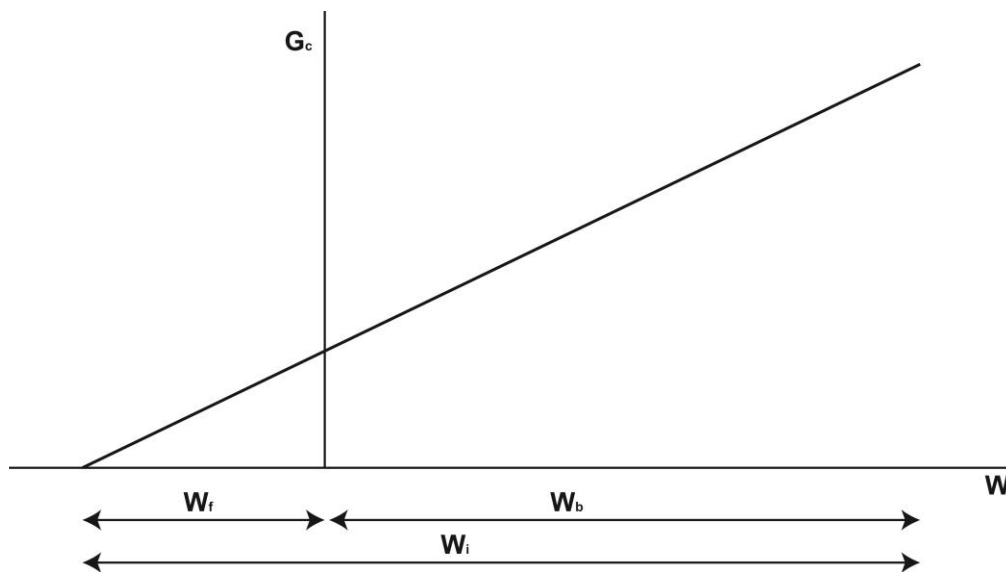


Figura 22 - Línea Willan's

$$W_i = W_b + W_f$$

En donde:

$W_i$  – Potencia indicada [kW]

$W_b$  – Potencia al freno [kW]

$W_f$  – Pérdidas por fricción [kW]

### 5.1.3.5. Parámetros de operación y puntos del ciclo Otto

En esta parte de la práctica se busca que el alumno calcule las presiones y temperaturas de cada uno de los puntos del ciclo Otto.

#### 5.1.3.5.1. Punto uno del ciclo

A partir de datos medidos y características del motor

- $T_1$ - Temperatura del aire de admisión
- $P_1$  – Presión en el múltiple de admisión
- Y  $V_1$  se obtiene a partir de la siguiente ecuación

$$V_1 = V_D$$

#### 5.1.3.5.2. Punto dos del ciclo

A partir de las formas de gases ideales, considerando una compresión politrópica:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n$$

Se sabe que:

$$R_C = \frac{V_1}{V_2}$$

Sustituyendo  $R_C$ :

$$\frac{T_2}{T_1} = (R_C)^{n-1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = (R_C)^n$$

Y finalmente despejando  $P_2$  y  $T_2$  se tiene que:

$$T_2 = T_1 \cdot (R_C)^{n-1}$$

$$P_2 = P_1 \cdot (R_C)^n$$

Y  $V_2$  se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$V_2 = \frac{V_1}{R_c}$$

### 5.1.3.5.3. Punto tres del ciclo

A partir del suministro de calor por el combustible hacia el motor se calcula el punto tres.

$$Q_s = C_v \cdot (T_3 - T_2)$$

Despejando  $T_3$

$$T_3 = \frac{Q_s}{C_v} + T_2$$

Para obtener el calor suministrado por unidad de masa  $Q_s$ :

$$Q_s = \frac{Q}{G_{aire}}$$

Y para obtener  $P_3$  a partir de la siguiente fórmula:

$$P_3 = P_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2}\right)$$

Y  $V_3$  se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$V_3 = V_2$$

### 5.1.3.5.4. Punto cuatro del ciclo:

Para obtener el punto final del ciclo se considera una expansión politrópica y tomando como base las fórmulas establecidas en el punto dos del ciclo.

Considerando la expansión y que

$$V_1 = V_4$$

$$V_2 = V_3$$

Se tienen las siguientes fórmulas:

$$T_{4i} = T_3 \cdot \left(\frac{1}{R_c}\right)^{n-1}$$

$$P_4 = P_3 \cdot \left(\frac{1}{R_c}\right)^n$$

$T_4$  (Dato)

Finalmente obtener el error entre  $T_4$  y  $T_{4i}$

$$\%Error = \left| \frac{T_{4i} - T_4}{T_{4i}} \right|$$

Y  $V_4$  se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$V_4 = V_1$$

En donde:

$V_D$  – Desplazamiento del motor [L] (dato)

$T_1$  - Temperatura en la admisión del motor [K]

$P_1$  – Presión en la admisión del motor [kPa]

$V_1$  – Volumen del cilindro [L]

$T_2$  – Temperatura al final de la compresión del motor [K]

$P_2$  – Presión al final de la compresión del motor [kPa]

$V_2$  – Volumen de la cámara de combustión [L]

$T_3$  – Temperatura al final del suministro de calor al motor [K]

$P_3$  – Presión al final del suministro de calor al motor [kPa]

$V_3$  – Volumen de la cámara de combustión [L]

$T_4$  – Temperatura al escape del motor [K]

$T_{4i}$  – Temperatura ideal al escape del motor [K]

$P_4$  – Presión al escape del motor [kPa]

$V_4$  – Volumen del cilindro [L]

$R_c$  – Relación de compresión (dato de fabricación del motor)

$n$  – Índice politrópico

$N$  – Velocidad de giro del motor [rpm]

$Q_s$  – calor suministrado por unidad de masa [kJ/s]

$G_{aire}$  - gasto de aire [kg/s]

### 5.1.3.6. Eficiencias

En esta apartado se calculan las eficiencias tanto prácticas como teóricas del ciclo

Eficiencia térmica del ciclo

$$\eta_{térmica} = \frac{Q}{W_b} \cdot 100$$

Eficiencia teórica del ciclo

$$\eta_{teórica} = \left(1 - \frac{1}{R_c^{n-1}}\right) \cdot 100$$

### 5.1.3.7. Comparación de emisiones contaminantes en frío y caliente

Se determina la diferencia en porcentaje entre los resultados en la medición de las emisiones contaminantes del motor, para cada una de las emisiones medidas (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y HC), a partir de la siguiente fórmula:

$$\Delta E = \left| \frac{E_2 - E_1}{E_2} \right| \cdot 100$$

En donde:

$\Delta E$  – diferencia de emisiones [%]

$E_2$  – Emisión correspondiente (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> o HC) en la segunda medición

$E_1$  – Emisión correspondiente (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> o HC) en la primera medición

### 5.1.4. Resultados por obtener

El alumno debe de calcular:

- Potencia útil (para cada evento)
- Energía suministrada (para cada evento)
- Consumo específico de combustible (para cada evento)
- Puntos del ciclo Otto (para el último evento)
- Eficiencia térmica y teórica del ciclo (para el último evento)
- Comparación de emisiones contaminantes en frío y caliente

Y esto se debe de registrar en las siguientes tablas de resultados:

**Tabla 5 – Resultados de la fase uno para la asignatura de sistemas de conversión de energía térmica**

Fase uno del experimento				
	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	HC
$\Delta E$ [%]				

Tabla 6 – Resultados de la fase dos para la asignatura de sistemas de conversión de energía térmica

Fase dos del experimento				
Evento	N [rpm]	$W_b$ [kW]	$G_c$ [g/s]	CEC
1				
2				
3				
4				
5				
6				
$\eta_{teórica}$				
$\eta_{térmica}$				

Tabla 7 – Puntos del ciclo Otto para la asignatura de sistemas de conversión de energía térmica

$P_1$	$T_1$	$V_1$	$P_2$	$T_2$	$V_2$	$P_3$	$T_3$	$V_3$	$P_4$	$T_4$	$V_4$	$T_{4i}$

Finalmente, el alumno debe de realizar las gráficas de:

- N vs.  $W_b$
- N vs.  $G_c$
- N vs. CEC

Un diagrama P vs. T del ciclo y la línea Willan's

## 5.2. Sistemas termoenergéticos

### 5.2.1. Introducción teórica

Esta práctica es la manera de complementar la que se dio en la asignatura de sistemas de conversión de energía.

El alumno se encuentra en el último semestre y al escoger esta asignatura “obligatoria de elección”, tiene un perfil e interés en el área de energía térmica, además las asignaturas previas que ha llevado en la carrera le facilitan la comprensión de los temas vistos. Por estos motivos se debe de tener una práctica más completa que ayude al alumno que ya está a punto de salir al mundo laboral a comprender completamente el funcionamiento y características del motor de combustión interna encendido por chispa.

Los temas básicos a desarrollar en la introducción teórica pueden ser divididos en tres categorías:

- Termodinámica del motor de combustión interna de encendido por chispa
- Funcionamiento de motor de combustión interna de encendido por chispa con sistema de inyección
- Normatividad de emisiones en México.

Estos temas pueden ser desarrollados en el siguiente orden y de la siguiente manera:

### 5.2.1.1. Termodinámica del motor de combustión interna de encendido por chispa

Para iniciar el desarrollo teórico de esta práctica se debe de recordar el ciclo de Otto ideal, real y los procesos termodinámicos que se llevan a cabo en cada uno de los cuatro tiempos del ciclo, esto se debe de acompañar de los diagramas P–V y T–s correspondientes y un esquema o animación del movimiento recíprocante del pistón dentro de la cámara de combustión.

### 5.2.1.2. Funcionamiento del motor de combustión interna de encendido por chispa con y sin sistema de inyección de combustible

Se debe de ampliar el conocimiento del alumno acerca de las partes y sistemas que componen el motor de combustión interna encendido por chispa como son:

Partes

- Monoblock
- Bielas
- Cigüeñal
- Pistones
- Anillos y sus diferentes tipos
- Cabeza
- Válvulas
- Árbol de levas

Al final de la práctica el alumno debe de ser capaz de identificar las partes por su nombre, aplicación y ubicación dentro del motor.

Sistemas

- Sistema de inyección de combustible
- Sistema de reducción de emisiones contaminantes
- Sistema de lubricación
- Sistema de enfriamiento
- Sistema de combustible

Al final de la práctica el alumno debe de ser capaz de identificar las partes que componen estos sistemas y su aplicación. Se debe de realizar un especial énfasis en el sistema de inyección de combustible explicando las ventajas y forma de funcionamiento descrita en el capítulo 3 de este trabajo.

Recordemos que el alumno también debe de aprender esto en el modelo físico del laboratorio.

### 5.2.1.3. Normatividad de emisiones en México

Como parte final de la explicación teórica de la práctica se deben de enseñar al alumno las características principales de la normatividad de emisiones en México. ¿Qué se mide? y ¿Cómo se mide? Es en esta parte



en la que el alumno recibe información acerca de los monitores del sistema de diagnóstico a bordo y cuál es su función.

Ahora el alumno conociendo que se mide debe de aprender cuales son los efectos nocivos para el ambiente y el ser humano producen las emisiones de los motores de combustión interna encendidos por chispa.

## 5.2.2. Desarrollo del experimento

El desarrollo del experimento es la parte central de esta práctica y es en esta parte en la que el alumno debe de utilizar todos los conocimientos aprendidos en la parte teórica y asignaturas previas de la carrera.

De acuerdo con lo visto anteriormente el experimento a proponerse debe de abordar los siguientes temas:

- Emisiones contaminantes
- Consumo de combustible
- Potencia producida
- Potencia útil
- Eficiencias (térmica, volumétrica)

### 5.2.2.1. Fase uno del experimento: Características de operación en lazo abierto, emisión de contaminantes del motor en frío y revisión del sistema de diagnóstico a bordo

Esta fase es muy importante para que el alumno pueda observar las diferencias que existen entre un motor frío y uno en temperatura de operación; principalmente nivel de emisiones contaminantes y consumo de combustible.

1. Con el motor apagado, preferiblemente a temperatura ambiente se conecta la herramienta de diagnóstico y se pone en modo de leer datos en vivo, se registran las temperaturas del refrigerante ( $T_R$ ) y del convertidor catalítico ( $T_{CC}$ ) y el nivel de combustible dentro del tanque de día ( $h$ ).
2. Utilizando la herramienta de diagnóstico se revisa el estado de todos los monitores del motor, se registran los que están completados y los que no, también se revisa si existe algún código de error en el sistema.
3. Se enciende el motor y se empieza a tomar: el tiempo ( $t$ ), la velocidad de giro en ralentí ( $N$ ) y carga inicial en el dinamómetro ( $F$ ); estas serán las condiciones en las que se llevará a cabo esta prueba. Se registran estos datos.
4. Se realiza la toma de una muestra de emisiones en el escape; HC ( $E_{HC1}$ ), CO ( $E_{CO1}$ ), CO<sub>2</sub> ( $E_{CO21}$ ), O<sub>2</sub> ( $E_{O21}$ ) y NO<sub>x</sub> ( $E_{NOx1}$ ).
5. Cuando la temperatura del catalizador ( $T_{CC}$ ) mostrada en la herramienta de diagnóstico corresponde a la de temperatura de operación establecida por el fabricante se detiene el cronómetro y se toma registro de la diferencia en el nivel de combustible del tanque de día. ( $t$ ) y ( $\Delta_c$ ) respectivamente.
6. Se realiza la fase dos del experimento

7. El motor se regresa a las condiciones de carga (F) y velocidad de giro en ralentí (N), correspondientes a la fase uno del experimento. Se toman las mediciones de emisiones en el escape: HC ( $E_{HC2}$ ), CO ( $E_{CO2}$ ), CO<sub>2</sub> ( $E_{CO22}$ ), O<sub>2</sub> ( $E_{O22}$ ) y NO<sub>x</sub> ( $E_{NOx2}$ ).

### 5.2.2.2. Fase 2: Curvas de potencia y emisiones contra velocidad del motor

Para esta parte de la práctica se realiza una prueba a velocidad variable del motor con el fin de encontrar las curvas de potencia, eficiencias y emisiones características del motor de combustión interna.

1. Se procede a acelerar el motor a 1300 rpm y a aumentar la carga en el dinamómetro a una correspondiente al tipo motor instalado. Se procede a tomar las mediciones de: emisiones (HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>), consumo de combustible [ $\Delta_c$ ], gasto de aire [ $G_{aire}$ ], posición de la válvula del acelerador [%TP], velocidad de giro del motor [N] y carga en el dinamómetro [F].
2. Se aumenta la velocidad del motor en 1000 rpm y se vuelven a registrar las mediciones de: emisiones (HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>), consumo de combustible [ $A_c$ ], consumo de aire [ $G_{aire}$ ], posición de la válvula del acelerador [%TP], velocidad de giro del motor [N] y carga en el dinamómetro [F].
3. El procedimiento anterior se realiza hasta llegar a un límite de velocidad de giro del motor 1000 rpm inferior a la línea roja de este con el fin de preservar el equipo.
4. Con esto se termina la fase 2 del experimento y se procede a terminar la fase uno del experimento.

Las mediciones se registran en las siguientes tablas:

**Tabla 8 – Datos de la fase uno para la asignatura de sistemas termoenergéticos**

Fase uno del experimento				
	CO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	NO <sub>x</sub> [ppm]	HC [ppm]
E1				
E2				
N [rpm]	F [kg]	$\Delta_c$ [mm]	$t_c$ [s]	$T_{1R}$ [°C]
$T_{1CC}$ [°C]	$T_{2R}$ [°C]	$T_{2CC}$ [°C]		

**Tabla 9 – Datos de la fase dos para la asignatura de sistemas termoenergéticos**

Fase dos del experimento									
Evento	$\Delta_c$ [mm]	N [rpm]	F [kg]	CO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	NO <sub>x</sub> [ppm]	HC [ppm]	$G_{aire}$ [g/s]	TP [%]
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Nota: Esta tabla se debe de ajustar al número de eventos necesarios para realizar el experimento, según las características del motor.

### 5.2.3. Cálculos

De acuerdo con las mediciones realizadas en el experimento es necesario establecer los cálculos correspondientes para que el alumno logre relacionar las mediciones realizadas con la teoría y de esa forma logre obtener las eficiencias y parámetros de operación del ciclo Otto y el motor de combustión interna encendido por chispa.

#### 5.2.3.1. Potencia al freno

Calcular la potencia al freno del motor a partir de las mediciones de carga en el dinamómetro hidráulico.

$$W_b = T \cdot w$$

$$T = F \cdot d$$

$$w = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$$

En donde:

$W_b$  – potencia al freno [kW]

$T$  – par torsional [kN•m]

$w$  – velocidad angular [1/s]

$F$  – fuerza al freno [kN]

$d$  – brazo de palanca [m]

$N$  – revoluciones por minuto [rpm]

Sustituyendo en la ecuación se tiene:

$$W_b = \frac{F \cdot d \cdot 2 \cdot \pi \cdot N}{60}$$

#### 5.2.3.2. Energía suministrada

Calculando el volumen consumido de combustible:

$$V_C = \Delta_c \cdot A_D$$

Calculando el gasto de combustible:

$$G_C = \frac{V_C \cdot \rho}{t}$$

Y calculando la energía suministrada:

$$Q = G_C \cdot PCA_{combustible}$$

En donde:

$\Delta_c$  – Altura de combustible consumida [m]

$A_D$  – Área del depósito de combustible [m]

$G_c$  – gasto de combustible [kg/s]

$V_c$  – volumen de combustible consumido [m<sup>3</sup>]

$\rho$  – densidad del combustible [kg/m<sup>3</sup>]

$t$  – tiempo de consumo de combustible [s]

$Q$  – energía suministrada [kW]

$PCA_{\text{combustible}}$  – poder calorífico del combustible [kJ/kg]

### 5.2.3.3. Consumo específico de combustible

Se calcula el consumo específico de combustible.

$$CEC = \frac{G_c}{W_b}$$

En donde:

$CEC$  – consumo específico de combustible [kg/(s•kW)]

$G_c$  – gasto de combustible [kg/s]

$W_b$  – potencia al freno [kW]

### 5.2.3.4. Eficiencias

En esta apartado se calculan las eficiencias tanto prácticas como teóricas del ciclo

#### 5.2.3.4.1. Eficiencia térmica del ciclo

$$\eta_{\text{térmica}} = \frac{Q}{W_b} \cdot 100$$

#### 5.2.3.4.2. Eficiencia teórica del ciclo

$$\eta_{\text{teórica}} = \left(1 - \frac{1}{R_c^{k-1}}\right) \cdot 100$$

#### 5.2.3.4.3. Eficiencia volumétrica

$$\eta_{\text{vol}} = \frac{120 \cdot G_a}{N \cdot V_D} \cdot 100$$

En donde:

$\eta_{\text{térmica}}$  – eficiencia térmica del ciclo [%]

$Q$  - calor suministrado [kW]

$W_b$  – potencia al freno [kW]

$R_c$  – Relación de compresión

$\eta_{teórica}$  –eficiencia teórica del ciclo [%]

$\eta_{vol}$  – eficiencia volumétrica del ciclo [%]

$G_a$  – gasto de aire [L/s]

$V_D$  – desplazamiento del motor [L]

$N$  – velocidad de giro del motor [rpm]

### 5.2.3.5. Emisión de contaminantes

Se determina el gasto de productos contaminantes emitidos al ambiente

#### 5.2.3.5.1. Gasto de gases combustión

$$G_{GC} = G_{aire} + G_{combustible}$$

#### 5.2.3.5.2. Emisión de contaminantes:

Aplicando las lecturas de emisiones correspondientes:

$$G_{CO} = CO \cdot G_{GC}$$

$$G_{CO_2} = CO_2 \cdot G_{GC}$$

En donde:

$G_{GC}$  – Gasto de gases de combustión [g/s]

$G_{aire}$  – Gasto de aire [g/s]

$G_c$  – Gasto de combustible [g/s]

$G_{CO}$  – Emisión de monóxido de carbono [g/s]

$G_{CO_2}$  – Emisión de dióxido de carbono [g/s]

$CO$  – Porcentaje de monóxido de carbono en la mezcla [%]

$CO_2$  – Porcentaje de dióxido de carbono en la mezcla [%]

### 5.2.3.6. Comparación de emisiones contaminantes en frío y caliente

Se determina la diferencia en porcentaje entre los resultados en la medición de las emisiones contaminantes del motor, para cada una de las emisiones medidas (CO, CO<sub>2</sub>, NOX y HC), a partir de la siguiente fórmula:

$$\Delta E = \left| \frac{E_2 - E_1}{E_2} \right| \cdot 100$$

En donde:

$\Delta E$  – diferencia de emisiones [%]

$E_2$  – Emisión correspondiente (CO, CO<sub>2</sub>, NOx o HC) en la segunda medición

$E_1$  – Emisión correspondiente (CO, CO<sub>2</sub>, NOx o HC) en la primera medición

## 5.2.4. Resultados por obtener

El alumno debe de calcular:

- Potencia útil (para cada evento)
- Energía suministrada (para cada evento)
- Consumo específico de combustible (para cada evento)
- Eficiencia volumétrica del ciclo (para cada evento)
- Emisión de contaminantes (para cada evento)
- Eficiencia térmica del ciclo (para cada evento)
- Eficiencia teórica del ciclo (para el ultimo evento)
- Comparación de emisiones contaminantes en frío y caliente

Y esto se debe de registrar en las siguientes tablas de resultados:

**Tabla 10 – Resultados de la fase uno para la asignatura de sistemas termoenergéticos**

Fase uno del experimento				
	CO	CO <sub>2</sub>	NOx	HC
$\Delta E$ [%]				

**Tabla 11 – Resultados de la fase uno para la asignatura de sistemas termoenergéticos**

Fase dos del experimento										
Evento	N [rpm]	W <sub>b</sub> [kW]	G <sub>c</sub> [g/s]	CEC	CO [g/s]	CO <sub>2</sub> [g/s]	$\eta_{vol}$ [%]	$\eta_{térmica}$ [%]	G <sub>aire</sub> [g/s]	TP [%]
1										
2										
3										
4										
5										
6										

Nota: Esta tabla se debe ajustar esta tabla al número de eventos necesarios.

Finalmente, el alumno debe de graficar:

- N vs. W<sub>b</sub>
- N vs. CEC
- N vs. CO
- N vs. CO<sub>2</sub>

- N vs. NOx
- N vs. HC
- N vs.  $\eta_{vol}$
- N vs.  $\eta_{térmica}$
- TP vs.  $\eta_{vol}$

Y realizar comentarios acerca de las características del motor presentadas en cada una de las curvas anteriores.

Si el profesor lo considera adecuado esta práctica puede incluir los procedimientos, cálculos y resultados de la prueba a velocidad constante correspondiente a la asignatura de sistemas de conversión de energía térmica correspondientes a los incisos 5.1.2, 5.1.3 y 5.1.4.

Con esto se finalizan las dos propuestas de práctica.

## 5.3. Material y equipo necesario para la realización de la práctica

De acuerdo con las dos prácticas propuestas, el material y equipo necesario para realizar las prácticas es:

- Motor de combustión interna de encendido por chispa con sistema de inyección, de preferencia de fabricación reciente que incluya al menos los 5 monitores básicos establecidos en la norma NOM – 167 - SEMARNAT – 2017 con su respectiva instalación.
- Dinamómetro hidráulico con su respectiva instalación.
- Cronómetro.
- Tanque de día de medidas con buena legibilidad.
- Escáner de uso automotriz con capacidad de lectura de datos en vivo.
- Analizador de gases de combustión con capacidad de medir emisiones de O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HC, NOX.

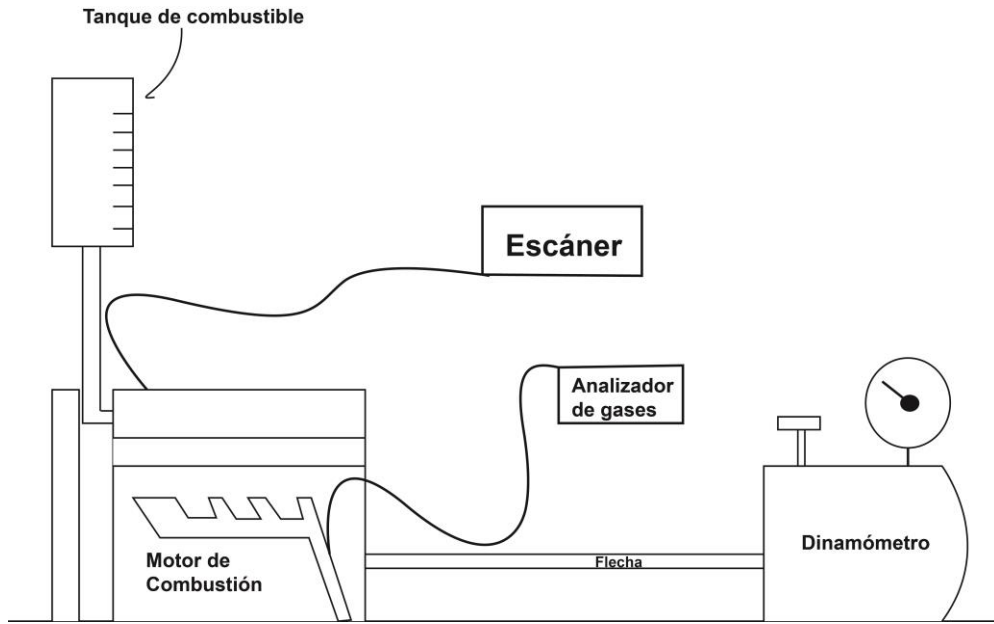


Figura 23 - Diagrama de instalación del sistema



# Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

## Conclusiones y Recomendaciones:

- Debido a que la práctica de motores de combustión interna encendidos por chispa impartida en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad se encuentra desactualizada, es necesario realizar una renovación de la misma, para ello es necesario un cambio en el modo de impartición de la práctica además de renovar el equipo y el método mediante el cual se realiza.
- La tecnología utilizada en los motores de combustión interna encendidos por chispa ha tenido una gran cantidad de cambios en los últimos 10 años volviéndolos más eficientes, potentes, seguros y ecológicos.
- Los sistemas de inyección de combustible utilizados en los motores de combustión interna encendidos por chispa actuales, al integrarse en las prácticas del Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad permitirá a los alumnos mejorar su aprendizaje, ya que se pueden monitorear una mayor cantidad de parámetros de operación a través de la computadora.
- Integrar la tecnología actual de los motores de combustión interna representa un área de oportunidad para el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad, ya que lo puede volver más eficiente, ecológico y económico.
- Se propone que el nuevo equipo para realizar la práctica sea un motor pequeño (igual o menor a 1.4 litros de desplazamiento) de fácil mantenimiento y con una gran participación en el mercado de tal forma que las refacciones no sean muy caras o escaseen en el futuro próximo.
- Desarrollar la nueva práctica de motores de combustión interna encendidos por chispa del Laboratorio de Máquinas Térmicas con base en este trabajo.
- Con este nuevo enfoque la práctica permitirá generar un mayor interés en el alumno, independientemente de la rama de la ingeniería en la que está orientado en sus estudios.
- La planta docente del Laboratorio debe reunirse periódicamente para revisar el método de enseñanza de los distintos temas con el fin de que estos se actualicen cada vez que sea necesario.
- Es necesario dar más importancia a los efectos de las emisiones contaminantes que se generan en las máquinas térmicas
- Ampliar este trabajo sería una labor de extrema importancia para el Laboratorio, el enfoque que yo le daría sería el de modificar los parámetros de operación del motor, ya sea modificando las salidas de los sensores o mediante un programador del módulo de control. Modificando estos parámetros de operación, el alumno podría observar el comportamiento del motor dependiendo de la relación aire-combustible, avance en el encendido, etc.

# Referencias

- Aird, F. (2001). Bosch Fuel Injection Systems. New York: HP Books.
- Donald G. Fink, H. W. (1981). Manual práctico de electricidad para ingenieros. España: Reverté S.A.
- Iserman, R. (2014). Engine Modeling and Control. Berlin: Springer.
- Probst, C. O. (2001). Corvette Fuel Injection & Electronic Engine Management. Massachusetts: Bentley Publishers.
- Basshuysen y Schäfer. (2004). Internal Combustion Engine Handbook. Pennsylvania: SAE.
- Zaman, N. (2015). Automotive Electronics Design Fundamentals. London: Springer.
- Manual de prácticas del Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería, UNAM
- NOM-042-SEMARNAT-2003, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos.
- NOM-041-SEMARNAT-2015, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.
- Norma Mexicana NMX-AA-011-1993-SCFI, Método de prueba para la evaluación de emisiones de gases del escape de los vehículos automotores nuevos en planta que usan gasolina como combustible, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de diciembre de 1993. NOM-047-SEMARNAT-2014
- NOM-167-SEMARNAT-2017, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para los vehículos automotores que circulan en las entidades federativas Ciudad de México, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala; los métodos de prueba para la evaluación de dichos límites y las especificaciones de tecnologías de información y hologramas.
- NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013, Emisiones de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) provenientes del escape y su equivalencia en términos de rendimiento de combustible, aplicable a vehículos automotores nuevos de peso bruto vehicular de hasta 3857 kilogramos.