

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Paúl Molina • Juan Molina • Néstor Rivera

FUNDAMENTOS DE LOS **SISTEMAS** DE INYECCIÓN A GASOLINA Y AUTOTRÓNICA AUTOMOTRIZ





Este libro nace como una respuesta a la necesidad de contar con un material claro y ordenado que reúna los principios esenciales de la inyección a gasolina y la autotrónica en el contexto de la ingeniería automotriz. Está dirigido tanto a estudiantes como a técnicos del ámbito automotor.

Se abordan temas que van desde los fundamentos de la combustión hasta los componentes claves del sistema de inyección, la gestión de señales electrónicas, los tipos de encendido y el análisis de sensores. Todo ello ilustrado con esquemas y ejemplos prácticos, que convierten el aprendizaje en una experiencia visual y aplicada.

Esta publicación no solo funciona como material de estudio, sino también como una herramienta de consulta rápida en entornos académicos y profesionales. Su enfoque didáctico invita al lector a profundizar en los fenómenos físicos del motor, constituyéndose en un punto de partida ideal para adentrarse en el fascinante mundo de la autotrónica y la eficiencia energética en los vehículos.



ISBN: 978-9942-699-44-2



9 789942 699442



FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS
DE INYECCIÓN A GASOLINA Y
AUTOTRÓNICA AUTOMOTRIZ

Paúl Molina
Juan Molina, Néstor Rivera

FUNDAMENTOS DE LOS SISTEMAS
DE INYECCIÓN A GASOLINA Y
AUTOTRÓNICA AUTOMOTRIZ



**ABYA
YALA**

2025

Fundamentos de los sistemas de inyección a gasolina y autotrónica automotriz

© Autores: Paúl Molina, Juan Molina, Néstor Rivera

Ira. edición: © Universidad Politécnica Salesiana
Av. Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja
Cuenca-Ecuador
P.B.X. (+593 7) 2050000
e-mail: publicaciones@ups.edu.ec
www.ups.edu.ec

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

ISBN impreso: 978-9942-699-44-2

ISBN digital: 978-9942-699-45-9

Diseño, diagramación
e impresión: Ediciones Abya-Yala
Quito-Ecuador

Tiraje: 300 ejemplares

DOI: <https://doi.org/10.17163/abyaups.115>

Impreso en Quito-Ecuador, abril de 2025

Publicación arbitrada de la Universidad Politécnica Salesiana

El contenido de este libro es de exclusiva responsabilidad de los autores.



Índice general

Agradecimientos	9
Prefacio	11
1. Fundamentos de la combustión	13
1.1. Introducción	13
1.1.1. El motor de cuatro tiempos	13
1.2. Propiedades del combustible	15
1.2.1. Resistencia a la detonación	17
1.2.2. Volatilidad	19
1.2.3. Poder calorífico	19
1.2.4. Aditivos	20
1.2.5. Densidad	20
1.3. Combustión teórica	21
1.3.1. Composición del aire	22
1.4. Combustión real	29
1.4.1. Emisiones generadas durante el proceso de combustión real	32
1.4.2. Ventana lambda	34
1.4.3. Relación entre λ potencia y consumo específico	35
1.4.4. Catalizador	36
1.4.5. Comportamiento de las emisiones contaminantes según el factor λ antes y después de un catalizador	38
2. Sistemas de inyección a gasolina	47
2.1. Sistemas de alimentación de combustible	47

2.1.1.	La inyección de combustible	47
2.1.2.	Constitución y funcionamiento de componentes. . .	48
2.2.	Sistema de aspiración de aire	62
2.2.1.	Geometría de colectores de admisión	63
2.2.2.	Colectores de geometría variable.	65
2.3.	Central de control electrónica	65
2.3.1.	Principio de funcionamiento de la ECU.	65
2.3.2.	Funciones de los bloques de la central de control electrónica	66
2.4.	Sensores	71
2.4.1.	Sensor de posición del cigüeñal o CKP (Crankshaft Position Sensor)	72
2.4.2.	Sensor de posición del árbol de levas o CMP (Camshaft Position Sensor)	74
2.4.3.	Sensor de efecto Hall	76
2.4.4.	Sensor de velocidad del vehículo o VSS (Vehicle Speed Sensor)	79
2.4.5.	Sensor de posición del acelerador o TPS (Throttle Position Sensor)	80
2.4.6.	Sensor de presión absoluta o MAP (Manifold Ab- solute Pressure)	82
2.4.7.	Sensor de detonación o KS (Knock Sensor)	83
2.4.8.	Sensor de temperatura del refrigerante del motor o ECT (Engine Coolant Temperature)	84
2.4.9.	Sensor de temperatura del aire de admisión o IAT (Intake Air Temperature)	85
2.4.10.	Sensor de temperatura del aceite o OTS (Oil Tem- perature Sensor)	85
2.4.11.	Sensores de temperatura	86
2.4.12.	Sensor de flujo másico de aire o MAF (Mass Air Flow Sensor)	88
2.4.13.	Sensor de oxígeno	93
2.4.14.	Sensor de posición del acelerador o APS (Acele- rator Position Sensor)	94
2.5.	Actuadores	95

2.5.1.	Sistema de control de emisiones evaporativas (EVAP)	95
2.5.2.	Sistema de ventilación positiva del cárter (PCV)	96
2.5.3.	Válvula de control de ralentí (IAC)	97
2.5.4.	Sistema de recirculación de gases de escape (EGR)	99
3.	Sistemas de encendido	103
3.1.	Sistema de encendido SZ	105
3.1.1.	Bobina	106
3.1.2.	Circuito primario	106
3.1.3.	Circuito secundario	111
3.1.4.	Adelanto al encendido	118
3.1.5.	Bujías	121
3.2.	Sistema comandado por transistores	123
3.2.1.	Módulo de encendido	127
3.2.2.	Encendido con generador de impulsos de efecto Hall	129
3.2.3.	Sistema de encendido con generador de impulsos inductivos	131
3.2.4.	Encendido electrónico DIS	133
3.2.5.	Encendido electrónico EDIS	134
4.	Diagnóstico de los sistemas de inyección	137
4.1.	Diagnóstico	137
4.2.	Sensor de posición del cigüeñal (CKP)	138
4.2.1.	Falla en el encendido	140
4.3.	Sensor de posición del árbol de levas (CMP)	141
4.4.	Sensor de presión absoluta del colector de admisión (MAP)	143
4.4.1.	Parámetros estimados a partir del sensor MAP	151
4.5.	Sensor de posición del acelerador (TPS)	152
4.6.	Sensor de flujo másico de aire (MAF)	156
4.7.	Sensores de temperatura	159
4.7.1.	Sensor de temperatura del refrigerante (ECT)	159
4.7.2.	Sensor de temperatura del aire (IAT)	160
4.8.	Sensor de oxígeno	163
4.8.1.	Interpretación de la unidad de control	163
4.8.2.	Ajustes de combustible	165

4.9. Comprobaciones de la bomba de combustible 167

Agradecimientos

Queremos agradecer a todos aquellos que contribuyeron a la realización de este libro, en especial a nuestros queridos estudiantes que colaboraron con la revisión de varias partes del documento. Del mismo modo extender un agradecimiento a la Carrera de Ingeniería Automotriz de las sedes Cuenca y Quito por brindar las facilidades necesarias para la publicación de este libro.

Prefacio

Este libro surge de la necesidad de condensar las asignaturas de Inyección a Gasolina y Autotrónica de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS) en un documento de lenguaje sencillo y fácil de comprender. Asimismo, este texto está pensado para convertirse en una herramienta de consulta rápida para principios genéricos de la rama automotriz e invitar a los lectores a explorar nuevos conceptos y aprendizajes.

El capítulo 1 está enfocado en analizar el motor de encendido provocado, partiendo desde los fundamentos de la combustión, posteriormente se revisan las propiedades de los combustibles, hasta realizar una definición de la combustión teórica para contrastar el concepto con una combustión real en donde los hidrocarburos insertados en el proceso de combustión producen trabajo y gases liberados a la atmósfera.

Durante el capítulo 2 se exploran los diferentes sistemas de inyección a gasolina, empezando por el estudio del ingreso del aire al motor. La gestión electrónica se presenta como el centro del proceso de inyección, ya que interpreta las señales físicas de los diferentes sensores colocados en el motor, que van desde la temperatura del aire y del refrigerante hasta el régimen de giro, entre otros. Posteriormente, con el aporte de esta información, se produce la correcta dosificación del combustible en el motor.

El capítulo 3 está enfocado en conocer los diferentes sistemas de encendido del vehículo que van desde sistemas mecánicos aún usados

en nuestro medio local hasta sistemas completamente electrónicos que permiten mejorar el proceso de combustión.

En el capítulo 4 se realiza un repaso de los distintos sensores desde un punto de vista de su funcionamiento y se exploran posibles fallos en el sistema de inyección a partir de la interpretación de los parámetros identificadores de datos.

Como se puede constatar, cada capítulo está enfocado en brindar herramientas que faciliten la comprensión básica de principios y fenómenos físicos involucrados durante el proceso de combustión del motor y los sistemas de gestión electrónica, mediante el uso de esquemas y gráficos genéricos que faciliten el entendimiento del estudiante.

1 | Fundamentos de la combustión

1.1. Introducción

1.1.1. El motor de cuatro tiempos

El motor de combustión interna es un dispositivo capaz de convertir la energía química del combustible en trabajo mecánico [1]. Entre los motores de combustión interna, el motor de cuatro tiempos ha sido el más exitoso debido a su eficiencia, costos de producción y rentabilidad [2]. Por esta razón, nuestro estudio se centrará en este tipo de motor, que es el más común en la industria tanto para el transporte de pasajeros como para el movimiento de bienes e insumos. El motor de encendido provocado (MEP) es accionado por un mecanismo de biela-manivela dentro de un bloque de cilindros. En su interior, un pistón realiza un movimiento alternativo desde el punto muerto superior (PMS) hacia el punto muerto inferior (PMI), impulsado por el cigüeñal.

En la parte baja del bloque motor se encuentra el cárter, encargado de alojar el aceite para la lubricación del sistema. En la parte superior se posiciona la culata, dentro de la cual se encuentra la cámara de combustión y el mecanismo de distribución, encargado de la apertura y cierre de válvulas que permite el ingreso y salida de gases en el motor como se puede ver en la Figura 1.1.

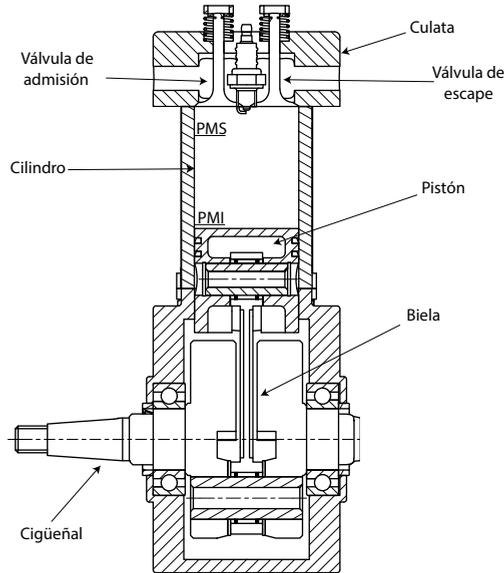


Figura 1.1. Partes de un motor de encendido provocado

Ciclos de funcionamiento del motor

Como se describió anteriormente, el motor es una máquina capaz de convertir la energía química del combustible y transformarla en trabajo. Para que todo esto pueda suceder, se ingresa al interior del cilindro la mezcla aire-combustible a través de la válvula de admisión actualmente abierta (**ciclo de admisión**) gracias a la succión que genera el pistón en su carrera descendente. Luego de ello, las válvulas permanecen cerradas mientras el pistón inicia su carrera ascendente, comprimiendo la mezcla (**ciclo de compresión**). Cerca del PMS se genera una chispa entre los electrodos de la bujía, encendiendo la mezcla y obligando el desplazamiento del pistón hacia el PMI (**ciclo de trabajo**).

Finalmente, en su última carrera ascendente, el pistón desplaza todos los gases combustionados a través de la válvula de escape que en esta fase se encuentra abierta hacia el exterior (**ciclo de escape**) como se visualiza en la Figura 1.2.

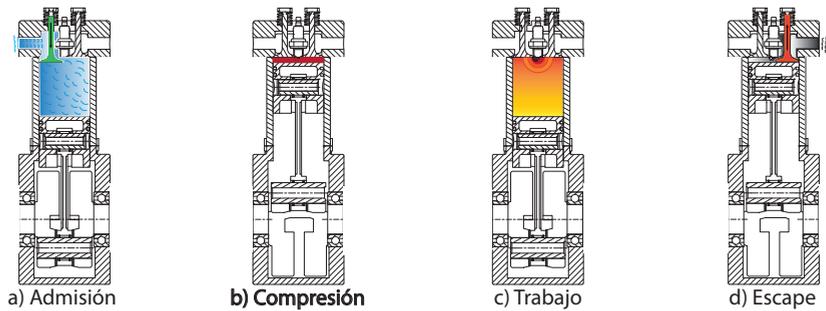


Figura 1.2. Ciclo de funcionamiento del motor de encendido provocado

1.2. Propiedades del combustible

Los combustibles producen una reacción con el oxígeno de tipo exotérmica, transformando la energía de su estructura molecular en energía térmica [3]. Estos combustibles pueden encontrarse en estado líquido, gaseoso y sólido. No obstante, combustibles líquidos como el diésel y la gasolina son comunes por su facilidad de almacenamiento y transportación. Los combustibles gaseosos, debido a su arreglo atómico necesitan grandes recipientes para su almacenaje, mientras los sólidos no pueden ser usados en un motor de combustión interna por la rapidez con la que sucede el proceso de combustión.

Los combustibles pueden proceder de fuentes no renovables (origen fósil) y de fuentes renovables (biocombustibles). Los combustibles de origen fósil son obtenidos del petróleo en refinerías mediante un proceso de destilación fraccionada, en donde el crudo es sometido a diferentes etapas de separación física obteniéndose derivados como: gasolina, diésel, queroseno etc., como se puede observar en la Figura 1.3. Cabe destacar que cada producto es obtenido a una temperatura diferente de destilación y posteriormente son sometidos a diferentes procesos para mejorar sus propiedades físicas como se describen a continuación:

- **Reformado catalítico:** produce gasolinas a partir de la nafta pesada.
- **Isomerización:** se aplica a la fracción más ligera de nafta, para convertirla en gasolina, o proporcionar reactivos para procesos posteriores de igualación.
- **Craqueo:** largas cadenas de hidrocarburos son descompuestas en moléculas más pequeñas con la presencia de un catalizador y la ausencia de oxígeno, con la intención de mejorar las propiedades antidetonantes del combustible [4].
- **Hidrodesulfuración:** es necesario para eliminar el azufre de gasolinas, querosenos y gasóleos.

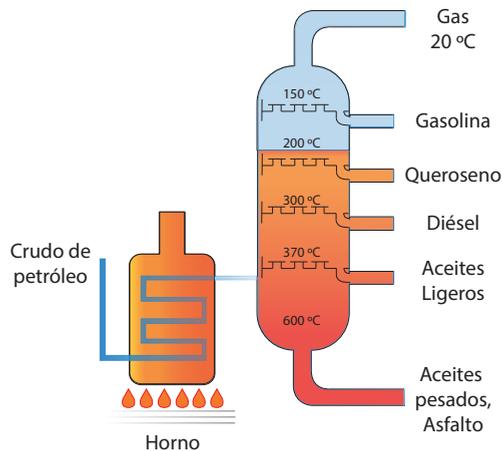


Figura 1.3. Proceso de producción de los diferentes derivados del petróleo

Gasolina

Es una mezcla de hidrocarburos líquidos incoloros, volátiles y fácilmente inflamables, mejorada con ciertos aditivos que permiten obtener un combustible con mejores propiedades físicas y químicas.

1.2.1. Resistencia a la detonación

La detonación es la combustión espontánea e incontrolada de las partículas que no han sido alcanzadas por el frente de llama regular, lo que ocasiona el característico sonido de golpeteo metálico. Aunque el sonido es producido por la colisión de diferentes frentes de llama durante el proceso de combustión, si la combustión se produce de forma normal con un avance del frente de llama regular, se denomina deflagración.

El número de octanos define la capacidad de autoinflamación de un combustible; entre más alto el número mayor es la resistencia a la detonación [3]. La gasolina es una mezcla de isooctano y n-heptano; el isooctano tiene un número de octanos igual a 100 %, mientras que el valor del heptano es 0 %.

Un ejemplo claro es que: si se tiene una gasolina de 95 octanos, este combustible se comportará como una mezcla compuesta por un 95 % de isooctano y un 5 % de n-heptano. En otras palabras, esta gasolina tendrá una resistencia a la detonación equivalente al 95 % de la resistencia del isooctano.

El número de octanos se determina mediante un ensayo experimental realizado en un motor estandarizado con relación de compresión variable y velocidad de giro constante, denominado CFR (Cooperative Fuel Research). Se incrementa progresivamente la relación de compresión hasta registrar una intensidad de picado estándar (50 unidades en la escala Knockmeter) [6]. Existen dos procedimientos para encontrar el valor de octanos:

- El número de octano de motor (MON)
- Número de octano de investigación (RON)

El número de octano de motor (MON) se obtiene con un tiempo de ignición variable, mezcla precalentada y régimen de giro elevado, si se contrasta con el método RON, donde la velocidad y requerimientos energéticos son menores. Es común encontrar una diferencia de 10 unidades entre ambos métodos (sensibilidad). En la Tabla 1.1 se pueden

encontrar los valores de autoinflamación usados según la norma ISO 5164 y en la Tabla 1.2 se encuentran las características principales de cada método.

Tabla 1.1. Requisitos de los combustibles según la norma NTE INEN-ISO 5164

Tipo de gasolina	Octanaje mínimo (RON)	Contenido máximo de azufre (ppm)
Extra	87	650
Súper	92	650

Tabla 1.2. Datos para la determinación del número de octanos del combustible

Características	RON	MON
Pre calentamiento de la mezcla	50 °C	149 °C
Presión de admisión	Atmosférica	
Humedad	0.0036-0.0072 kg/kg aire seco	
Temperatura del refrigerante	100 °C	
Velocidad de giro	600 rpm	900 rpm
Avance de la ignición	13° BTDC	19-26° BTDC
AFR	Ajustado para máxima detonación	

Se pueden obtener combustibles que ofrezcan mayor resistencia a la detonación mediante la adición de éteres como el éter metílico terciario de butilo (MTBE) y el éter etílico de butilo (ETBE), así como de alcoholes como el metanol y el etanol, sin embargo, no se recomienda su uso en motores que no han sido diseñados para este tipo de combustibles, ya que aumentan la volatilidad y pueden deteriorar elementos del motor y del sistema de inyección (ver Figura 1.4) [5].

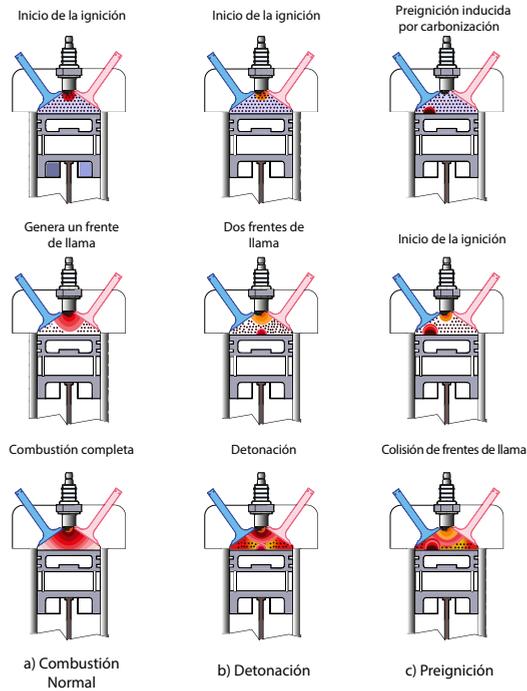


Figura 1.4. Diferentes tipos de combustión

1.2.2. Volatilidad

La volatilidad es la capacidad que tienen los líquidos para evaporarse. El combustible debe ser lo suficientemente volátil para garantizar un arranque en frío seguro, pero no puede ser extremadamente alto, porque a temperaturas elevadas se forman bolsas de vapor que pueden producir problemas de marcha en condiciones de arranque. Además, varias medidas medioambientales sugieren que este valor deba mantenerse bajo.

1.2.3. Poder calorífico

El poder calorífico es la energía que es capaz de suministrar un combustible por unidad de masa (kilojulio por kilogramo de combustible), y para la gasolina se corresponde con un valor de 43 542 kJ/kg. El po-

der calorífico varía en función de la cantidad de carbono y de hidrógeno que contiene el combustible [7]. Cuanto mayor es la cantidad de hidrógeno, mayor es el poder calorífico.

1.2.4. Aditivos

Están formados por varios componentes que cumplen funciones específicas, determinan la composición de los hidrocarburos y la calidad de los combustibles. Entre los objetivos de los aditivos se encuentra la protección contra el envejecimiento de la cámara de combustión, limpieza de los conductos del sistema de inyección, proteger contra la corrosión, y en temperaturas extremadamente bajas evitar la congelación.

- **Aditivos detergentes:** mantienen el sistema de inyección y líneas de combustible libres de depósitos de carbono, para mantener reducido el número de emisiones contaminantes.
- **Inhibidores de corrosión:** evitan el ingreso de humedad en las líneas de combustible formando una fina capa protectora, que impide la corrosión.
- **Protección contra la congelación:** impide la formación de cristales en las líneas de combustible los cuales podrían generar obstrucciones en el sistema de alimentación.
- **Estabilizadores:** evitan que las propiedades del combustible se degraden durante la fase de almacenamiento.

1.2.5. Densidad

Para obtener una combustión regular, es necesario asegurar una relación correcta entre las masas de aire y de combustible, por lo tanto, la densidad debe ser constante para cada tipo de combustible; la densidad de la gasolina oscila entre 0.71 y 0.76 kg por litro a 15 °C.

1.3. Combustión teórica

Se denomina como combustión teórica a la reacción de oxidación del combustible que produce únicamente nitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua (H₂O) en los gases de escape, para tal efecto es necesario una determinada proporción entre la cantidad de combustible y la cantidad de aire que se mezclará para producir la denominada relación estequiométrica que tiene un AFR (Air Fuel Ratio) de 14.7 : 1, es decir que por 1 gramo de combustible se necesita 14.7 gramos de aire como se observa en la Figura 1.5.

$$AFR = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \tag{1.1}$$

El factor lambda (λ) se determina como la relación entre AFR de la mezcla y el AFR ideal.

$$\lambda = \frac{AFR}{14.7} \tag{1.2}$$

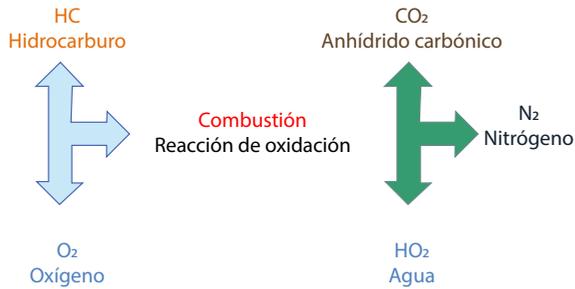


Figura 1.5. Combustión teórica de la mezcla.

Todo el hidrógeno (H) →	reacciona con el →	formando vapores de agua (H ₂ O)
Todo el carbono (C) →	reacciona con el →	formando Dióxido de carbono (CO ₂).
El nitrógeno (N ₂) →	no interviene en la →	no reacciona.
	reacción	

1.3.1. Composición del aire

La composición del aire varía en función de la ubicación geográfica y la condiciones meteorológicas, a nivel del mar está compuesto principalmente por:

- 21 % oxígeno.
- 78 % nitrógeno.
- 1 % contaminantes, argón, etc. [10].

En la Figura 1.6 se puede visualizar que por cada partícula de oxígeno que hay en el aire existen 3.763 partículas de nitrógeno.

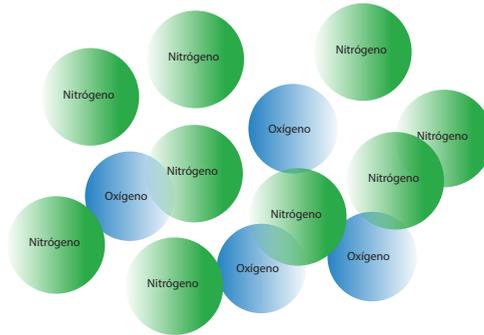
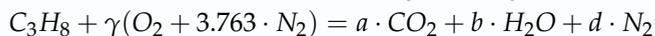


Figura 1.6. Composición química del aire.

Ejemplo 1.1. Para la muestra observada en la Figura 1.7, determine la relación aire-combustible (AFR) según los siguientes datos:



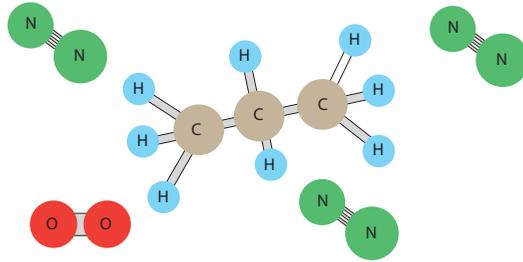


Figura 1.7. Composición de la mezcla aire-combustible

1. Conteo de carbono en reactivos

$$C_3H_8 + \gamma(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = a \cdot CO_2 + b \cdot H_2O + d \cdot N_2 \quad (1.3)$$

$$3 \cdot C = a \cdot C$$

$$a = 3$$

2. Conteo de hidrógeno en reactivos

$$C_3H_8 + \gamma(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = a \cdot CO_2 + b \cdot H_2O + d \cdot N_2 \quad (1.4)$$

$$8H = 2B \cdot H$$

$$b = 4$$

3. Conteo de oxígeno en productos

$$C_3H_8 + \gamma(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = 3 \cdot CO_2 + 4 \cdot H_2O + d \cdot N_2 \quad (1.5)$$

$$2\gamma = 6 + 4$$

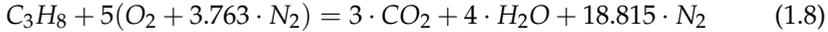
$$\gamma = 5$$

4. Conteo de nitrógeno en reactivos

$$C_3H_8 + 5(O_2 + 3.763 \cdot N_2) = 3 \cdot CO_2 + 4 \cdot H_2O + d \cdot N_2 \quad (1.6)$$

$$d = 18.815$$

(1.7)



5. Composición de gases de escape

$$100 = 3CO_2 + 4H_2O + 18.815N_2 \quad (1.9)$$

6. Total de moles en productos

$$100 = 3CO_2 + 4H_2O + 18.815N_2 = 25.81 \quad (1.10)$$

7. Fracción molar

$$100 = \frac{3}{25.81}CO_2 + \frac{4}{25.81}H_2O + \frac{18.815}{25.81}N_2 \quad (1.11)$$

$$100 = 0.116 CO_2 + 0.1555 H_2O + 0.729 N_2$$

8. Si se considera que los gases de escape se comportan como un gas ideal, la fracción molar equivale a la composición en [v/v]

$$100 = 11.6\% CO_2 + 15.5\% H_2O + 72.9\% N_2$$

9. El número de moles de todos los componentes es:

- Número de moles de oxígeno = 5
- Número de moles de nitrógeno = 18.81
- Número de moles de aire = 23.81 (Es el resultado de la suma del número de moles de oxígeno y número moles de nitrógeno)
- Número de moles de carbono = 3
- Número de moles de hidrógeno = 4

10. En este apartado se obtiene la relación aire-combustible (AFR)

$$AFR = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (1.12)$$

$$AFR = \frac{N_{aire} \cdot M_{aire}}{N_c \cdot M_c + N_{H_2} \cdot M_{H_2}} \quad (1.13)$$

$$(1.14)$$

Donde:

- N_{aire} = número de moles de aire en la reacción
- M_{aire} = masa molar del aire (≈ 29 kg/mol, considerando la composición del aire)
- N_c = número de moles de carbono en el combustible
- M_c = masa molar del carbono (12 kg/mol)
- N_{H_2} = número de moles de hidrógeno en el combustible
- M_{H_2} = masa molar del hidrógeno (2 kg/mol)

$$AFR = \frac{23.81 \text{ kmol} \cdot 29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{3 \text{ kmol} \cdot 12 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} + 4 \text{ kmol} \cdot 2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$AFR = 14.38$$

El resultado representa la relación estequiométrica aire-combustible para el propano, lo que significa que se necesitan 14.38 kg de aire para quemar completamente 1 kg de propano en condiciones ideales.

Ejemplo 1.2. Para la muestra observada en la Figura 1.8, determine la relación aire-combustible (AFR) según los siguientes datos:

Composición del combustible: 30% CH_4 + 70% C_3H_8

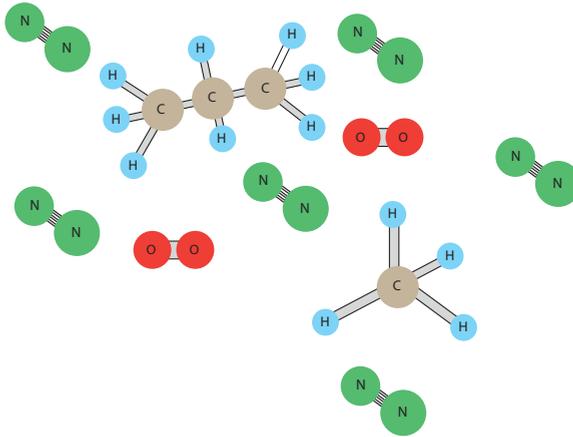
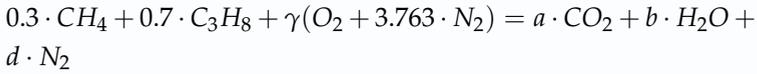
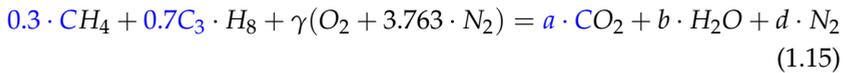


Figura 1.8. Composición de la mezcla

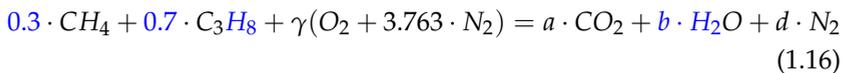
1. Conteo de carbono en reactivos



$$0.3 \cdot \text{C} + 2.1 \cdot \text{C} = a \cdot \text{C}$$

$$a = 2.4$$

2. Conteo de hidrógeno en reactivos

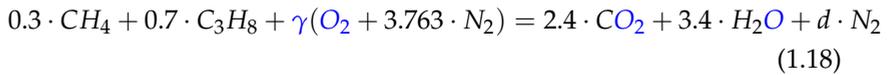


$$1.2H + 5.6H = 2B \cdot H$$

$$b = 3.4$$

(1.17)

3. Conteo de oxígeno en productos

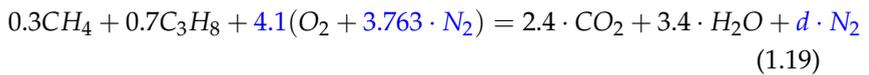


(1.18)

$$2\gamma = 2 \cdot 2.4 + 3.4$$

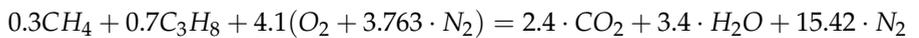
$$\gamma = 4.1$$

4. Conteo de nitrógeno en reactivos



(1.19)

$$d = 15.42$$



5. Composición de gases de escape

$$100 = 2.4CO_2 + 3.4H_2O + 15.42N_2$$

6. Total de moles en productos

$$100 = 2.4CO_2 + 3.4H_2O + 15.42N_2 = 21.22$$

7. Fracción molar

$$100 = \frac{2.4}{21.22} \text{CO}_2 + \frac{3.4}{21.22} \text{H}_2\text{O} + \frac{15.42}{21.22} \text{N}_2$$

$$100 = 0.11 \cdot \text{CO}_2 + 0.16 \cdot \text{H}_2\text{O} + 0.72 \cdot \text{N}_2$$

8. Si consideramos que los gases de escape se comportan como gases ideales, la fracción molar equivale a la composición en [v/v]

$$100 = 11 \% \text{CO}_2 + 16 \% \text{H}_2\text{O} + 72 \% \text{N}_2$$

9. El número de moles de todos los componentes es:

- Número de moles de oxígeno = 4.1
- Número de moles de nitrógeno = 15.42
- Número de moles de aire = 19.52 (Es el resultado de la suma del número de moles de oxígeno y número moles de nitrógeno)
- Número de moles de carbono = 2.4
- Número de moles de hidrógeno = 3.4

10. En este apartado se obtiene la relación aire-combustible (AFR)

$$AFR = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad (1.20)$$

$$AFR = \frac{N_{aire} \cdot M_{aire}}{N_c \cdot M_c + N_{H2} \cdot M_{H2}} \quad (1.21)$$

$$AFR = \frac{19.52 \text{ kmol} \cdot 29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{2.4 \text{ kmol} \cdot 12 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} + 3.4 \text{ kmol} \cdot 2 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} \quad (1.22)$$

$$AFR = 15.90$$

Por cada kilogramo de combustible se requieren aproximadamente 15.90 kg de aire. La relación hidrógeno-carbono es 1.42, lo que indica una mejor calidad del combustible (ver Figura 1.9).

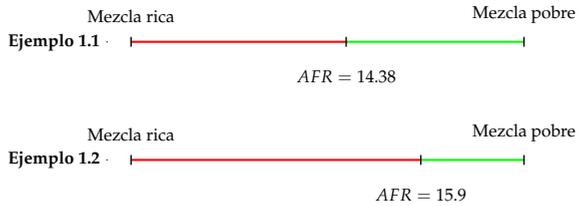


Figura 1.9. Valor AFR para dos distintos combustibles

1.4. Combustión real

En los motores de encendido provocado (MEP) con sistemas de inyección indirecta, la mezcla de aire-combustible ingresa en fase gaseosa a la cámara de combustión de forma homogénea, para ser encendida por el salto de la chispa producida en la bujía, la cual iniciará el proceso de combustión denominado deflagración (combustión normal), donde se pueden identificar dos mecanismos de avance del frente de llama, una combustión denominada laminar y otra turbulenta. Esquemáticamente en la Figura 1.10 se puede apreciar el proceso de combustión laminar premezclada.

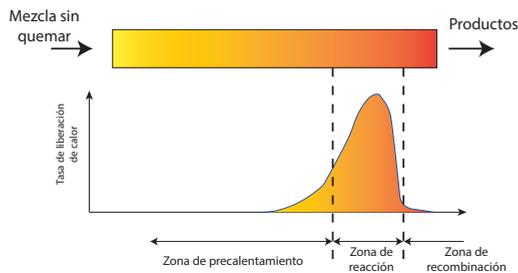


Figura 1.10. Zonas del proceso de combustión laminar premezclada [7]

Proceso de combustión laminar

El proceso de combustión es laminar cuando el fluido, compuesto por una mezcla homogénea de aire y combustible, se encuentra inicialmente en reposo y el frente de llama se propaga de forma esférica (se define como frente de llama a la zona que separa los productos sin quemar de aquellos combustionados) [7]. Aquí se distinguen tres zonas, la primera denominada zona de precalentamiento donde la mezcla aire-combustible aumenta su temperatura debido a un proceso de difusión térmica y másica, generando reacciones poco exotérmicas. En la siguiente fase se produce una liberación de energía por parte de los hidrocarburos para finalmente tener una zona de recombinación de poca liberación energética.

Proceso de combustión turbulento

La turbulencia es un fenómeno que facilita la difusión másica y térmica de un fluido permitiendo el incremento de la propagación de la superficie del frente de llama (fenómeno de corrugación). Si la velocidad del frente de llama se eleva (ver Figura 1.11), se pueden obtener combustiones más rápidas, con espesores aparentes de llama mayores y más eficientes.

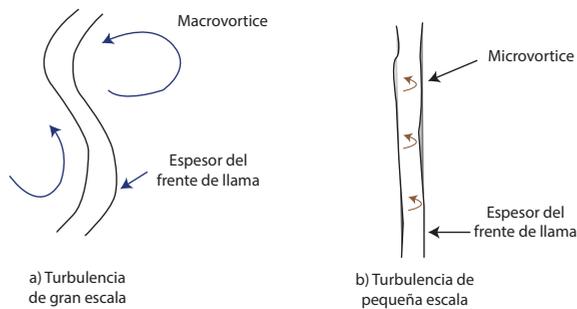


Figura 1.11. Proceso de combustión premezclada turbulenta[7]

Fases del proceso de combustión

En este proceso se describen tres etapas, la primera ocasionada por la chispa de la bujía y el inicio de una combustión de tipo laminar, la cantidad de mezcla quemada durante este proceso es pequeña y abarca aproximadamente un 10% del ángulo de combustión. La segunda fase es una combustión de tipo turbulenta donde se logra la máxima presión en el interior del cilindro, producida por el aumento rápido del frente de llama y ocupa un 85% de la duración del ángulo de combustión. Por último, el frente de llama alcanza las paredes del cilindro disminuyendo su presión y velocidad de propagación, producto de la extinción de la fase de combustión laminar, como se puede ver en la Figura 1.12.

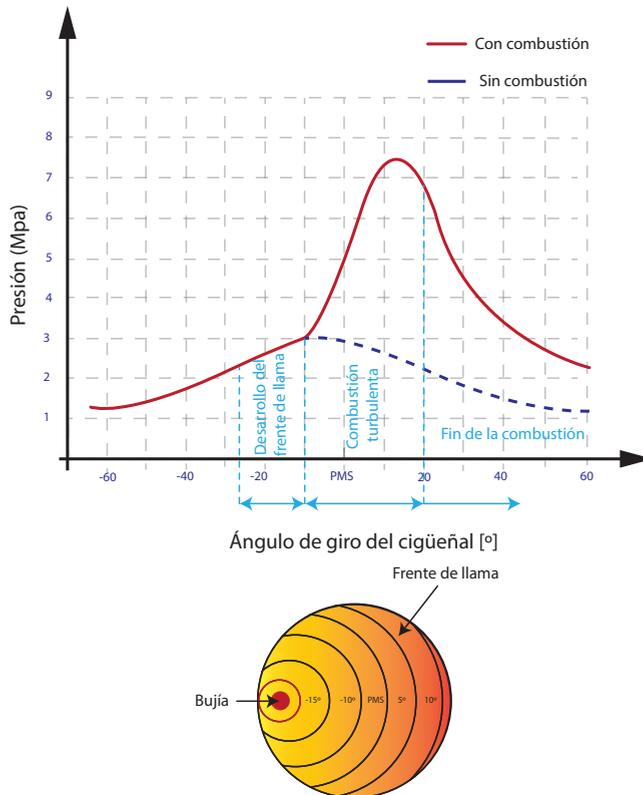


Figura 1.12. Subdivisión del proceso de combustión

1.4.1. Emisiones generadas durante el proceso de combustión real

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro altamente tóxico que dificulta la transportación de oxígeno en la sangre y se produce por la oxidación incompleta del carbono, está directamente relacionado con la dosificación del combustible, en situaciones de mezcla rica ($\lambda < 1$) la cantidad de oxígeno es insuficiente para producir una combustión completa [7]. Su concentración disminuye a medida que la mezcla se va empobreciendo, pero no desaparece debido a la lentitud del proceso de oxidación del CO a CO₂, además, se produce en la combustión de mezclas heterogéneas.

La principal causa de la emisión de CO es la incorrecta dosificación de la mezcla aire-combustible ($\lambda < 1$) y se mide en % de concentración volumétrica

Hidrocarburos no combustionados (HC)

Los hidrocarburos no combustionados son gases altamente irritantes para el sistema respiratorio cuyo contacto a largo puede ser causante de cáncer y son el resultado de una combustión incompleta, en la cual partículas de combustible no tuvieron ninguna reacción al interior de la cámara de combustión.

Se forma cuando el combustible esta dosificado fuera de los límites de inflamabilidad, por ejemplo, en condiciones de mezcla rica $\lambda < 1$ se produce como el resultado de una combustión incompleta por falta de moléculas de oxígeno que puedan oxidar a los hidrocarburos, mientras en condiciones de mezcla muy pobre, la velocidad del frente de llama se ve drásticamente disminuida, con lo cual se genera una combustión muy lenta que no logra oxidar todas las partículas en el interior de la cámara de combustión. Otras razones están asociadas con fallas en el sistema de encendido (*misfire*), insuficiente volatilidad del combustible y consumo de aceite.

Existen varios factores responsables de la generación de HC pero entre los más influyentes están la inadecuada dosificación del combustible, defectos en el sistema de encendido, consumo de aceite y desgaste de los elementos internos del motor. Los HC se cuantifican en partes por millón (ppm).

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno son responsables de la producción de lluvia ácida y del *smog* fotoquímico [3], son el resultado de temperaturas y presiones elevadas durante el proceso de combustión que promueve la reacción entre nitrógeno y oxígeno. Como se sabe, para producir una combustión adecuada se necesitan presiones y temperaturas elevadas en la cámara de combustión, por lo cual la producción de NO_x (ppm) es inevitable [9].

En el contexto ecuatoriano las emisiones NO_x no son reguladas por los entes de control locales.

Luego de revisar los diferentes contaminantes producidos por vehículos, se muestra en la Figura 1.13 un resumen del proceso de combustión real producido en un motor de encendido provocado.

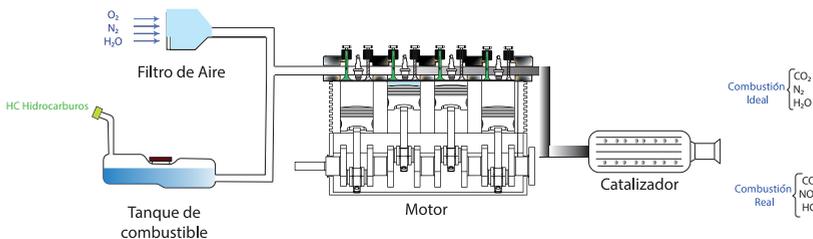


Figura 1.13. Reactivos antes y después del proceso de combustión

1.4.2. Ventana lambda

Las emisiones contaminantes generadas a partir del proceso de combustión dependen, entre otros factores, del dosado de la mezcla. La ventana lambda es una herramienta muy útil que permite monitorear de manera gráfica las cantidades de gases emitidos por el motor de combustión interna como se puede observar en la Figura 1.14.

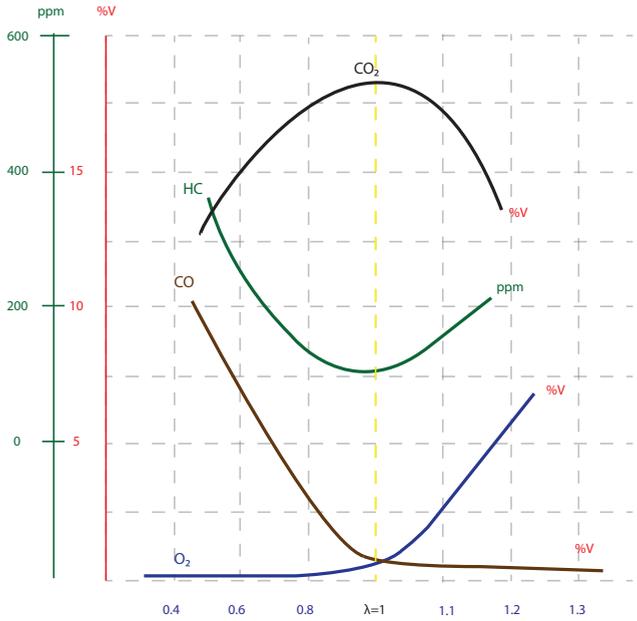


Figura 1.14. Ventana lambda

Entre los muchos aspectos que se pueden estudiar acerca del funcionamiento del motor, los más importantes en esta obra son los siguientes:

- Tipo de mezcla (rica o pobre).
- Estado del catalizador

Además, permite monitorear el comportamiento de las emisiones de gases de escape y determinar el tipo de mezcla que se está quemando y las condiciones de funcionamiento del catalizador.

En una combustión teórica, a la salida del tubo de escape se debería encontrar solo CO_2 (es un factor importante para determinar la eficiencia en el proceso de combustión) N_2 , y H_2O en condiciones ideales y con un dosado $\lambda = 1$, pero en la realidad según la dosificación de la mezcla del motor, carga y estado de los componentes se encuentran otros tipos de subproductos como se puede observar en la Figura 1.15.

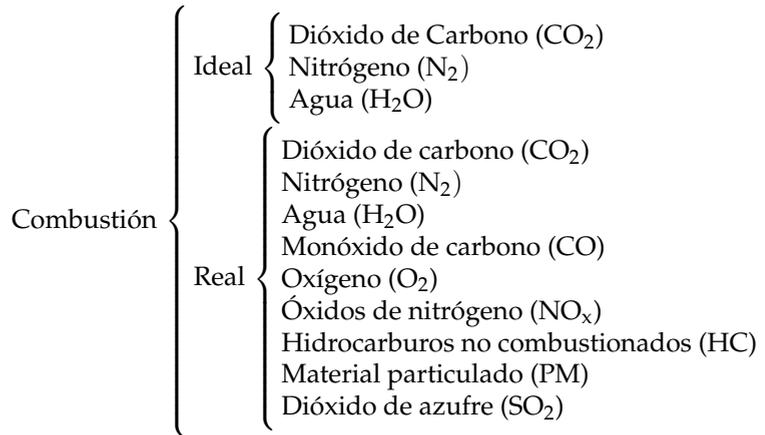


Figura 1.15. Descripción de los contaminantes en una combustión ideal y real

Por limitaciones de producción, el combustible empleado no está totalmente puro y se encuentra contaminado con componentes químicos como el plomo, azufre, bencina entre otros, esto afecta la relación aire-combustible influyendo tanto en el rendimiento del motor, así como en la generación de emisiones.

1.4.3. Relación entre λ potencia y consumo específico

Como se puede ver en la Figura 1.16, la potencia máxima (kW) de un motor se obtiene con una mezcla ligeramente rica, mientras que el consumo específico mínimo (g/kWh) se consigue con una mezcla ligeramente pobre. Para un mejor entendimiento es necesario dejar claro los siguientes conceptos:

- **Potencia:** es la porción de trabajo que genera un motor por unidad de tiempo, depende de factores como la relación de compresión, cilindrada, dosado de la mezcla, adelanto al encendido, entre otros.
- **Consumo específico:** es la relación que existe entre la masa de combustible consumida por la unidad potencia generada por el motor, por ende depende de los mismos factores que influyen sobre la potencia generada por el motor.

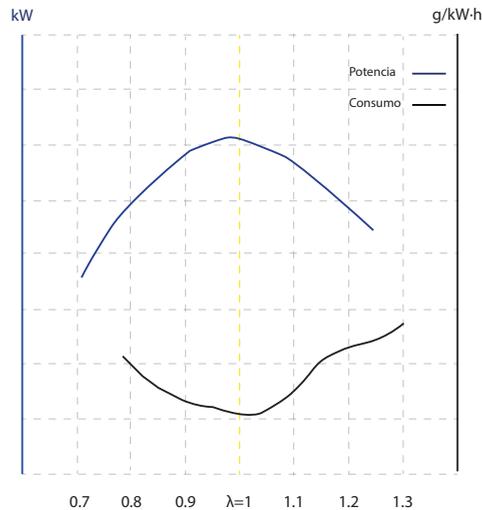


Figura 1.16. Curvas de potencia y consumo específico

1.4.4. Catalizador

Es un elemento que facilita una reacción química sin intervenir en ella, puede considerarse como un dispositivo de postcombustión en el cual se tratan los gases provenientes del motor.

El catalizador tiene menos de una décima de segundo para recombinar los gases tóxicos y producir sustancias no perjudiciales para la salud, como el CO_2 , H_2O y O_2 , esto se consigue mediante dos bloques cerámicos que se componen de miles de micro conductos cubiertos de

metales preciosos. En el caso del primer bloque, el recubrimiento es de platino y paladio, que facilitan el proceso de oxidación de las emisiones provenientes del motor, mientras el segundo bloque utiliza como recubrimiento rodio, que se encarga de promover el proceso de reducción de óxidos nitrosos en los gases de escape, como se puede observar en la Figura 1.17.

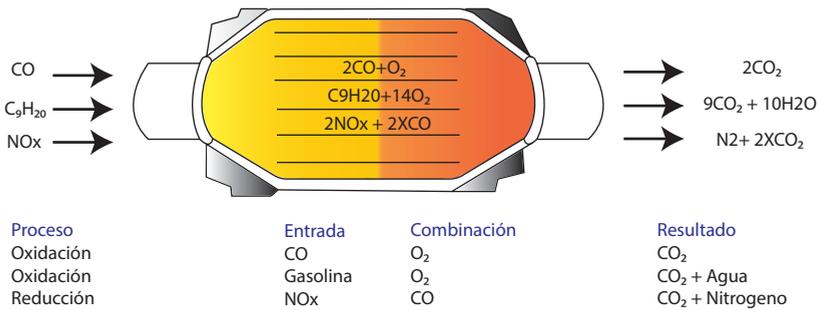
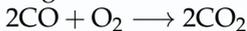


Figura 1.17. Proceso químico interno del catalizador

Los procesos de oxidación y reducción son ineficientes cuando existen bajas concentraciones de oxígeno en los gases de escape (mezclas ricas) y cuando el catalizador se encuentra a temperaturas inferiores a los 150 °C.

Explicación de las reacciones

Oxidación → Consiste en que un elemento gane átomos de oxígeno.



Reducción → Consiste en que un elemento pierda átomos de oxígeno [6].



Acorde al número de reacciones que los catalizadores promueven pueden clasificarse en catalizadores de 2 o 3 vías como se puede ver en la Figura 1.18. Los catalizadores de 2 vías promueven únicamente la reacción de oxidación en dos elementos como son el CO y HC, que

se oxidan de forma completa generando CO_2 y H_2O . Los catalizadores de tres vías cuentan con las dos reacciones de oxidación y además promueven la reacción de reducción en las emisiones de NO_x generando N_2 y CO_2 .

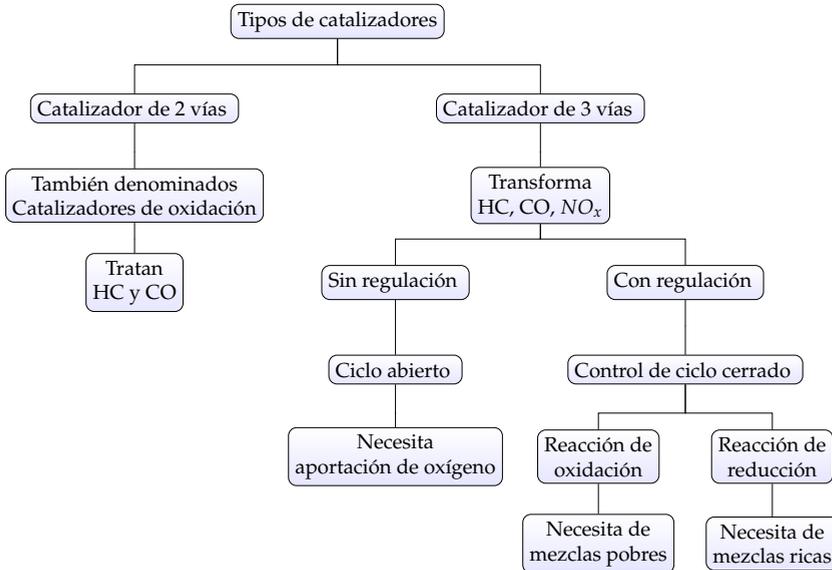


Figura 1.18. Clasificación de catalizadores por número de vías

1.4.5. Comportamiento de las emisiones contaminantes según el factor λ antes y después de un catalizador

Monóxido de carbono (CO)

La principal causa para la generación de CO es la deficiencia de oxígeno en la preparación de la mezcla, por ende, como se puede observar en la Figura 1.19 antes del catalizador la emisión de CO se incrementa cuando el motor trabaja con mezcla rica, mientras que cuando el factor λ se incrementa (mezcla pobre) su concentración en los gases de escape disminuye.

Después del catalizador se observa que la emisión en mezcla rica es prácticamente la misma debido a la baja concentración de oxígeno en

los gases de escape, cuando la mezcla se empobrece esta concentración aumenta, con lo que se promueve la reacción de oxidación convirtiendo el CO a CO₂, esto genera que la concentración de CO disminuya.

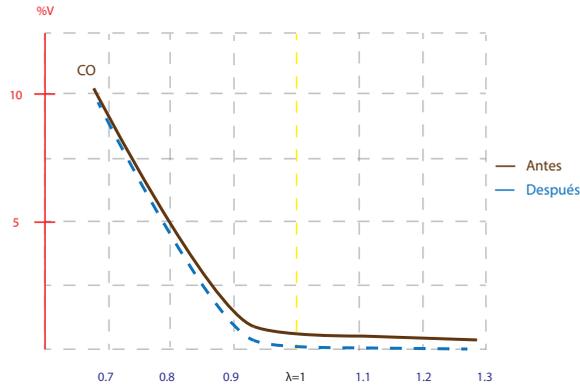


Figura 1.19. CO antes y después del catalizador

Las emisiones de monóxido el carbono (CO) dependen de variables como el dosado de la mezcla, adelanto al encendido, régimen de giro, octanaje del combustible y carga del motor. En el diagrama de efectos principales se representa las variables con mayor influencia en la producción de CO. Como se observa en la Figura 1.20 el factor lambda es la variable más influyente en la generación de emisiones de CO especialmente en mezclas ricas, variables como el adelanto al encendido, el régimen de giro de motor y el octanaje del combustible no influyen sobre el incremento de las emisiones de CO, mientras el aumento de carga en el motor ocasiona ligeros incrementos sobre las emisiones de CO.

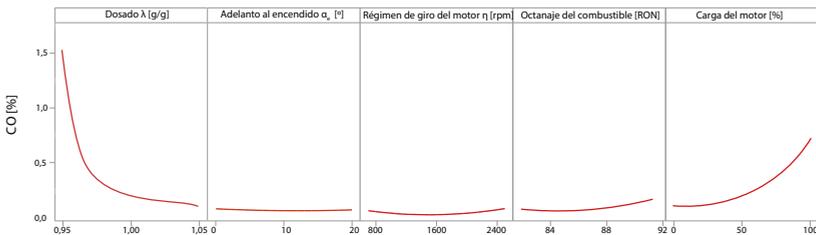


Figura 1.20. Diagrama de efectos principales para CO

Hidrocarburos no combustionados (HC)

La emisión de HC es alta con mezcla rica debido a la ausencia de oxígeno en el proceso de oxidación del combustible, su concentración disminuye al valor mínimo con mezcla ligeramente rica ($\lambda \approx 0.95$) y nuevamente se incrementa con mezcla pobre debido a la disminución de la velocidad del frente de llama (combustión lenta).

Luego del catalizador, como se aprecia en la Figura 1.21, la emisión en mezcla rica es prácticamente la misma debido a la ausencia de oxígeno en los gases de escape para promover la reacción de oxidación. Según se incrementa el factor λ , se verifica la disminución en la emisión de HC, debido al incremento en la eficiencia del catalizador.

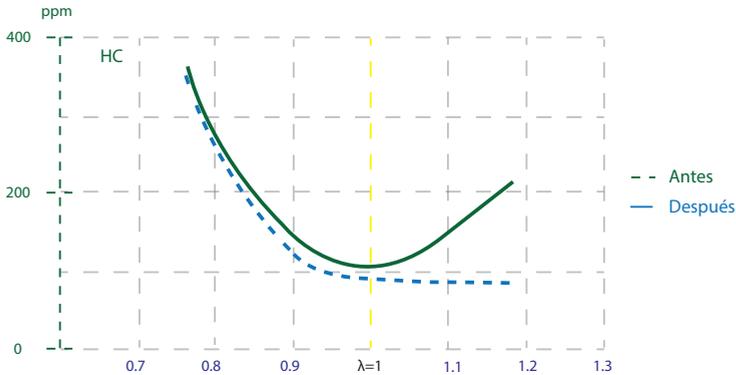


Figura 1.21. HC antes y después del catalizador

Las emisiones de HC son muy sensibles a las variables de funcionamiento del motor. En la Figura 1.22 se observa que el factor lambda produce elevadas emisiones en mezclas extremadamente ricas o pobres, debido a la falta de oxígeno para la oxidación del combustible y a la disminución de la velocidad del frente de llama, respectivamente. La menor emisión de HC se consigue con un dosado ligeramente rico. Con respecto al del adelanto al encendido la menor emisión de HC se consigue con valores ligeramente inferiores de los recomendados por el fabricante, adelantos más pronunciados incrementan la emisión de este contaminante. Al incrementar el régimen de giro del motor la concentración de HC en los gases de escape disminuye. Respecto del combus-

tible la concentración de HC disminuye con el uso de gasolina de alto octanaje. De igual forma que el CO su concentración es proporcional a la carga del motor, mientras que ambas se reducen con un dosado ligeramente pobre. El adelanto al encendido presenta valores mínimos de emisiones en ángulos reducidos; además, las emisiones de HC no son dependientes del régimen de giro del motor y combustibles con valores altos de octanaje disminuyen significativamente las emisiones contaminantes.

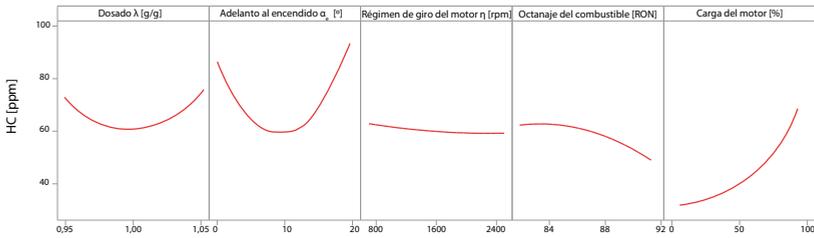


Figura 1.22. Diagrama de efectos principales para HC

Dióxido de Carbono (CO₂)

En una combustión teórica, todo el carbono del combustible debería oxidarse y convertirse en CO₂ pero cuando se trabaja con mezclas ricas la ausencia de oxígeno ocasiona que el carbono se oxide parcialmente, dando lugar a la formación de CO, por lo que la emisión de CO₂ disminuye; mientras que al trabajar con mezclas pobres la emisión de CO₂ disminuye debido a la insuficiente cantidad de combustible en la reacción. Cuando los gases generados por la combustión pasan a través del catalizador, la concentración de CO₂ se incrementa para $\lambda > 1$, debido a la oxidación del CO y HC, este proceso de oxidación no es posible en mezclas ricas debido a la ausencia de oxígeno, como se ve en la Figura 1.23.

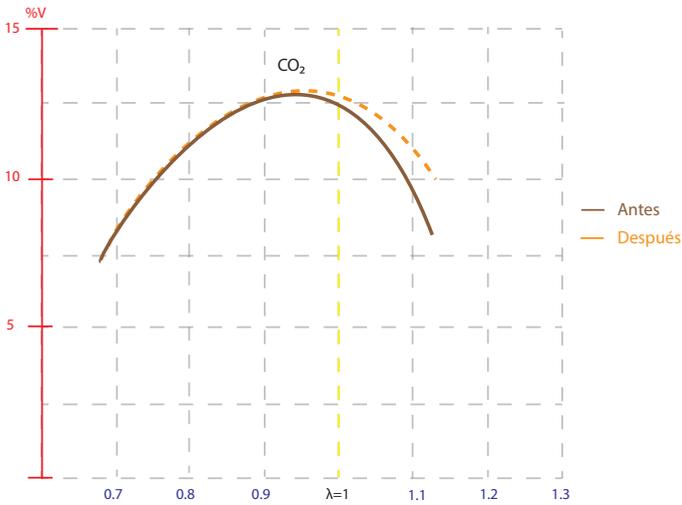


Figura 1.23. CO₂ Antes y después del catalizador

La interacción de diversas variables de funcionamiento del motor interviene sobre el incremento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). En el diagrama de efectos principales (ver Figura 1.24) se muestran las variables más representativas en cuanto al incremento de emisiones de CO₂.

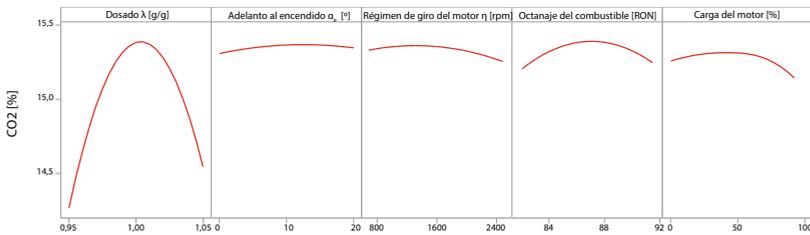


Figura 1.24. Diagrama de efectos principales para CO₂

El dosado de la mezcla es el factor más representativo en la generación de CO₂, mezclas ligeramente ricas y cercanas a $\lambda = 1$ producen niveles bajos de emisión, por otro lado, el adelanto al encendido, velocidad en el régimen de giro del motor y carga son factores que intervienen levemente sobre el CO₂. El octanaje de combustible tiene mayor

participación que las variables anteriores en cuanto a la reducción de emisiones de CO_2 con el uso de combustibles de alto octanaje.

Oxígeno (O_2)

En el interior de la cámara de combustión no todo el oxígeno puede reaccionar con las partículas de combustible por lo cual existen partículas de O_2 sin reaccionar en los gases de escape, su emisión es sumamente baja en mezclas ricas debido a la ausencia de aire en la reacción, esta concentración se incrementa a medida que el factor lambda asume valores $\lambda \geq 1$ como se observa en la Figura 1.25.

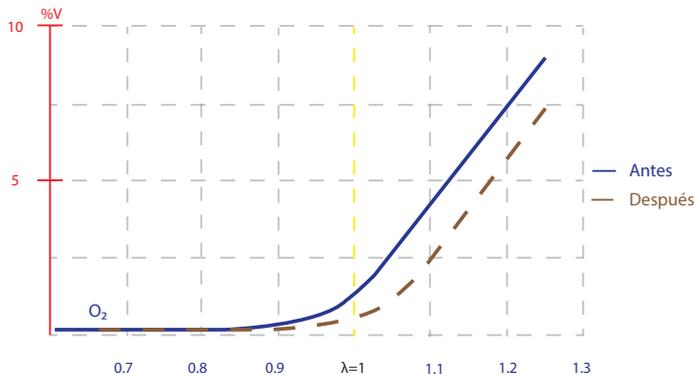


Figura 1.25. O_2 antes y después del catalizador

La concentración de oxígeno (O_2) en los gases de escape se encuentra condicionada por el dosado de la mezcla, con valores de mezcla ligeramente ricos se obtienen reducidas emisiones y al aumentar este valor las emisiones crecen considerablemente (ver Figura 1.26). Variables como el adelanto al encendido, régimen de giro y octanaje del combustible no aportan significativamente al incremento de emisiones de oxígeno, sin embargo, la variable de carga está condicionada por el factor lambda, por lo cual su valor es mínimo en altos valores de carga.

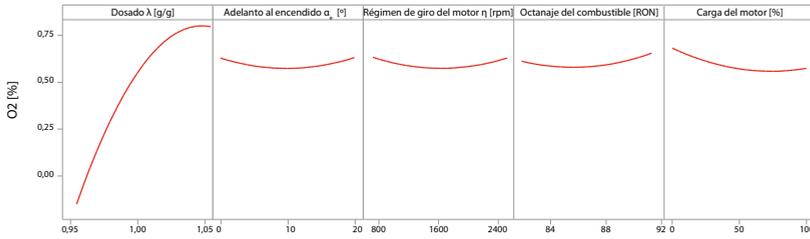


Figura 1.26. Diagrama de efectos principales para O₂

En este capítulo se analizó la relación existente entre las emisiones contaminantes y el factor lambda (λ) adelanto al encendido (α), régimen de giro (η), octanaje de combustible y carga motor (%), sin embargo estos gases no dependen exclusivamente de estos parámetros. La composición de las emisiones contaminantes depende de varios factores adicionales como: tipo de combustible, estado del sistema de ignición, estado físico del motor, entre otros. El factor λ ; explica la relación de la mezcla aire-combustible en el motor. Un valor de λ igual a uno indica una mezcla estequiométrica, mientras que valores menores indican mezclas ricas caracterizadas por exceso de combustible y escasez de oxígeno; a su vez valores mayores a uno identifican mezclas pobres caracterizadas por una concentración alta de oxígeno. Estas variaciones afectan las emisiones de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Asimismo, parámetros como el adelanto al encendido (α), definen el momento en el cual la chispa inicia la ignición de la mezcla en la fase de combustión. Una modificación al adelanto influye sobre la presión máxima de combustión y la eficiencia térmica, afectando la producción de contaminantes como NO_x, donde un adelanto excesivo puede incrementar la temperatura de combustión. Además, un régimen de giro más alto puede mejorar la atomización del combustible y reducir las emisiones de HC, pero también puede incrementar las emisiones de NO_x debido a mayores temperaturas y presiones alcanzadas. Otro factor analizado es el octanaje del combustible, que determina su capacidad para resistir a la detonación. Los combustibles con un mayor octanaje permiten alcanzar mayores presiones en el interior de la cámara de combustión y un mejor encendido de la mezcla reduciendo las emisiones de CO y HC.

Bibliografía

- [1] R. K. Maurya, *Reciprocating Engine Combustion Diagnostics*, Springer International Publishing, 2019.
- [2] K. Hoag y B. Dondlinger, *Vehicular Engine Design*, 2nd ed., Vienna: Springer, 2016.
- [3] F. Payri *et al.*, *Motores de combustión interna alternativos*, Reverté, 2011.
- [4] C. J. Boluda *et al.*, "La complejidad química de las gasolinas de automoción." *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, vol. 2, no. 2, pp. 51-79, 2019.
- [5] K. Reif, *Gasoline Engine Management, Systems and Components*, Springer Vieweg, 2015.
- [6] *ISO 5164:2005 Petroleum products - Determination of knock characteristics of motor and aviation fuels - Motor method*, ISO, 2005.
- [7] J. Alvares *et al.*, *Motores alternativos de combustión interna*, Ediciones UPC, Barcelona, 2005.
- [8] Información Técnica - Catalizadores, disponible en: <https://www.as-sl.com/es/informacion-tecnica-catalizadores/>. [Accedido: 06-ago-2024].
- [9] P. F. Flynn, G. L. Hunter, L. Farrel, R. P. Durrett, O. Akinyemi, A. O. Zur Loye, and W. J. Pitz, "The inevitability of engine-out NOx emissions from spark-ignited and diesel engines". *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, no. 1, pp. 1211-1218, 2000.

- [10] C. A. R. Pimentel y A. Hetem, "Computation of air chemical equilibrium composition until 30000K - Part I", *J. Aersp. Technol. Manag.*, vol. 3, no. 2, pp. 111–126, 2011, doi: 10.5028/jatm.2011.03021011.

2 | Sistemas de inyección a gasolina

2.1. Sistemas de alimentación de combustible

2.1.1. La inyección de combustible

Las emisiones contaminantes producidas por los motores de combustión interna generan efectos negativos en la salud y el medio ambiente [1], por lo cual se han implementado sistemas que mejoren la dosificación del combustible y otras condiciones de operación para reducir las emisiones de contaminantes producidas por los vehículos propulsados con motores de combustión interna. Por estas razones, sistemas como el carburador han sido sustituidos por sistemas de inyección de combustible, capaces de regular la dosificación del combustible en función de las variables de funcionamiento del motor, que son adquiridas mediante sensores, y por intermedio de una unidad de control electrónico (ECU) determinar en qué instante y que cantidad de combustible se debe aportar a cada cilindro en cada ciclo.

En esta sección se explican los sistemas de inyección indirecta desde un punto tecnológico y constructivo, para la mayoría de los ejemplos se usa un motor de cuatro tiempos con un orden de encendido (1-3-4-2) como se observa en la Figura 2.1, obteniéndose la siguiente clasificación de los sistemas de inyección.

- **Inyección simultánea:** la ECU gestiona la inyección de combustible en un mismo instante de tiempo en todos los cilindros, esto es 4 veces por cada ciclo de trabajo, es decir una inyección cada 180° .
- **Inyección semisecuencial:** el combustible es inyectado en dos ci-

lindros al mismo tiempo, a esta pareja de cilindros se la denomina como cilindros compañeros (1-4; 2-3), se generan dos inyecciones por cilindro por ciclo.

- **Inyección secuencial:** el sistema inyecta combustible (cada 720°) en un cilindro a la vez, durante la apertura de la válvula de admisión.

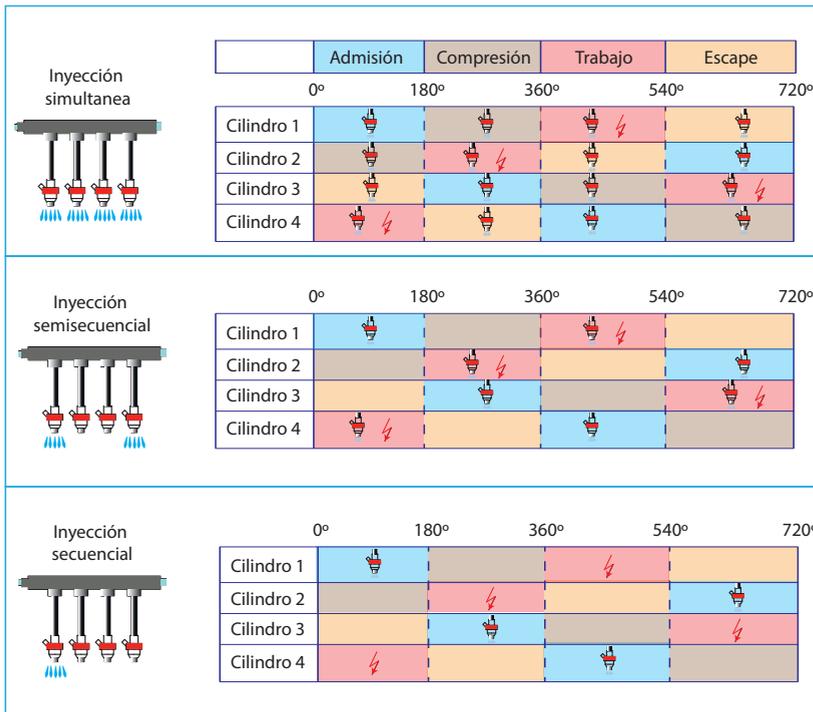


Figura 2.1. Clasificación de los sistemas de inyección

2.1.2. Constitución y funcionamiento de componentes.

Circuito de alimentación de combustible

El circuito de alimentación mostrado en la Figura 2.2 es el encargado de trasladar el combustible desde el depósito hasta el inyector y generalmente se constituye por:

- Depósito de combustible
- Prefiltro
- Bomba
- Filtro
- Conductos
- Regulador de presión
- Riel de inyectores
- Inyectores

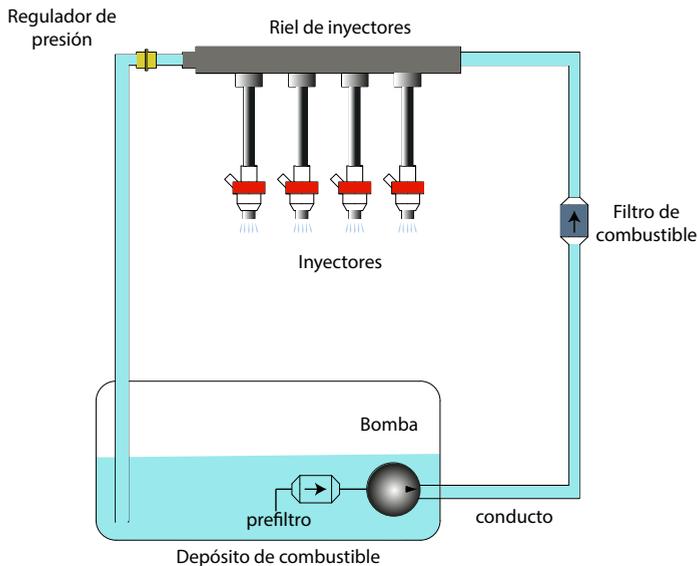


Figura 2.2. Componentes del sistema de inyección

Depósito de combustible

El depósito de combustible tiene por objeto almacenar combustible para brindar una autonomía de circulación de 400 a 500 km. Generalmente son constituidos de un polímero (polietileno HDPE), aunque en la antigüedad eran fabricados de acero, pero su uso fue discontinuado debido al proceso de oxidación.

Prefiltro

El prefiltro se sitúa en la toma de combustible de la bomba, su objetivo es impedir que partículas extrañas ingresen a la misma, se recomienda su cambio cada 60 000 km, debido a que su obstrucción genera un fenómeno conocido como cavitación (esta acción produce un leve vacío y es más notorio con cantidades bajas de combustible en el depósito, debido a la formación de burbujas de vapor en líquidos con presión reducida, donde las pequeñas burbujas producidas implosionan en el acto y pueden destruir ciertas partes del mecanismo de bombeo) que disminuye drásticamente la vida útil de la bomba de combustible.

Bomba de combustible

Es un elemento fundamental dentro del sistema de inyección, encargada de trasladar el combustible desde el depósito hasta el riel de inyectores. Al contrario de las creencias comunes no genera presión sino caudal, el incremento de presión se produce por la oposición al paso del caudal en su recorrido a través del regulador de presión, cuya calibración depende de cada fabricante.

La bomba de combustible puede estar ubicada en el exterior del depósito de combustible o sumergida dentro del mismo (son las más utilizadas en la actualidad).

Se compone de un motor eléctrico que trabaja con el voltaje de alimentación del sistema de inyección y de un impulsor (elemento de bombeo) que puede estar formado por: álabes, engranes o paletas. Dentro de la bomba se encuentran diferentes válvulas, las cuales tienen su función específica:

- **Válvula de liberación:** esta válvula se abre cuando el sistema se estanca y excede la presión máxima permitida, de esta manera evita que el motor de la bomba sufra daños por sobrecalentamiento disminuyendo la probabilidad de ignición y riesgo de incendio.
- **Válvula *check*:** evita que el combustible regrese al tanque cuando

se apaga el motor y de esta manera se mantiene presurizado el sistema.

La configuración de la bomba de combustible se puede ver en la Figura 2.3.

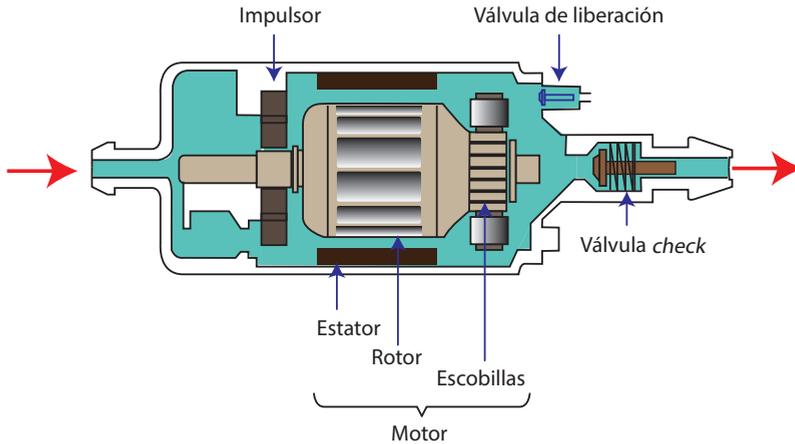


Figura 2.3. Esquema de funcionamiento de una bomba de combustible

Las bombas sumergidas vienen incorporadas con un prefiltro y son las más utilizadas actualmente por presentar ventajas como:

- La gasolina refrigera y lubrica la bomba.
- La gasolina retorna más fría al circuito de alimentación debido a las pérdidas por convección y conducción en las cañerías de combustible.

La corriente que consume la bomba es directamente proporcional a la presión de trabajo, como se muestra en la Figura 2.4, mientras se tiene mayor oposición al giro de la bomba mayor es el consumo energético como se aprecia en la Figura 2.5. Por lo tanto, el valor de la corriente es un excelente indicador del estado físico de la misma. El comportamiento de la corriente se analizará en apartados posteriores.

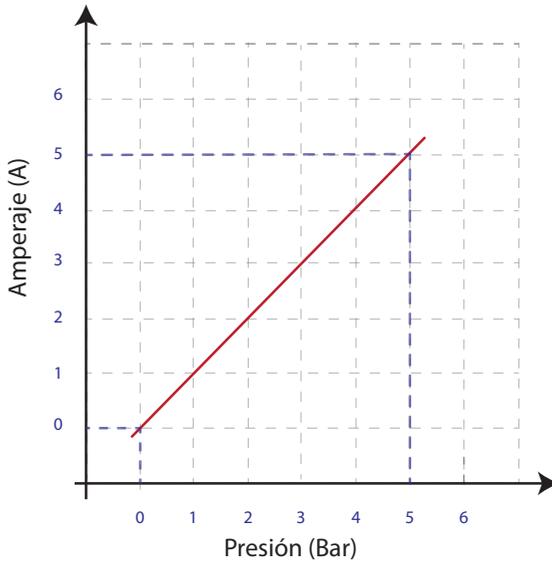


Figura 2.4. Relación presión-amperaje

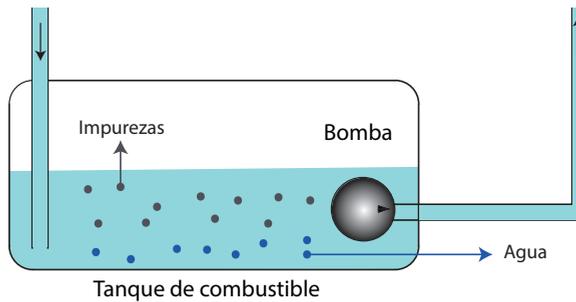


Figura 2.5. Combustible con impurezas

Una bomba de combustible en condiciones normales de funcionamiento presenta una vida útil de entre 120 000 y 150 000 km, siempre que el filtro de combustible haya sido sustituido periódicamente acorde a las recomendaciones del fabricante.

Disposición eléctrica

La unidad electrónica de control (ECU) gobierna la bomba de combustible por medio de un relé, cuyo bobinado se alimenta desde el interruptor de encendido mediante el terminal 86 y se aterriza al interior de la ECU a través del terminal 85, de esta forma la ECU controla el paso de corriente entre los terminales 30 y 87. El terminal 87 se conecta al borne positivo de la bomba, que se mantiene aterrizada de forma permanente, como se muestra en la Figura 2.6.

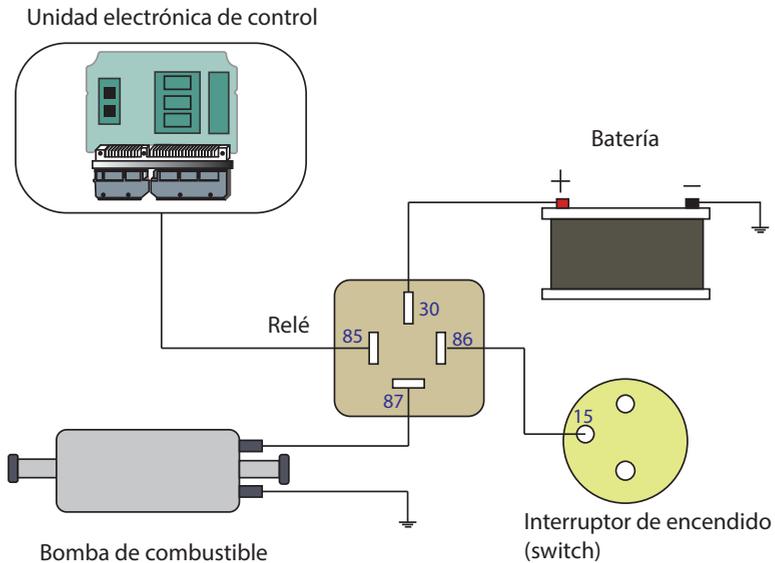


Figura 2.6. Diagrama de control de la bomba de combustible

La bomba de combustible se enciende únicamente cuando el motor de combustión interna se encuentra girando, esto puede ser durante el arranque o cuando el motor está encendido, si el interruptor de encendido se encuentra activado y el motor no está girando la bomba se activa por un lapso aproximado de 3 segundos, para garantizar que la presión de trabajo alcance su valor nominal, luego de este periodo la bomba se desactiva hasta que la ECU detecte el giro del motor de combustión interna.

Filtro

Es el elemento encargado de impedir que partículas contaminantes que atravesaron el pre filtro accedan al resto del sistema de inyección, los fabricantes recomiendan su sustitución cada 15 000 km para filtros montados fuera del tanque de combustible y 60 000 km para los ubicados en su interior, pudiendo disminuirse este periodo en función de la calidad del combustible, la vida útil de la bomba de gasolina depende del grado de contaminación (agua, óxido y silicio) del combustible presente en el depósito, por lo cual los filtros deben ser sustituidos periódicamente debido a que tienden a obstruirse y producen restricción al flujo de gasolina hacia los inyectores ocasionando que la bomba trabaje en exceso, aumentando su consumo energético y disminuyendo su vida útil.

Regulador de presión

El regulador mantiene la presión del combustible en el riel de inyectores según los valores especificados por el fabricante, siendo este diferente para cada sistema de inyección como se muestra en la Tabla 2.1, considerando que esta presión varía en función del incremento de la carga.

Tabla 2.1. Tipos de sistemas de inyección según la presión del sistema

Sistema	Ubicación del regulador	Presión (Bar)	Presión (psi)
Monopunto	TBI (cuerpo de aceleración)	1.37	20
Multipuerto	Depósito de combustible	2.75	40
Multipuerto	Riel de inyectores	3.45	50
Vortec	Cuerpo de inyectores	4.13	60

En el caso del sistema de inyección multipuerto con regulador de presión en el riel de inyectores, la presión de combustible siempre será constante en regímenes estacionarios de funcionamiento del motor. En estados transitorios (ver Tabla 2.2) la variación de presión en el colector de admisión durante bajos regímenes de revoluciones tira del diafrag-

ma del regulador disminuyendo la fuerza de contracción del muelle, permitiendo que más combustible regrese al depósito, mientras al abrir la mariposa de aceleración aumenta la presión en el colector, disminuye el vacío y la oposición generada por el muelle aumentará restringiendo el flujo de combustible al tanque, esto producirá el aumento en la presión del riel de combustible. La presión de combustible es dependiente de la carga del motor como se muestra en la Figura 2.7.

Tabla 2.2. Estado transitorio de la presión de alimentación de combustible

Estado	Vacío	Presión del colector	Presión de inyección
Ralentí	Alta	Baja (46 psi)	Baja (40 psi)
Plena carga	Baja	Alta (90 psi)	Alta (45 psi)

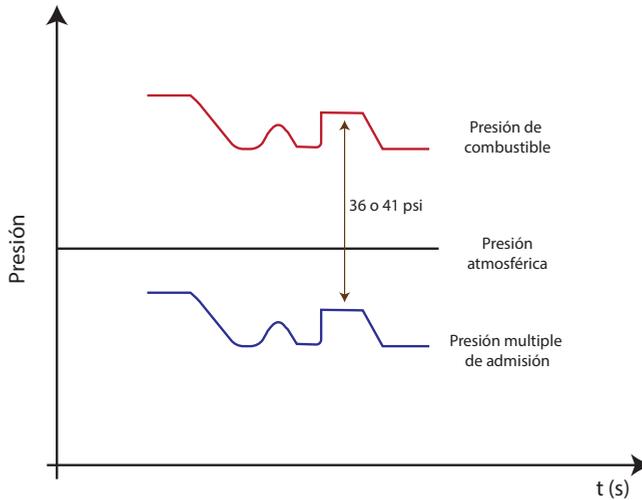


Figura 2.7. Regulador de presión de vacío [3]

Regulador de presión constante (sistema de entrega de combustible sin retorno)

El regulador de presión situado en el interior del tanque de combustible se localiza sobre la bomba (ver Figura 2.8), este tipo de regulador

mantiene una presión constante e independiente de la presión del colector de admisión, la cual está determinada por un resorte ubicado en el interior del mismo. Si el combustible impulsado por la bomba de gasolina supera la presión del resorte, el fluido regresa inmediatamente al tanque sin pasar a través de la línea de combustible. Al no existir relación del sistema con la carga del motor, el enriquecimiento de la mezcla en aceleración súbita se compensa con un mayor tiempo de apertura en el inyector.

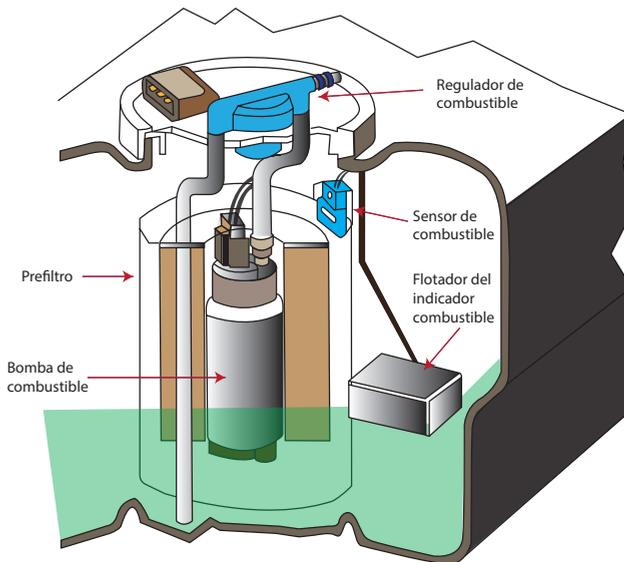


Figura 2.8. Regulador sin retorno de combustible [8]

Atenuador o amortiguador de pulsaciones

El amortiguador de pulsaciones se encuentra localizado al final del riel de inyectores y tiene por objeto suprimir los picos generados por la conmutación entre la apertura y cierre de los inyectores durante la dosificación de combustible, siendo más notorio este efecto a bajos regímenes de giro del motor [9], como se observa en la Figura 2.9.

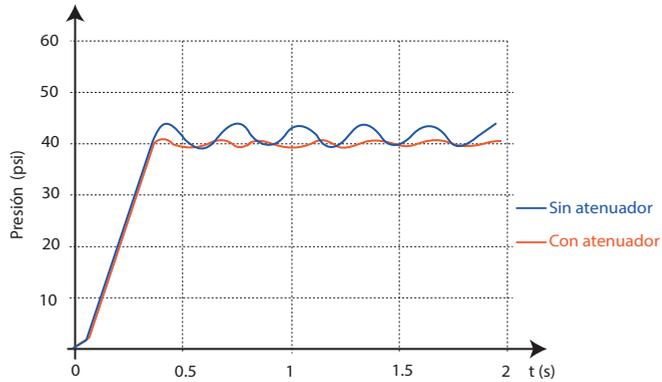


Figura 2.9. Señal del efecto de atenuación

Inyectores

Los inyectores son electroválvulas ON-OFF constituidas por una bobina, una armadura, un resorte y una válvula. Cuando una corriente eléctrica circula a través de la bobina, se induce un campo magnético que permite la apertura de la válvula (ver Figura 2.10). Los inyectores tienen dos cables, uno es de alimentación constante de 12 V y el otro es un pin de señal de activación pulsante controlado por la unidad de control la cual induce la bobina del inyector.

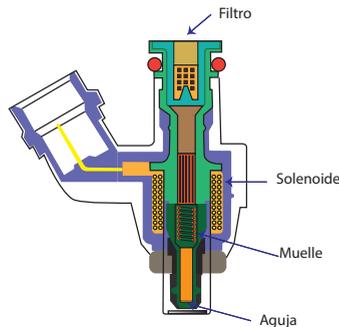


Figura 2.10. Vista seccionada de un inyector

La dosificación de combustible es dependiente del tiempo de apertura del inyector que se expresa en milisegundos (ms), al accionar el inyector por un intervalo inferior a 0.5 ms no se activa y sobre los 15 ms el cierre del inyector no puede ser controlado, como se observa en la Figura 2.11. La curva tiempo de volumen de inyección difiere entre fabricantes, pero por lo general se encuentran dentro de los siguientes valores.

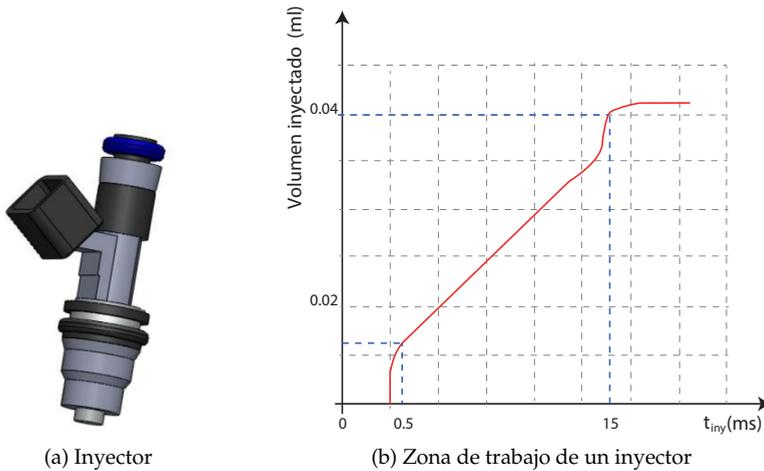
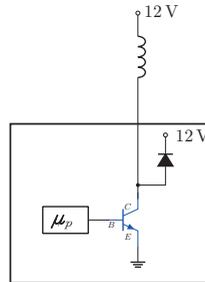


Figura 2.11. Funcionamiento de un inyector

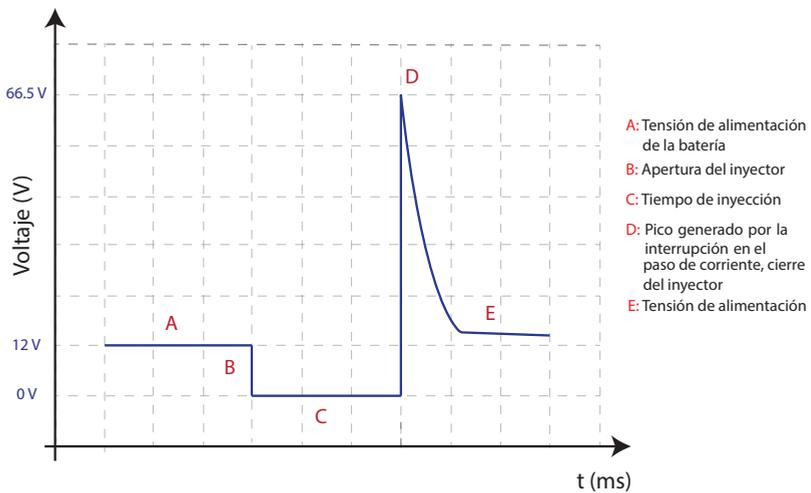
Oscilograma de inyectores

El oscilograma de un inyector permite describir las características de funcionamiento a través de la representación gráfica del voltaje frente al tiempo, como se muestra en la Figura 2.12. En la zona A puede verificarse el voltaje de alimentación, en el flanco B se observa la conmutación del transistor que produce la apertura del inyector, mientras que en el intervalo C se muestra el tiempo que el inyector permanece abierto, al que se denomina tiempo de inyección, durante este período el transistor permanece en saturación. El punto D se produce cuando el transistor pasa a la fase de corte, lo que ocasiona una autoinducción por la interrupción del paso de corriente en el bobinado, ocasionando

el cierre del inyector. El pico inductivo es atenuado por el diodo conectado en antiparalelo al inyector, como se muestra en la Figura 2.12a. Finalmente el voltaje regresa al valor de alimentación.



(a) Circuito de control del inyector



(b) Zona de trabajo de un inyector

Figura 2.12. Oscilograma de un inyector

Si el alternador entrega valores de voltajes fuera del rango (altos o bajos), los inyectores no trabajan adecuadamente sobre la dosificación de combustible, ya que el voltaje de alimentación influye sobre el tiempo de apertura real del inyector, es decir, cuando el voltaje es elevado la mezcla es enriquecida, mientras que cuando el voltaje es bajo la mezcla se empobrece.

En la Figura 2.13 se analiza la relación entre la corriente de alimentación y el tiempo de apertura del inyector. La inductancia del bobinado genera un retraso a la apertura al inyector que se produce cuando alcanza el 63.4 % del valor de la intensidad máxima, el voltaje es proporcional a la intensidad, es decir ambos aumentan o disminuyen en función del voltaje. En la Tabla 2.3 se resume el comportamiento de la corriente en cada punto del oscilograma del inyector y su relación con el dosado de la mezcla.

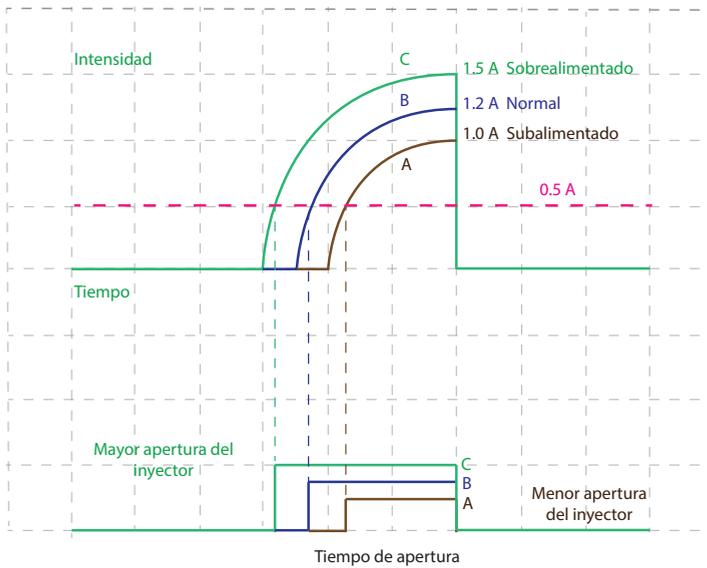


Figura 2.13. Relación alimentación-tiempo de apertura de un inyector.

Tabla 2.3. Relación intensidad-mezcla

Punto	Intensidad	Descripción	Mezcla
A	Disminuye	Intensidad disminuye, tiempo de inyección disminuye	Pobre
B	Normal	Intensidad normal, tiempo de inyección normal	Estequiometrica
C	Aumenta	Intensidad aumenta, tiempo de inyección aumenta	Rica

Para poder estimar la corriente que circula por un inyector se puede hacer uso de la ecuación 2.1.

$$I = \left(\frac{\frac{1}{R}}{\frac{L}{R} \cdot s + 1} \right) V \quad (2.1)$$

Donde:

- I = corriente eléctrica
- R = resistencia
- s = sección del núcleo
- V = voltaje
- $\frac{L}{R}$ = constante de tiempo del inyector

Mantenimiento de los inyectores

Por los inyectores fluye constantemente combustible, pero partículas de dimensiones reducidas atraviesan los filtros previos de la línea de alimentación, por lo cual estos tienden a acumular impurezas en su boquilla, para remover los contaminantes se emplean técnicas comunes de limpieza como: diálisis y lavado por ultrasonido.

- **Diálisis:** este método consiste en reemplazar el combustible del motor por un solvente cuyo objetivo es disolver las impurezas acumuladas en la tobera del inyector; por lo que no es recomendable debido a que al aplicar el solvente se puede reducir drásticamente las propiedades del aceite del motor, además, de eliminar la carbonilla alojada en la cabeza del pistón. Por otro lado, las partículas desprendidas por el inyector pueden adherirse a las paredes del cilindro y los asientos de las válvulas, disminuyendo la hermeticidad en los cilindros.
- **Lavado por ultrasonido:** esta técnica consiste en retirar los inyectores de la riel y exponerlos a un lavado sobre una batea de acero inoxidable con líquido limpiador de base alcalina por 15 minutos aproximadamente. La onda de ultrasonido generada por un transductor piezoeléctrico elimina los residuos alojados en el inyector. Posteriormente se colocan en un banco de pruebas para

determinar el volumen inyectado por cada inyector y comprobar que no exista una diferencia superior al 5 % entre inyectores, algunos fabricantes recomiendan esta limpieza cada 50.000 kilómetros (ver Figura 2.14).

Ultrasonido

El ultrasonido genera ondas de entre 43-47 kHz que causan cavitación y producen implosiones que desintegran las impurezas del inyector.

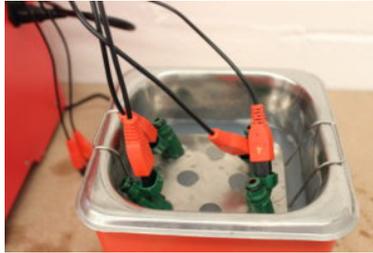


Figura 2.14. Limpieza por ultrasonido de los inyectores

2.2. Sistema de aspiración de aire

El sistema de admisión de aire está integrado por un filtro que impide el ingreso de impurezas al interior del motor y evita que este se desgaste por abrasión [4]. Además, de un colector de admisión que distribuye aire adecuadamente a cada uno de los cilindros y asegura la mayor cantidad de mezcla aire-combustible posible en el motor [5]. El colector está compuesto por un plenum que almacena aire en condiciones estables, un cuerpo de aceleración que regula el ingreso de aire al motor y unos conductos que dirigen el aire a cada cilindro como se puede distinguir en la Figura 2.15. Los conductos deben ofrecer poca resistencia al flujo de aire y no pueden ser rugosos debido a que el combustible pulverizado por los inyectores en el colector no se encuentra totalmente evaporado y parte de este se condensa formando una fina película en las paredes de los conductos [6].

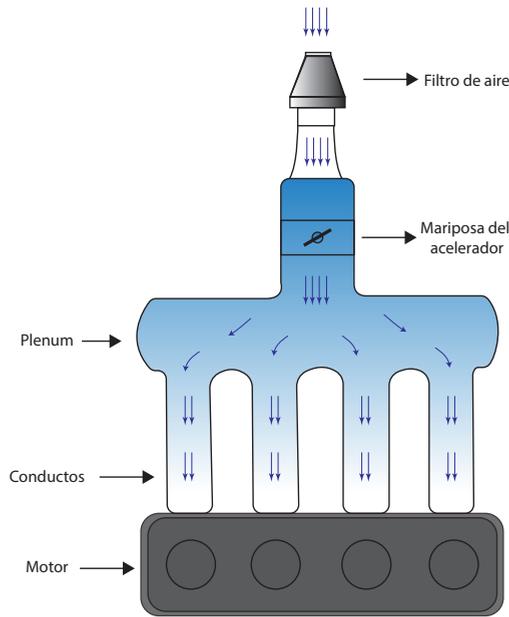


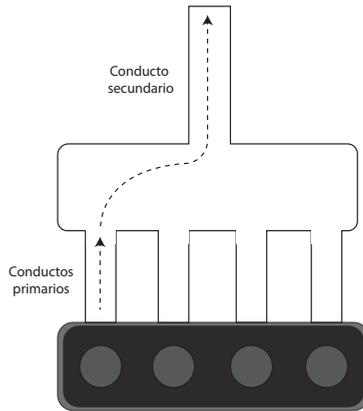
Figura 2.15. Sistema de admisión de aire

2.2.1. Geometría de colectores de admisión

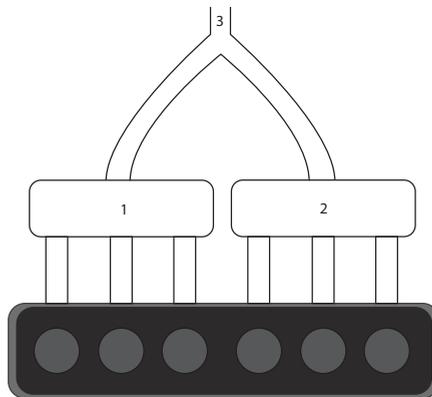
Durante el ciclo de admisión al aspirarse el aire al interior del cilindro, el motor genera una onda de rarefacción (onda depresiva) que se propaga a lo largo de los conductos hasta ser reflejada en alguna discontinuidad, esta onda se propaga a través del conducto primario hasta su extremidad, entonces, la onda de presión viaja hacia la válvula de admisión y puede llegar antes que la válvula se cierre produciendo un aumento en la presión debido a la superposición de las ondas [7]. El efecto entre las ondas incidente y reflejada es utilizado para conseguir un mejor llenado de los cilindros.

Para un motor con varios cilindros, es necesario unir todos los conductos de admisión (conductos primarios) a un colector o tubo común (conducto secundario). Para este tipo de colectores el parámetro más importante es el volumen, que determina la amplitud de onda reflejada. Con un volumen de varias veces la cilindrada del motor se puede

producir una reflexión importante, pero al aumentar el número de cilindros (motores de más de 5 cilindros), se incrementa la interferencia entre ondas debido a un importante solape en las carreras de admisión, por lo cual es difícil sintonizar las ondas y optimizar el efecto de la resonancia. En los motores de más de 5 cilindros, es habitual dividir el colector en dos partes para reducir la interferencia entre ondas y conseguir presiones importantes que aumenten el rendimiento volumétrico del motor como se puede ver en la Figura 2.16.



(a) Esquema de un colector 4-1



(b) Presión en las ramas de un colector 6-2-1

Figura 2.16. Tipos de colectores de admisión

2.2.2. Colectores de geometría variable.

Los colectores de geometría variable son usados para mejorar el llenado de los cilindros independientemente del régimen de giro del motor. Los colectores fijos entregan pares elevados a velocidades de giro bajas y potencias altas a regímenes de giro elevados, por lo cual son ineficientes en muchas zonas de trabajo [5].

Los colectores variables entregan flujo másico en función de las condiciones de trabajo del motor, usando conductos largos para situaciones de bajo régimen de giro (mayor tiempo para aprovechar el fenómeno de resonancia) y conductos cortos para regímenes altos, como se muestra en la Figura 2.17. Algunos fabricantes de vehículos optan por variar las secciones de los conductos, usando áreas transversales reducidas que aceleran el paso de aire en condiciones bajas de régimen de giro y para altos regímenes de giro se disponen de grandes secciones que disminuyen las pérdidas de carga en el llenado.

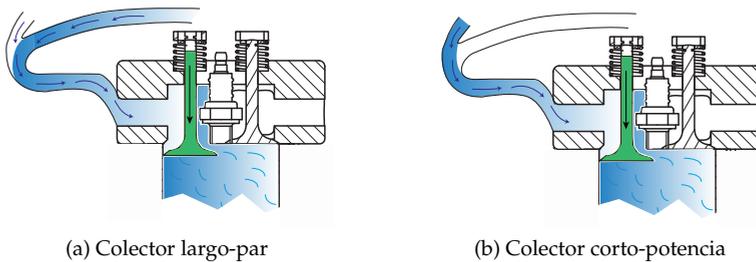


Figura 2.17. Colector de geometría variable

2.3. Central de control electrónica

2.3.1. Principio de funcionamiento de la ECU.

La introducción de la electrónica en la industria automotriz ha generado grandes avances en ahorro de combustible y eficiencia energética del motor, para este fin se han implementado diferentes recursos co-

mo sensores y actuadores que trabajan con señales eléctricas analógicas y digitales, razón por la cual se necesita de una unidad de electrónica de control (ECU) capaz de recibir las señales transmitidas por los sensores, procesar la información de acuerdo a un algoritmo cargado en su memoria interna y controlar los actuadores mediante bucles abiertos o cerrados de acuerdo a los requerimientos del motor [8].

2.3.2. Funciones de los bloques de la central de control electrónica

Bloque de entrada

Es el encargado de acondicionar las señales provenientes de los sensores previo al envío de información al bloque de procesamiento. Existen circuitos que limitan el voltaje de las señales de entrada a la unidad de control, además, de etapas de filtrado que remueven las posibles interferencias que las señales puedan contener. En otros casos las señales son amplificadas hasta voltajes requeridos por el microcontrolador (0-5 V), debido a que la unidad de procesamiento trabaja solo con señales digitales como se visualiza en la Figura 2.18.

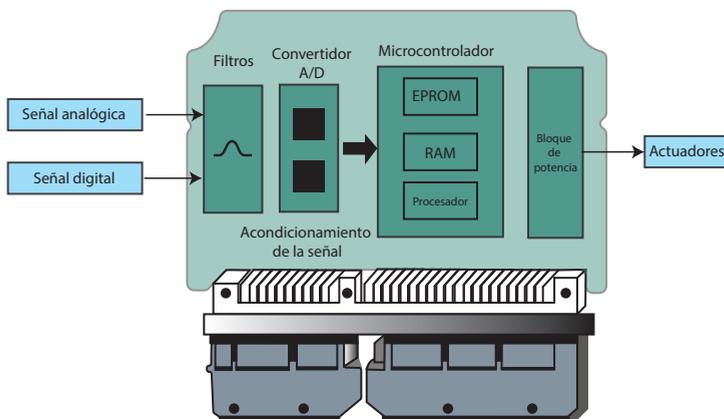


Figura 2.18. Procesamiento ECU

- **Filtro pasa bajo:** este filtro atenúa las señales cuya frecuencia es superior a un umbral denominado frecuencia de corte como se observa en la Figura 2.19.

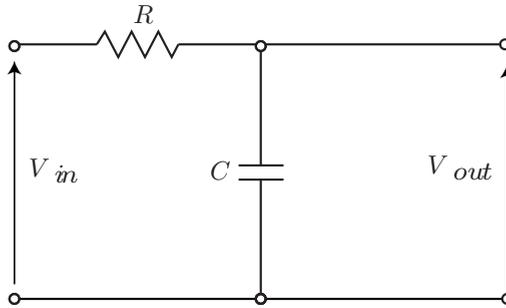


Figura 2.19. Filtro pasa bajo

- **Filtro pasa alto:** este filtro atenúa las señales cuya frecuencia es inferior a la frecuencia de corte como se visualiza en la Figura 2.20.

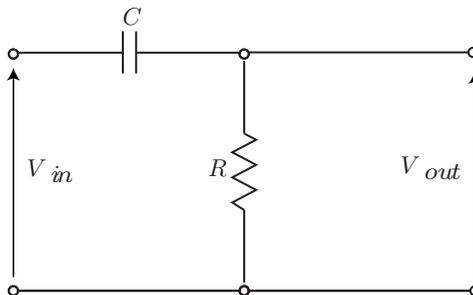


Figura 2.20. Filtro pasa alto

- **Filtro pasa banda:** este filtro permite el paso únicamente de las señales cuya frecuencia se encuentra comprendida entre dos frecuencias de corte. El diagrama de su representación se observa en la Figura 2.21

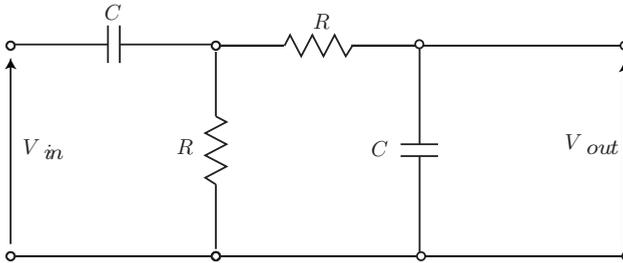


Figura 2.21. Filtro pasa banda

- Filtro supresor de banda:** este filtro atenúa las señales cuya frecuencia se encuentra comprendida entre dos frecuencias de corte como se ve en la Figura 2.22.

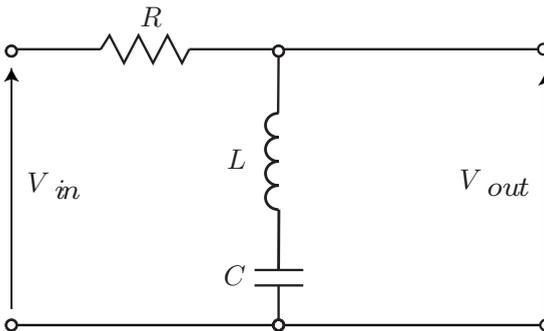


Figura 2.22. Filtro supresor de banda

Señales analógicas:

Presentan una señal de voltaje variable y continua dentro de un rango, como por ejemplo, la presión en el colector de admisión, la temperatura del refrigerante motor, etc. Estas señales necesitan pasar por un convertidor analógico/digital (A/D) para que puedan ser utilizadas por la unidad de control.

Señales digitales:

Son señales que se caracterizan por tener dos estados lógicos, conocidos como alto (1) y bajo (0). Sensores de efecto Hall generan este tipo de señales y no requieren una etapa de conversión.

Convertidor analógico/digital (A/D)

Las señales provenientes de la etapa de filtrado no pueden ser interpretadas por el microprocesador, por lo que las señales de los sensores que son análogas deben ser convertidas a digitales, esto se consigue a través de un conversor analógico digital, que es un dispositivo electrónico que se encarga de convertir una señal analógica de voltaje o intensidad a una señal digital a través de una codificación mediante código binario, utilizando microtransistores (etapa de corte/saturación). Por lo general, se utilizan convertidores de 8 bits como se ve en la Figura 2.23.

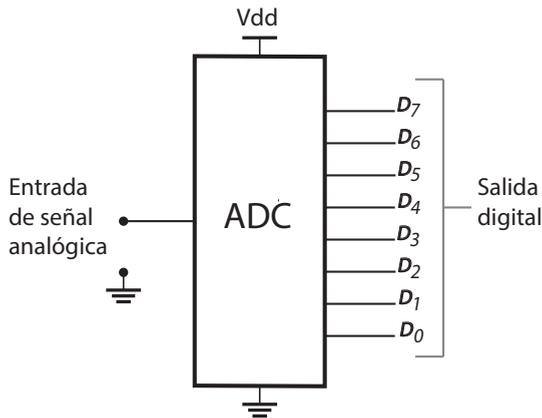


Figura 2.23. Convertidor analógico/digital

Multiplexor:

Son circuitos combinados con varias entradas y una única salida de datos. Es capaz de seleccionar una sola entrada de datos para la trans-

misión desde la entrada seleccionada hasta la salida. Su principal uso es el de reducir el uso de recursos.

Bloque de procesamiento

La ECU controla todas las funciones de gestión del motor, las señales recibidas por el bloque de entrada bien sea por los sensores o la red CAN sirven como parámetros iniciales para ejecutar los algoritmos almacenados en el microcontrolador. Para el proceso se ejecutan funciones de comprobación y respaldo de los datos para finalmente calcular y controlar los actuadores. El microcontrolador es la parte central de la unidad de control, no solo recibe las señales del bloque de entrada y ejecuta las salidas también cuenta en su interior con varios tipos de memorias como se describe a continuación:

- **ROM (Read Only Memory):** es una memoria que contiene información permanente adquirida durante el proceso de manufactura, por lo cual es inalterable. Aquí se almacenan los algoritmos de funcionamiento del sistema, los mapas de activación de actuadores como también las curvas características de los sensores.
- **EPROM (Erase Programmable ROM):** en ella se almacenan valores característicos del vehículo, como el peso y la cilindrada del motor, entre otros. Este tipo de memoria puede ser borrada al exponer el dispositivo a luz ultravioleta, la información nueva puede ser colocada a través de un conector o el BUS de datos. La información contenida no se altera durante el funcionamiento del vehículo.
- **RAM (Random Access Memory):** es una memoria de lectura y escritura de información, imprescindible para realizar los cálculos complejos del microcontrolador, se encuentra conectada permanentemente a la ECU mediante un BUS de datos, una vez que el motor se apaga la memoria RAM se borra, pero en el siguiente encendido puede adquirir la información de la unidad de control.
- **KAM (Keep Alive Memory):** la memoria KAM se relaciona con la memoria RAM y su función es la de guardar los datos de diag-

nóstico que no se pueden perder al cerrar el contacto, por ejemplo, los códigos de fallas aleatorias de sensores, a diferencia de la memoria RAM, la KAM no se borra al cerrar el contacto, pero si se borra al desconectar la batería.

Bloque de potencia

Tras el procesamiento de información por el microcontrolador (μp), se necesita activar los diferentes actuadores, grandes consumidores de potencia, por lo que se necesita usar *drivers* o transistores como elementos amplificadores para controlar estos dispositivos como se observa en la Figura 2.24.

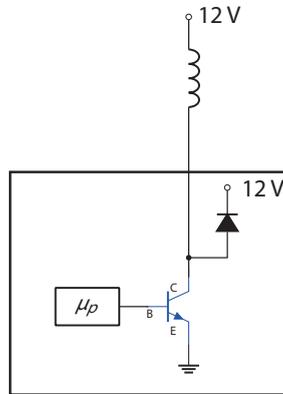


Figura 2.24. Esquema típico de la etapa de amplificación en el bloque de salida

2.4. Sensores usados en los sistemas de inyección

Todas las señales en el mundo real son de tipo analógicas por lo cual los sensores son elementos usados para convertir fenómenos físicos, químicos, ópticos en fenómenos eléctricos, que pueden ser usadas y entendidas por un ordenador previo a procesos de filtrado y digitalización de señales, con el fin de calcular las variables necesarias para

el funcionamiento de los sistemas en el automóvil. Los sensores automotrices deben ser robustos y tolerar temperaturas entre los -40°C y 140°C , impermeabilidad a los fluidos, resistentes a combustibles, lubricantes y vibraciones [1].

Transductores { **Sensores** → transforma una magnitud física (temperatura, posición, caudal, etc.) en una señal eléctrica.
Actuadores → convierte una señal eléctrica una magnitud física.

Una representación visual de las etapas de sensado, procesamiento y actuación se puede visualizar en la Figura 2.25.

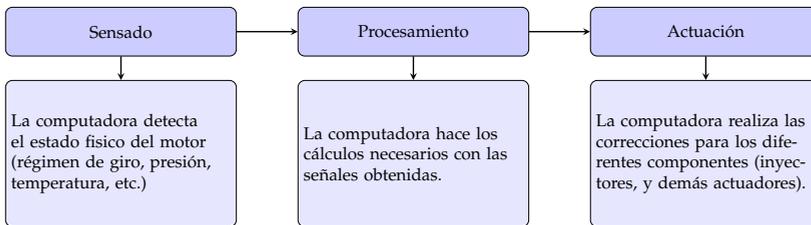


Figura 2.25. Orden lógico del tratamiento y adquisición de señales

2.4.1. Sensor de posición del cigüeñal o CKP (Crankshaft Position Sensor)

El sensor de posición del cigüeñal CKP está localizado en el bloque de cilindros próximo a una rueda dentada solidaria al eje del cigüeñal, este sensor es de tipo inductivo y permite determinar la posición del cigüeñal, utilizando el principio de inductancia magnética para generar una onda de corriente alterna. Se encuentra compuesto por una rueda dentada (rueda fónica) solidaria al cigüeñal de 60 dientes (dos dientes son retirados de la rueda) por lo general, $58 + 2$ para determinar el tiempo de encendido. El sensor dispone de dos cables, un terminal corresponde a la tierra y el otro a la señal del sensor, tiene un mallado exterior que actúa como una jaula de Faraday que elimina las interferencias permitiendo conseguir una onda estable, como se puede ver en la Figura 2.26.

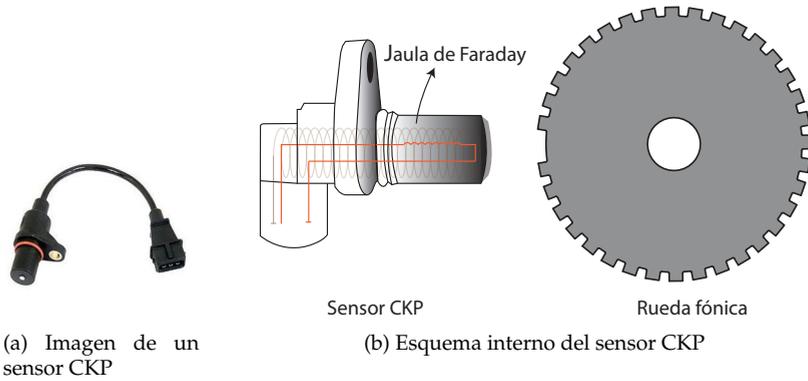


Figura 2.26. Sensor CKP

Debido al principio de inducción este sensor no necesita una señal de alimentación, por lo que se genera una onda como la que se muestra en la Figura 2.27. Con la señal analógica obtenida se puede encontrar la velocidad de giro del cigüeñal al aplicar la derivada de la posición en función del tiempo se puede encontrar la aceleración.



Figura 2.27. Oscilograma señal del CKP

2.4.2. Sensor de posición del árbol de levas o CMP (Camshaft Position Sensor)

Este sensor detecta la posición del árbol de levas y determina el instante en el cual el primer cilindro se encuentra en compresión muy cerca del PMS. En el árbol de levas se dispone de un nodo metálico magnético captado por el sensor mediante el efecto HALL. Una representación del sensor se puede ver en la Figura 2.28.



Figura 2.28. Sensor CMP

La Figura 2.29 muestra la sincronización de las señales de los sensores CMP y CKP para una rueda fónica 58+2 dientes, donde el punto muerto superior del pistón número 1 es identificado por una onda cuadrada suministrada por el sensor CMP.

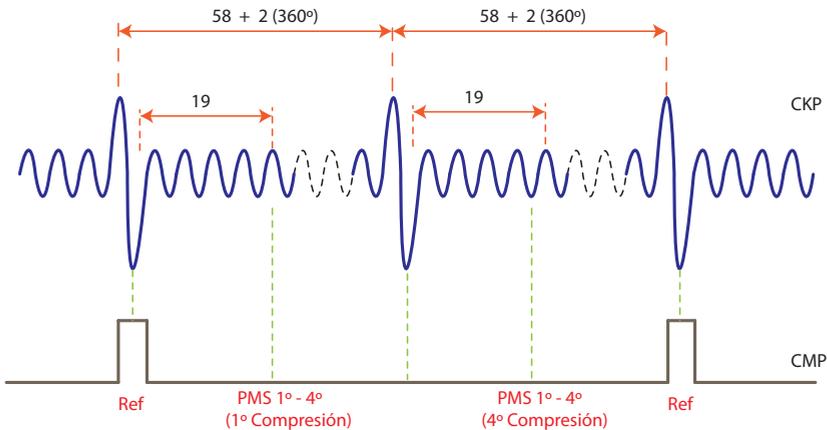


Figura 2.29. Oscilograma de la señal del sensor CMP con respecto a la posición del pistón

La computadora al detectar el diente con mayor grosor realiza un conteo de diecinueve dientes para determinar la ubicación del PMS, cada diente se encuentra separado por 6° (ver Figura 2.30). En el diente dieciséis se produce el adelanto al salto de la chispa de 18° , mientras que para un adelanto de 24° se cuentan catorce dientes.

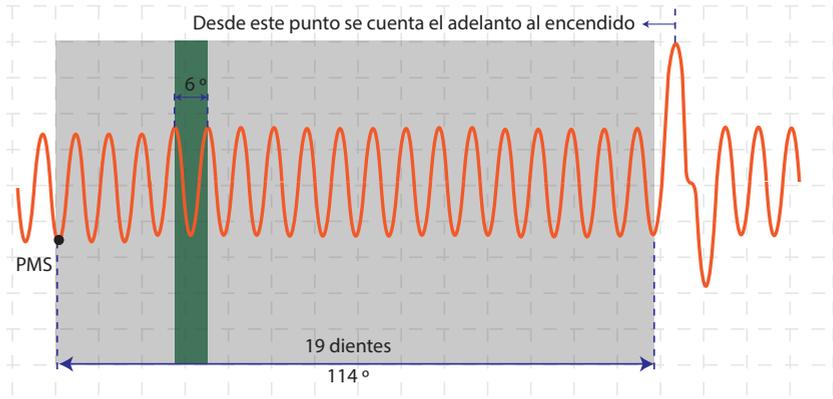


Figura 2.30. Oscilograma señal del CKP, conteo de dientes

El sensor CKP determina la posición angular del cigüeñal respecto al tiempo, su derivada proporciona el régimen de giro y su segunda derivada la aceleración, mientras la señal del sensor CMP indica únicamente que el pistón del primer cilindro está próximo al PMS en compresión como se muestra en la Figura 2.31a. En un osciloscopio se puede observar la sincronización de las dos señales siendo un defecto que estas dos se encuentren desplazadas en el tiempo.

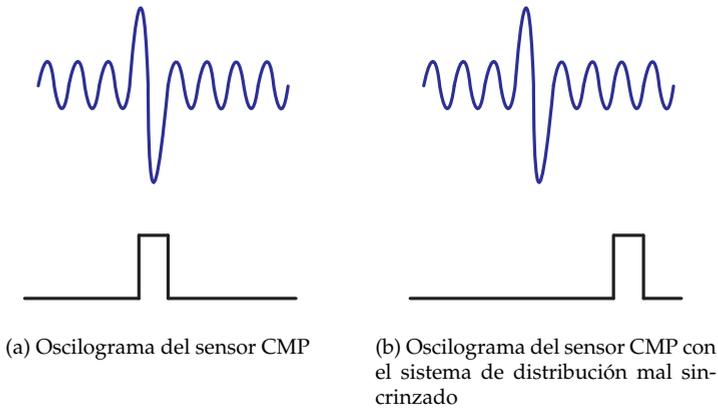


Figura 2.31. Sincronización entre sensores CMP y CKP

2.4.3. Sensor de efecto Hall

Es utilizado para determinar la posición del árbol de levas y cigüeñal, consta de una placa de silicio que corta las líneas de campo magnético e induce corriente que luego será amplificada mediante transistores como se visualiza en la Figura 2.32.

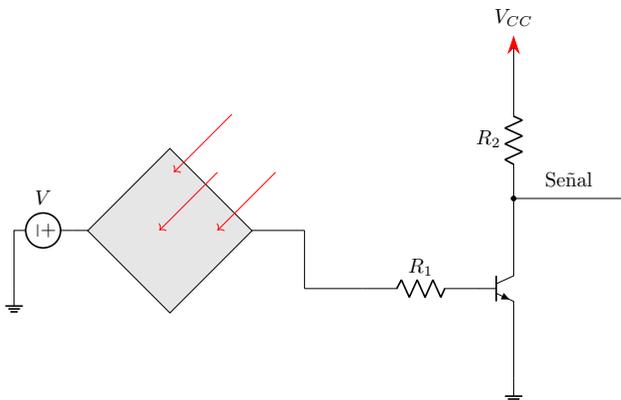


Figura 2.32. Circuito del sensor tipo Hall

En la Figura 2.33 se visualiza la onda cuadrada generada por un

sensor de efecto Hall y cómo la etapa de filtración realizada por la ECU es indispensable.

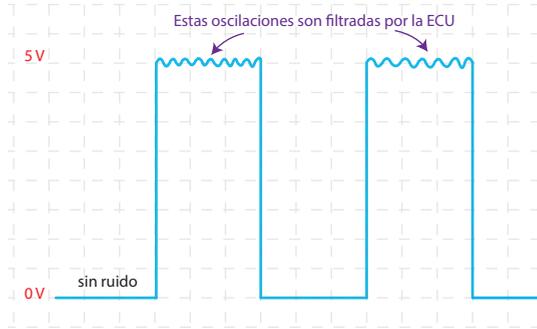


Figura 2.33. Oscilograma del ruido generado en un sensor tipo Hall

Ventajas:

- La amplitud de la señal no varía con el régimen.
- La señal generada es digital por lo que no requiere procesamiento de la misma.
- El ruido inducido es mínimo.
- La señal se genera a cualquier velocidad de giro.

Este sensor tiene tres terminales: voltaje de alimentación, masa y señal, los valores de referencia de cada terminal dependen del fabricante, pero valores comunes se pueden observar en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Configuración de un sensor de efecto Hall en función de su alimentación y señal de salida generada

Configuración	Vcc	⊥	Señal
1	5V	0V	5V
2	12V	0V	5V
3	12V	0V	12V

Sensor CAS (Crank Angle & TDC Optical Sensor)

Es un fototransistor que requiere intensidad lumínica para funcionar. El sensor de posición del árbol de levas capta el instante cuando el primer cilindro se encuentra en el PMS en la etapa de compresión y envía una señal a la ECU que cambia de estado alto a bajo o viceversa. El sensor CMP incorporado en el mismo sistema utiliza el efecto Hall y se polariza mediante varias aberturas dispuestas en la rueda fónica, como se observa en la Figura 2.34.

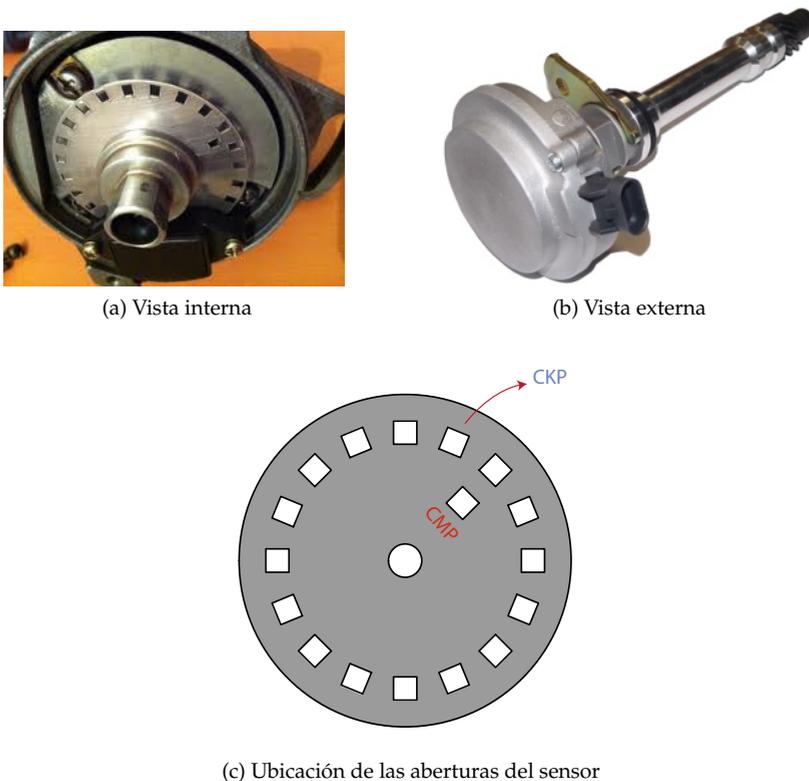


Figura 2.34. Sensor CAS

El sensor del ángulo del cigüeñal detecta la posición angular de cada cilindro y la transforma en señales de impulsos que sirven como datos de entrada a la ECU. En base a estas señales, la unidad de control cal-

cula la velocidad de giro del motor y ajusta el tiempo de inyección del combustible como el adelanto al encendido. Un esquema representativo del sistema se observa en la Figura 2.35.

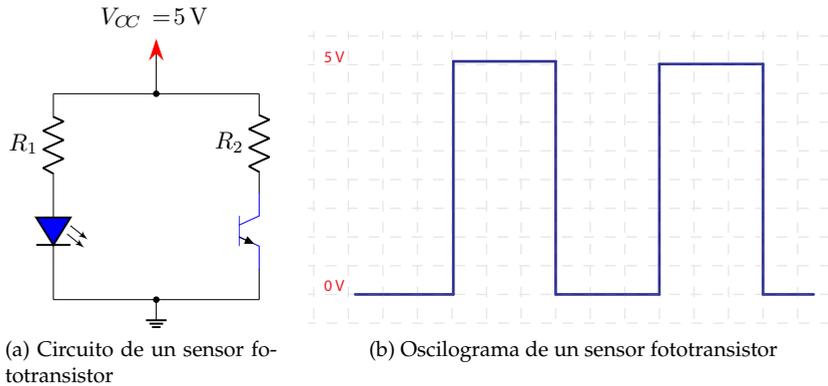


Figura 2.35. Sensor óptico

El sensor óptico posee tres cables: alimentación, salida y tierra, se encuentra por lo general ubicado dentro del distribuidor y debe estar aislado de la luz externa.

2.4.4. Sensor de velocidad del vehículo o VSS (Vehicle Speed Sensor)

El sensor de velocidad del vehículo (VSS) se encuentra situado en la caja de cambios (es de tipo Hall), genera ondas proporcionales a la velocidad del vehículo. El VSS permite a la unidad de control determinar la velocidad del vehículo y reconocer si se encuentra en movimiento o reposo. El PCM utiliza esta señal para controlar el combustible, cantidad de inyección, tiempo de ignición y la relación de transmisión (ver Figura 2.36).



(a) Imagen de un sensor de velocidad



(b) Oscilograma de un sensor VSS

Figura 2.36. Sensor VSS

2.4.5. Sensor de posición del acelerador o TPS (Throttle Position Sensor)

El sensor de posición del acelerador (TPS) se encuentra unido al cuerpo de aceleración y permite medir el ángulo de apertura de la válvula de aceleración. El TPS es un sensor de resistencia eléctrica variable cuyo valor depende de la posición de la válvula de la mariposa. La señal de salida del TPS oscila de 0.3 ~ 0.9 V cuando la aleta de estrangulación esta cerrada, y de 4 ~ 4.8 V cuando la válvula permanece totalmente abierta. La PCM utiliza el sensor MAP y TPS para: identificar cuando el motor se encuentra en ralentí, medir la carga parcial del motor en aceleración o desaceleración, calcular la cantidad de inyección de combustible y tiempo de encendido. En la Figura 2.37 se puede visualizar una representación real y esquemática del sensor.

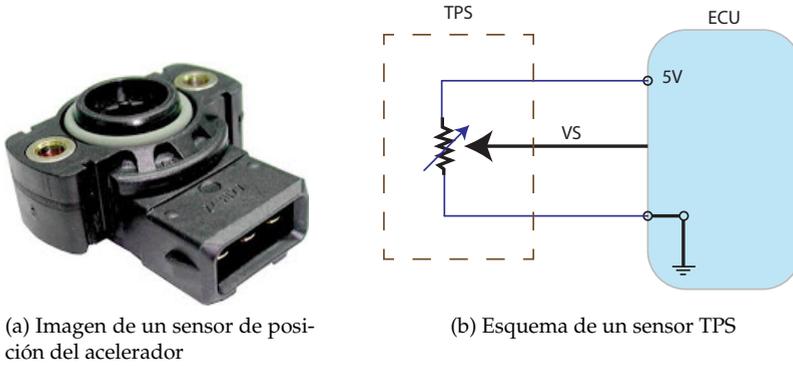


Figura 2.37. Sensor TPS

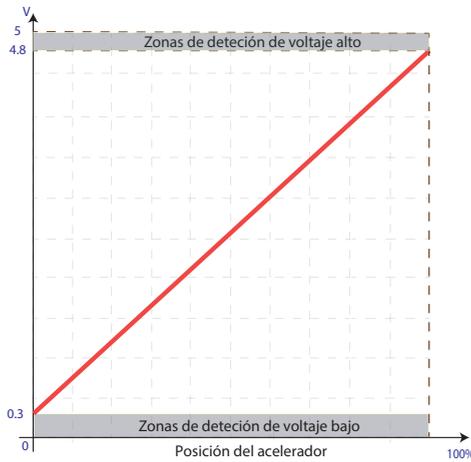


Figura 2.38. Diagrama de la señal de salida del sensor TPS

$\left. \begin{array}{l} 0.3 \text{ V} \rightarrow 0\% \\ 4.8 \text{ V} \rightarrow 100\% \end{array} \right\}$	Datos correctos	$\left. \begin{array}{l} 0 \text{ V} \rightarrow 0\% \\ 5 \text{ V} \rightarrow 100\% \end{array} \right\}$	Se detecta como un error
---	------------------------	---	---------------------------------

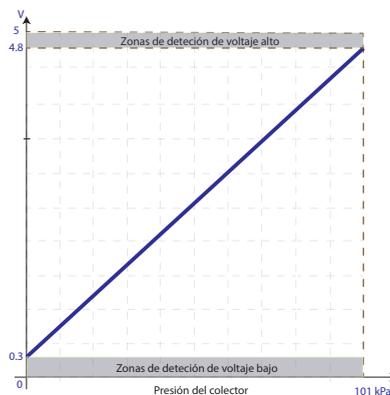
La Figura 2.38 se representa la señal del sensor en función del porcentaje de apertura y voltaje esperado.

2.4.6. Sensor de presión absoluta o MAP (Manifold Absolute Pressure)

El sensor de presión absoluta se encuentra ubicado en el colector de admisión, el voltaje de su señal es directamente proporcional a la presión, esto significa que para presiones absolutas bajas se obtendrán valores bajos de voltaje, y para valores altos de presión se obtienen voltajes mayores. La lectura del MAP es importante para determinar la carga del motor y por intermedio de este valor de presión predecir la masa de aire que está ingresando al cilindro. Con este valor la unidad de control calcula el tiempo de inyección de combustible como se ve en la Figura 2.39. El valor máximo de presión absoluta que mide el sensor MAP es de una atmósfera, aproximadamente un bar, pero en vehículos turbo alimentados se obtienen medidas de hasta 2 bar o más.



(a) Imagen del sensor MAP



(b) Diagrama de la señal de salida del sensor MAP

Figura 2.39. Sensor MAP

2.4.7. Sensor de detonación o KS (Knock Sensor)

El sensor KS es un dispositivo utilizado en los sistemas de inyección de los motores, encargado de detectar la auto detonación del combustible en la cámara de combustión, tal fenómeno es conocido como pistoneo o cascabeleo. Su funcionamiento se basa en el principio piezoeléctrico, donde la resistencia eléctrica varía en función de la presión. Este sensor se ubica en el centro acústico del bloque motor, donde la captación de las vibraciones en el bloque motor son consecuencia de los cambios repentinos en el número de revoluciones, provocados por la auto ignición del combustible en los cilindros. El sensor KS capta estas vibraciones y genera una tensión de salida que es procesada por la unidad de control del motor con la finalidad de retardar o adelantar el tiempo de ignición, como se observa en la Figura 2.40.

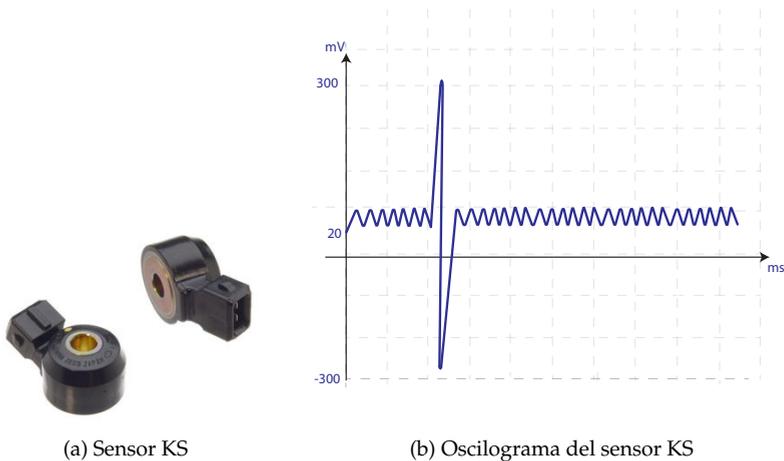


Figura 2.40. Sensor de detonación

La Figura 2.41 muestra un oscilograma representado por el comportamiento del sensor de detonación en un motor. En los primeros tres intervalos de la señal, se observa una combustión controlada, conocida como deflagración, donde la amplitud de la onda es relativamente estable. Sin embargo, en la última etapa de la señal, se aprecia un incremento significativo en la amplitud de la onda, lo que indica la presencia

de una detonación en uno de los cilindros del motor. La detonación es un fenómeno de una combustión no controlada producido por varios frentes de onda en la cámara de combustión.

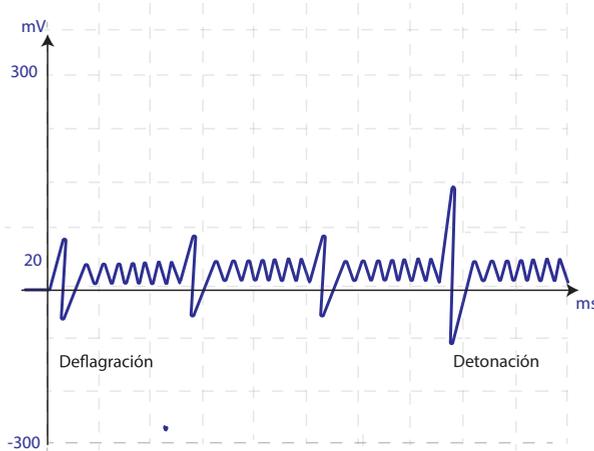


Figura 2.41. Oscilograma de deflagración y detonación del sensor KS

2.4.8. Sensor de temperatura del refrigerante del motor o ECT (Engine Coolant Temperature)

El sensor de temperatura del refrigerante es de tipo NTC, detecta la temperatura del refrigerante del motor, y emite una señal eléctrica que es usada como dato de entrada de la unidad de control para aumentar o disminuir la cantidad de combustible y controlar la activación y desactivación del ventilador. La representación física del sensor se puede ver en la Figura 2.42.



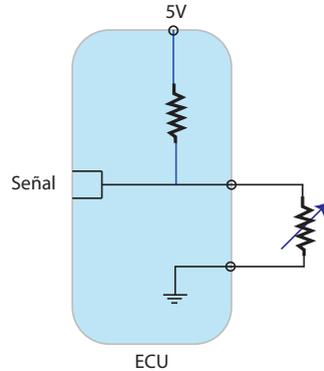
Figura 2.42. Sensor ECT [4]

2.4.9. Sensor de temperatura del aire de admisión o IAT (Intake Air Temperature)

Es un sensor de tipo NTC ubicado a la entrada del colector de admisión, de funcionamiento similar al sensor ECT, se compone de un termistor que tiene una resistencia variable a los cambios de temperatura del aire en la admisión. La resistencia es inversamente proporcional a la temperatura, esta señal es utilizada por la unidad de control para ajustar la cantidad de combustible inyectada y ajustes en el sistema de ignición (ver Figura 2.43).



(a) Imagen sensor IAT [4]



(b) Circuito del sensor IATS

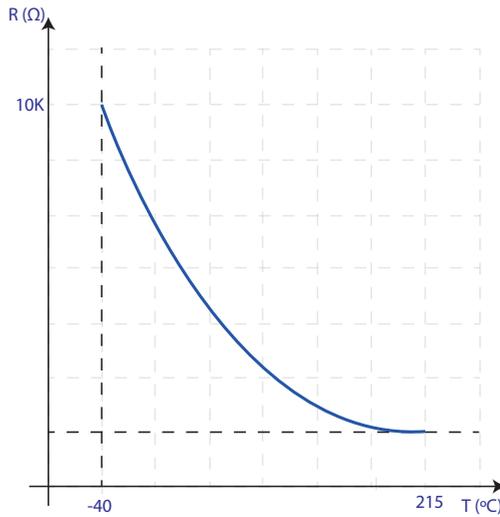
Figura 2.43. Sensor IAT

2.4.10. Sensor de temperatura del aceite o OTS (Oil Temperature Sensor)

El sensor OTS es un termo resistor de tipo NTC montado en las cercanías del sistema de lubricación, este sensor utiliza un termistor cuyos valores de resistencia están determinados por los cambios en la temperatura del aceite como se puede observar en la Figura 2.44.



(a) Imagen sensor OTS



(b) Diagrama del sensor OTS

Figura 2.44. Sensor OTS

2.4.11. Sensores de temperatura

Los parámetros de funcionamiento del motor dependen de condiciones atmosféricas como la temperatura, por lo cual los motores de encendido provocado están dotados de un sensor de temperatura del aire situado en el colector de admisión usado para calcular el tiempo de inyección y otro sensor ubicado en el bloque del motor usado para correcciones de combustible en condiciones de arranque en frío.

Partidor de tensión

Es el circuito base utilizado en el interior de los sensores de temperatura como el mostrado en la Figura 2.45, son sensores termo-resistentes, es decir, su resistencia varía en función de la temperatura.

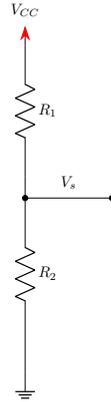


Figura 2.45. Circuito de un partido de tensión

Si suponemos que R_1 es constante, y su valor es mayor que R_2 , se obtiene una variación de voltaje. La relación entre el voltaje y la temperatura es aproximadamente lineal. Para valores bajos de temperatura, el voltaje resultante es bajo como se expresa en la ecuación 2.2.

$$V_s = \frac{5V \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.2)$$

Sensor NTC (coeficiente negativo de temperatura)

La resistencia eléctrica de los sensores de coeficiente negativo de temperatura (NTC) es inversamente proporcional a la temperatura, por lo tanto, al aumentar la temperatura disminuye la resistencia, como se puede ver en la Figura 2.47 [3]. Asimismo, a menor temperatura aumenta el tiempo de inyección como se ve en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Relación temperatura-tiempo de inyección

Temperatura	Tiempo de inyección
-10 °C	12 ms
0 °C	10 ms
50 °C	5 ms
80 °C	3 ms



Figura 2.46. Sensor NTC

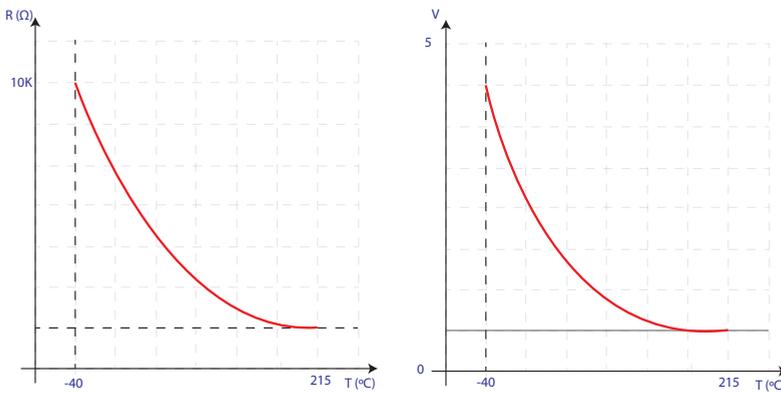


Figura 2.47. Diagrama voltaje-resistencia-temperatura NTC

¿Por qué utilizar un sensor NTC? Mientras más baja sea la temperatura, más alto es el voltaje y por ende el tiempo de inyección se incrementa para aumentar la temperatura de funcionamiento del motor.

2.4.12. Sensor de flujo másico de aire o MAF (Mass Air Flow Sensor)

Este sensor mide el flujo másico (\dot{m}) que atraviesa el sistema de admisión y dependiendo del fabricante se pueden encontrar tres tipos: hilo caliente, película caliente y Karman Vortex.



Figura 2.48. Diferentes tipos de sensores MAF

MAF: hilo caliente

El sensor MAF de hilo caliente, se encuentra ubicado después del depurador como se observa en la Figura 2.49. La intensidad de corriente de un filamento fabricado de platino varía de acuerdo al flujo de aire que pasa a través del conducto, una disminución en la temperatura del hilo causara un aumento en la corriente para mantener la temperatura constante del filamento (aproximadamente 300 °C), con este cambio en corriente la unidad de control determina cuanta masa por unidad de tiempo ingresa al cilindro, es común que el sensor IAT se encuentre incorporado dentro del mismo componente.

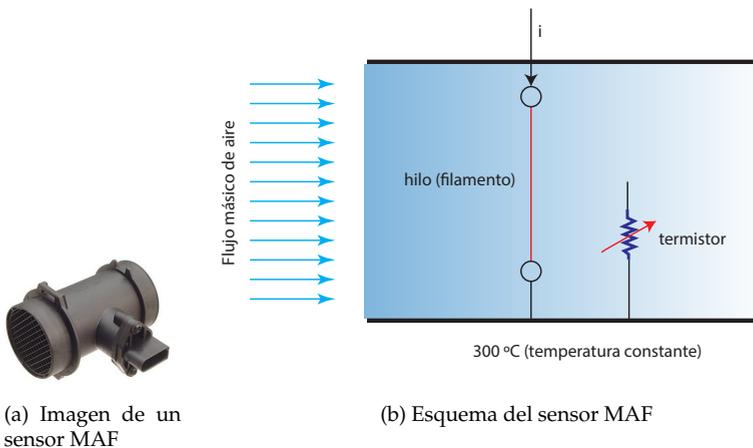


Figura 2.49. Sensor MAF

La Figura 2.50 muestra esquemáticamente un ajuste de curva que predice la variación de flujo másico en función de la intensidad de corriente.

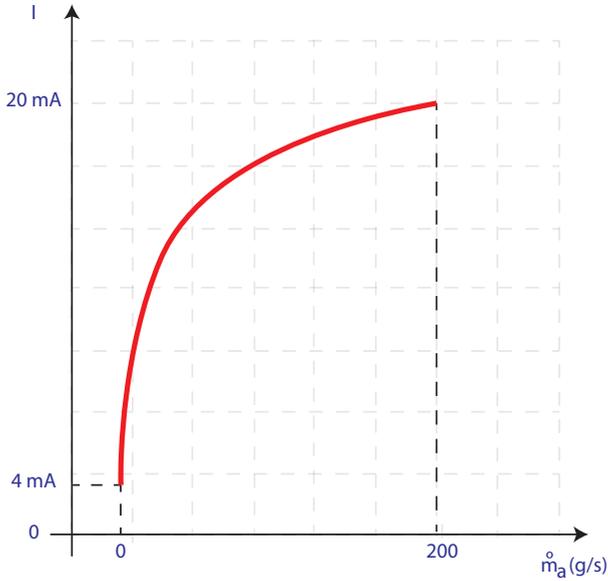


Figura 2.50. Diagrama señal sensor

Al apagar el vehículo la temperatura del hilo aumenta a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente para auto limpiarse, pero esto no es suficiente, el mantenimiento del sistema debe complementarse con un adecuado control y cambio periódico del filtro de aire.

MAF: película caliente

Este sensor tiene un funcionamiento similar al descrito anteriormente, la diferencia radica en que la celda no mide intensidad sino voltaje, está situado entre el filtro de aire y el cuerpo del acelerador para medir la cantidad de aire inducido en el motor. Típicamente mide la cantidad de aire que ingresa por el vórtice generado por el flujo de aire, una gran

cantidad de afluencia de aire significa que el motor está en aceleración o carga pesada, y un caudal bajo de aire significa que el motor está en reposo o en desaceleración. En base a estas señales, el módulo de control del motor ajusta la cantidad de combustible que se inyecta para una proporción ideal de aire y combustible controlando el tiempo de ignición para mejorar la respuesta del motor, como se visualiza en la Figura 2.51.

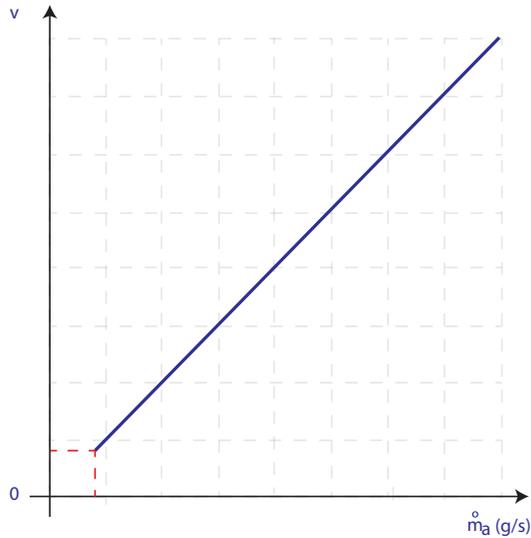


Figura 2.51. Sensor MAF película caliente

MAF: Karman Vortex

Este sensor se compone de un emisor y un receptor ultrasónico, para valores bajos de gasto másico de aire se obtiene una señal digital de baja frecuencia y a medida que aumenta el flujo de aire la frecuencia es incrementada. La unidad de control interpreta los valores de frecuencia mas no los de amplitud (valores de amplitud entre 1.5 V a 5 V) como se observa en la Figura 2.52.

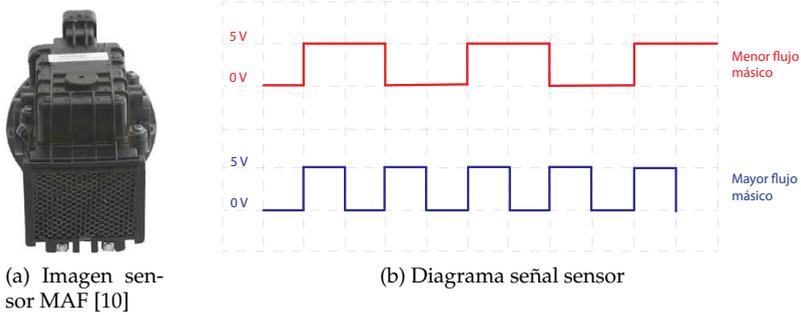


Figura 2.52. Sensor Karman Vortex

En la Figura 2.53 se observa el principio de funcionamiento del sensor, donde el flujo de aire al circular por la admisión crea vórtices denominados Karman. Estos vórtices son detectados por sensores ópticos o ultrasónicos que estiman la frecuencia de los vórtices, la cual es proporcional a la velocidad del flujo de aire.

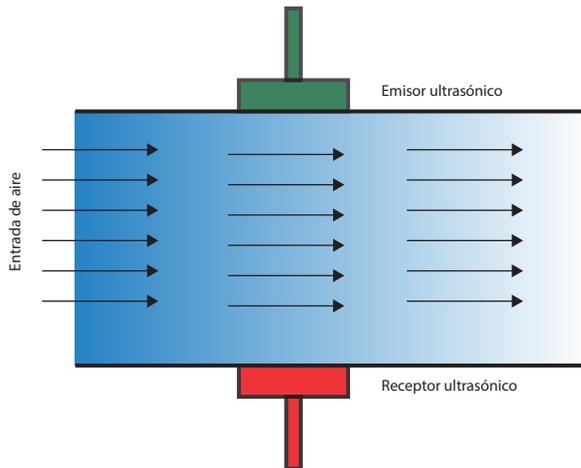
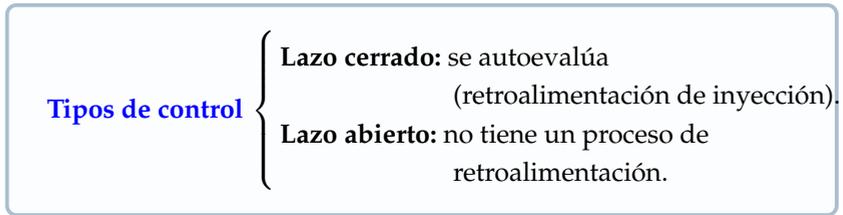


Figura 2.53. Principio de funcionamiento sensor Karman Vórtex

2.4.13. Sensor de oxígeno

El sensor de oxígeno es el encargado de medir el contenido de oxígeno en los gases de escape (mide la diferencia de potencial existente de oxígeno en el interior del ducto de escape con respecto al exterior) y producir una señal proporcional al contenido, por lo cual se obtiene un voltaje alto (alrededor de 0.9 V debido a la gran diferencia de concentraciones de oxígeno entre el interior del tubo de escape y el ambiente exterior) con una mezcla rica $\lambda < 1$ y un voltaje bajo con una mezcla pobre $\lambda > 1$ [18].

Es común encontrar vehículos con un solo sensor de oxígeno en el colector de escape y trabajan con un sistema de control de lazo abierto, mientras que los vehículos que poseen dos sensores de oxígeno, uno ubicado en el colector de escape y otro después del catalizador, realizan procesos de control de lazo cerrado (ver Figura 2.54) como se explicará a continuación.



Operación de retroalimentación (lazo cerrado)

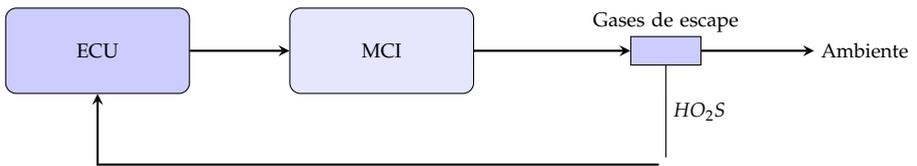


Figura 2.54. Ciclo cerrado de un sensor de oxígeno

El sensor de oxígeno no influye directamente sobre el cálculo inicial del tiempo de inyección en el motor, pero es usado como un parámetro de corrección, la señal obtenida por el sensor es de tipo analógica. La unidad de control en base a esta señal determina si la mezcla es rica

o pobre pero no cuantifica el valor de estequiometría como se puede verificar en la Figura 2.55.

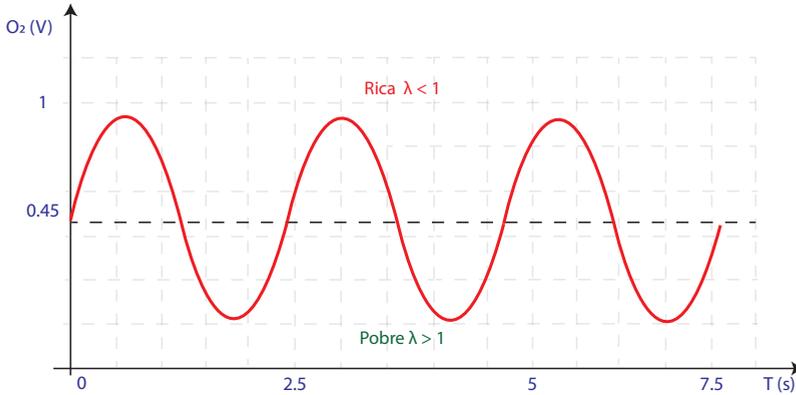


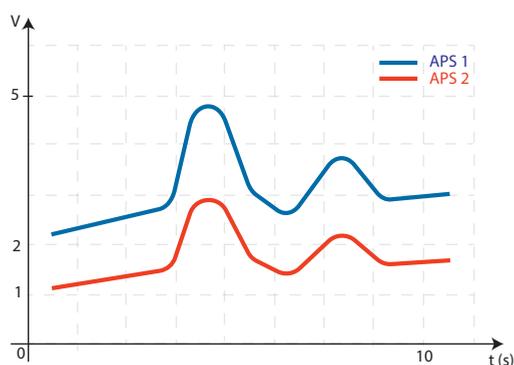
Figura 2.55. Oscilograma de un sensor de oxígeno

2.4.14. Sensor de posición del acelerador o APS (Accelerator Position Sensor)

El sensor de posición del acelerador detecta la posición absoluta del pedal del acelerador, es un sensor redundante del cual se obtienen 2 señales, que sirven entre otras funciones, para controlar el cuerpo motorizado de aceleración, usado para limitar el control absoluto del conductor sobre el motor, protegiéndolo de elevados regímenes de giro, y disminuir el consumo y las emisiones contaminantes generadas, como se visualiza en la Figura 2.56. En el interior del sensor se localizan dos potenciómetros AP_1 y AP_2 , unidos solidariamente al eje del pedal del acelerador; ambos generan una señal sincronizada de la posición del mismo, cada potenciómetro cuenta con alimentación y tierra independientes con el objetivo de que cada señal generada sea independiente entre sí.



(a) Imagen sensor APS



(b) Diagrama del sensor APS

Figura 2.56. Sensor APS

2.5. Subsistemas y actuadores usados en el sistema de inyección

2.5.1. Sistema de control de emisiones evaporativas (EVAP)

El sistema de emisiones evaporativas es el encargado de tomar los vapores generados en el tanque de combustible (hidrocarburos ligeros), filtrarlos y depositarlos en el colector de admisión para su posterior combustión. Se compone de un depósito con un filtro de carbono activo denominado cánister, que evita la salida de los vapores del tanque de combustible al exterior, enviándolos al sistema de admisión por intermedio de una válvula solenoide controlada por la ECU que la activa en

determinadas condiciones de funcionamiento del motor como se puede observar en la Figura 2.57 [12].

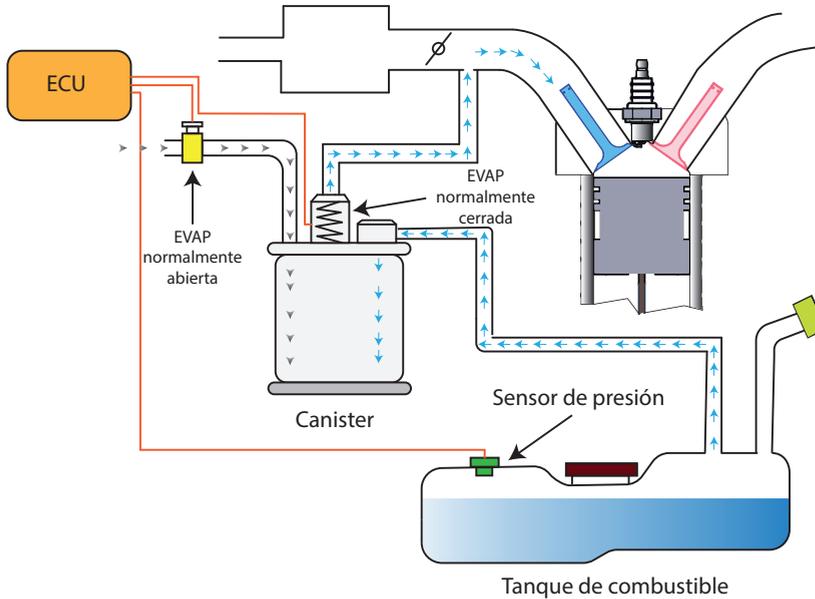


Figura 2.57. Diagrama de funcionamiento del canister

2.5.2. Sistema de ventilación positiva del cárter (PCV)

En el cárter se generan vapores producto de las elevadas temperaturas y el barboteo del aceite, estos vapores por su alto contenido de hidrocarburos no pueden ser liberados a la atmósfera debido a razones ambientales, por lo cual estos gases son reingresados al colector de admisión a través de la válvula de ventilación positiva del cárter (PCV) para ser quemados en la cámara de combustión. El mecanismo PCV cuenta con una válvula *check* que permite que el flujo de los vapores sea unidireccional desde el cárter hacia el colector de admisión, así mismo está regulado para abrirse únicamente en carga total del motor (acelerador accionado al 100%). Su representación física se puede observar en la Figura 2.58 [14].



Figura 2.58. Válvula PCV

2.5.3. Válvula de control de ralentí (IAC)

La válvula IAC regula la cantidad de aire que ingresa al motor sin accionar el acelerador con lo que consigue establecer el ralentí, es controlada por la ECU y operada por un solenoide que regula el flujo de aire. Esta válvula es un paso paralelo (*bypass*) de la mariposa de aceleración por lo que su flujo es independiente de la apertura de la mariposa de aceleración, es comandada por pulsos de voltaje para la activación del solenoide. El mecanismo de activación de la válvula se produce mediante una señal modulada por ancho de pulso (PWM), la cual es encargada de suministrar la energía a través de la variación del ancho de pulso de encendido de una señal de onda cuadrada. A continuación, se presentan los diferentes tipos de activación de válvula.

Válvula IAC de solenoide rotativo

Este sistema consta de un motor paso a paso, el cual regula el flujo de aire al variar la posición del vástago de la válvula, la ECU comanda la posición de este elemento al energizar las cuatro bobinas del motor de manera secuencial, un rotor de tipo magnético modifica la posición de la válvula en un paso por cada bobina seleccionada. En función de la ubicación del vástago de la válvula se permitirá el paso del flujo del aire, es decir, mientras mayor sea el número de pasos mayor será el flujo de aire, en la Figura 2.59 se presenta su mecanismo de funcionamiento.

Para controlar el flujo de aire generado se utiliza una señal modulada por ancho de pulso (PWM).

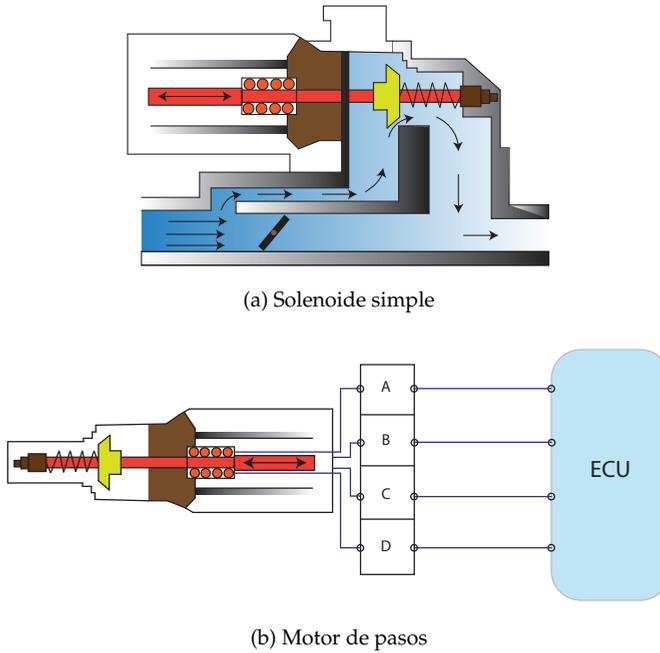


Figura 2.59. Válvula IAC

En la Figura 2.60 se presenta la señal de control de la válvula, cuando esta se encuentra activada en situaciones de alto y bajo caudal de aire.

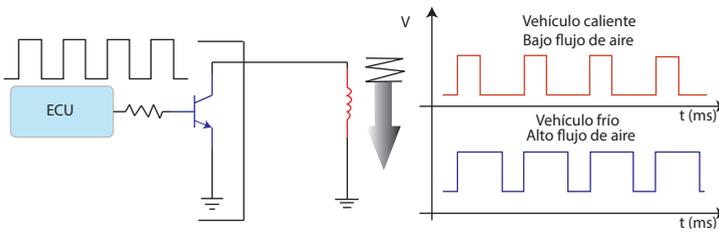


Figura 2.60. Gráfica de la alimentación de válvula IAC a diferentes temperaturas del vehículo.

Válvula IAC de paso a paso

El motor paso a paso es un tipo de motor de corriente continua que consta de cuatro bobinas, que inducen el giro del rotor al aplicar pulsos de tensión secuencialmente en cada bobina, en un ángulo y sentido preestablecido como se ve en la Figura 2.61 [20].

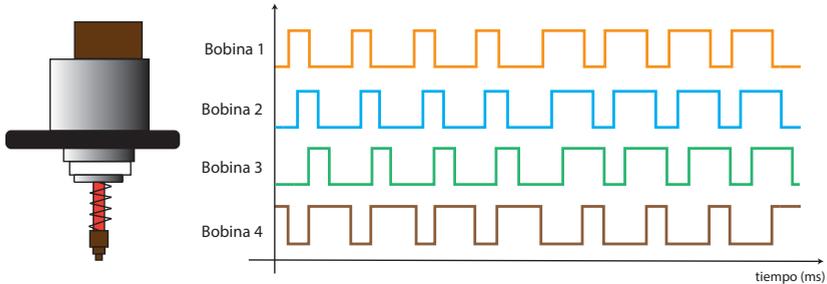


Figura 2.61. Gráfica de la alimentación de una válvula IAC con dos bobinas.

2.5.4. Sistema de recirculación de gases de escape (EGR)

El sistema de recirculación de gases de escape (EGR) es usado para la reducción de NO_x y en ciertas condiciones limitar la detonación en el motor [15]. Los gases de escape, al estar previamente combustionados, pueden considerarse inertes y, por tanto, al ser ingresados con gases frescos durante el proceso de combustión limitan la presión y la temperatura del proceso reduciendo la producción de NO_x como se puede observar en la Figura 2.62 [5]. La válvula se activa en condiciones de alta carga y elevado régimen de giro y puede ser accionada por un solenoide o un motor de paso dependiendo del fabricante.

El sistema EGR se activa únicamente a carga parcial y con la temperatura normal de funcionamiento del motor, permaneciendo desactivado en plena carga, en ralentí, durante la deceleración y cuando el motor se encuentra frío (por debajo de $35\text{ }^\circ\text{C}$) para no afectar el rendimiento. La ECU controla una electroválvula de vacío mediante una señal de voltaje variable, ajustando así el caudal de gases de escape. Se tienen dos sistemas principales: el sistema de válvula EGR neumático, el cual

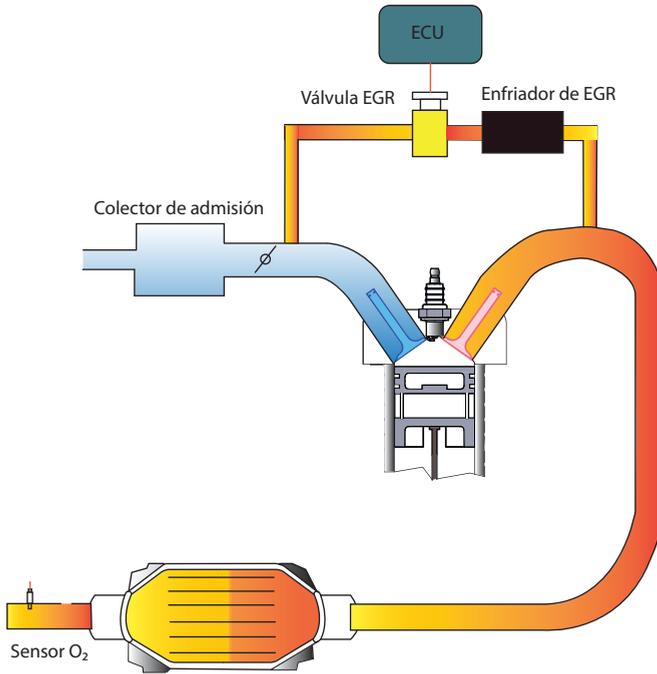


Figura 2.62. Partes y funcionamiento del sistema de recirculación de gases de escape [5]

utiliza un método de accionamiento mecánico donde la válvula se abre y cierra por el vacío generado en el motor, y el sistema de válvula EGR electrónico, donde un módulo de control integrado es activado por la ECU [13].

Bibliografía

- [1] J. Gao, C. Ma, S. Xing, L. Sun, y L. Huang, "Nanostructure analysis of particulate matter emitted from a diesel engine equipped with a NTP reactor," *Fuel*, vol. 192, pp. 35-44, 2017.
- [2] "Bombas eléctricas de carburante: Tipos de construcción, averías y causas," disponible en: https://www.ms-motorservice.com/fileadmin/media/MAM/PDF_Assets/Bombas-electricas-de-carburante-Tipos-de-construccion-averias-causas_52493.pdf. [Accedido: 06-ago-2024].
- [3] "Manual del automóvil," disponible en: https://e-auto.com.mx/manual_detalle.php?manual_id=259. [Accedido: 06-ago-2024].
- [4] *Manual técnica del automóvil*, Reverté, 1999.
- [5] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Inc., 1988.
- [6] R. Carreras, J. A. Álvarez Flórez, y I. Callejón Agramunt, *Motores alternativos de combustión interna*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [7] F. Payri *et al.*, *Motores de combustión interna alternativos*, Reverté, 2011.
- [8] K. Reif, *Gasoline Engine, Management, Systems and Components*, Springer Vieweg, 2015.
- [9] H. Gil, *Manual práctico del automóvil, reparación mantenimiento prácticas*, Madrid, 2020.

- [10] "Limpieza y comprobación de inyectores de gasolina," disponible en: <https://www.ecubitt.com/limpieza-y-comprobacion-de-inyectores-de-gasolina/>. [Accedido: 06-ago-2024].
- [11] D. Gonzales *et al.*, *Motores térmicos y sus sistemas auxiliares*, Paraninfo, Madrid, 2015.
- [12] J. M. Alonso Pérez, *Sistemas auxiliares del motor*, Paraninfo, 2014.
- [13] Sánchez, Enrique. *Sistemas auxiliares del motor*, Macmillan Iberia, S.A., 2009. ProQuest Ebook Central.
- [14] S. Escudero *et al.*, *Motores*, Macmillan Iberia, S.A., 2009. ProQuest Ebook Central.
- [15] H. W. *et al.*, "Gasoline engine exhaust gas recirculation – A review," *Applied Energy*, Elsevier, 2012.
- [16] M. Rodríguez, J. C. *Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor de ciclo Otto (MF01332)*, IC Editorial, 2012. ProQuest Ebook Central.
- [17] J. Pardiñas, R. Feijó, *Sistemas auxiliares del motor*, Editex, 2018.
- [18] M. Concepcion, *Sensores Automotrices y Análisis de Ondas*, USA, 2004.
- [19] T. Martin, *How to Use Automotive Diagnostic Scanners*, MotorBooks International, USA, 2007.
- [20] Toyota Motor Sales, *Emission sub systems – idle air control systems*, USA.

3 | Sistemas de encendido

La función del sistema de encendido es inflamar la mezcla homogénea de aire combustible en el instante adecuado, en un motor de encendido provocado (MEP) la inflamación del combustible se produce en el interior del cilindro por medio de un arco eléctrico generado entre los electrodos de una bujía [1]. Para que un motor de encendido provocado funcione adecuadamente el salto de la chispa debe iniciarse antes de que el pistón llegue al PMS en fase de compresión, debido a que el proceso de inflamación de la mezcla aire-combustible en la cámara de combustión no es instantáneo. Este proceso presenta un retraso que impide que la máxima presión se consiga cuando el pistón se encuentre en el PMS. Además, la cantidad de energía requerida entre los electrodos de la bujía han obligado a mejorar los sistemas con el paso de los años, partiendo de sistemas de encendido convencionales activados por platinos, luego a encendidos electrónicos con distribuidor y poco a poco retirando los elementos mecánicos susceptibles a desgastes y desajustes, hasta encontrarse hoy en día con sistemas electrónicos comandados por una unidad de control [2].

Como se mencionó anteriormente, si la energía generada entre los electrodos de la bujía es insuficiente la mezcla no puede quemarse en su totalidad. Un factor importante en el estudio de los sistemas de encendido es el adelanto del punto de encendido, puesto que de este parámetro depende el par máximo del motor, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible [3]. Para determinar el momento exacto en el que debe producirse el salto de la chispa se consideran variables como el número de revoluciones por minuto del motor, la carga y la temperatura. Como puede observarse en la Figura

3.1, una vez que el encendido de la mezcla aire-combustible ha sido producido por la bujía, tarda milisegundos para que se queme por completo, por lo cual este periodo de tiempo debe ser compensado con un adelanto en el salto de la chispa antes del PMS. Cuando la ignición se produce en el momento adecuado se generará un único frente de llama, seguido de un aumento progresivo en la presión capaz de generar una combustión completa. Por el contrario, si el salto de la chispa es demasiado amplio se producirá un fenómeno conocido como detonación, el cual provocará un aumento rápido de presión en la cámara de combustión seguido de la formación de múltiples frentes de llama. Posteriormente, la energía generada durante el proceso se disipará entre los diferentes frentes de llamas alojados el interior de la cámara de combustión impidiendo la formación de una combustión completa. Finalmente, si el salto de chispa se produce en un periodo de tiempo muy corto antes del PMS, los hidrocarburos no podrán ser quemados en su totalidad debido a la velocidad con la que ocurre el proceso.

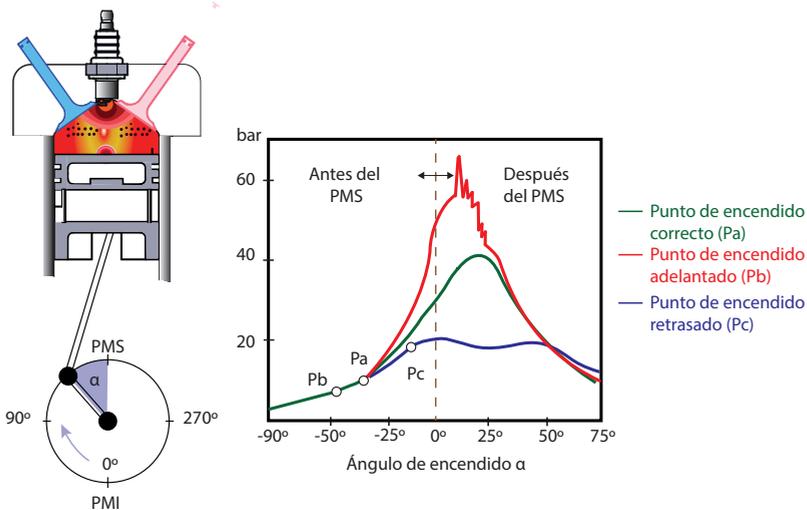


Figura 3.1. Influencia del ángulo de encendido en la combustión

En este capítulo se describen los sistemas de encendido más comunes en el medio, partiendo desde los sistemas activados mecánicamente

hasta llegar a los sistemas de activación y comando electrónico. Se realiza especial énfasis en el análisis de los fenómenos físicos de los sistemas, más que en la descripción de sus partes o elementos.

3.1. Sistema de encendido SZ

El sistema de encendido SZ, mejor conocido como encendido convencional por bobina, se puede visualizar en la Figura 3.2. Funciona por intermedio de contactos, lo que significa que la corriente generada por la bobina es conectada y desconectada mecánicamente por un ruptor ubicado en el interior del distribuidor [4]. A continuación, se describe el proceso de formación de corriente eléctrica en cada una de sus etapas.

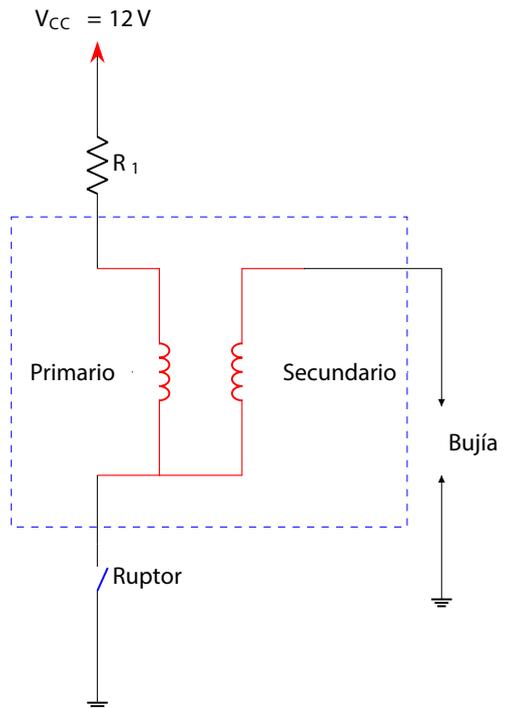


Figura 3.2. Circuito de encendido

3.1.1. Bobina

Es el elemento encargado de transformar la corriente de baja tensión de la batería y convertirla en corriente de alta tensión, necesaria para que se produzca la chispa entre los dos electrodos de la bujía [5]. La bobina está formada por un núcleo hecho de varias láminas de ferrita (hierro dulce), sobre el cual van acoplados dos arrollamientos conocidos como: primario y secundario.

- **Circuito primario:** es un bobinado de pocas espiras y alto calibre (si se compara con el secundario) en donde circula la corriente de la batería, por tanto, el campo magnético en el primario es proporcional a la intensidad de corriente.
- **Circuito secundario:** se trata de un bobinado compuesto por muchas espiras de calibre fino, en este bobinado se induce una fuerza electromotriz proporcional al campo magnético que es generado por el arrollamiento primario. Debido al número de espiras se produce una elevación considerable en el voltaje.

3.1.2. Circuito primario

En todo conductor que circule corriente eléctrica se induce una fuerza electromotriz proporcional al campo magnético, cuando se abren los contactos se induce flujo magnético al bobinado secundario y esta descarga corriente, produciendo el salto de la chispa en la bujía. La resistencia R_1 mostrada en la Figura 3.2 se coloca para proteger los contactos del ruptor, mientras el condensador intenta eliminar el fenómeno de autoinducción producido por los picos de voltaje del secundario sobre el primario.

El oscilograma presentado en la Figura 3.3 muestra el comportamiento del bobinado primario de un sistema de encendido compuesto por una inductancia de 3Ω y 16 mH. En la etapa A del gráfico, cuando el ruptor se encuentra en estado abierto, no existe circulación de corriente y el voltaje del circuito se establece en 12 V. Posteriormente en la etapa B, al producirse el cierre de los contactos del ruptor (platinos) el circuito se deriva a masa, lo que ocasiona un aumento en la corriente de

0 a 4 A en forma de diente de sierra. Posterior al cierre del ruptor mostrado en C, la corriente se interrumpe, el voltaje en el bobinado primario intenta establecerse en 12 V, pero debido a un fenómeno de autoinducción del bobinado secundario sobre el primario durante el proceso de generación de la chispa entre los electrodos de la bujía para la inflamación de la mezcla aire-combustible se desarrolla un pico de voltaje que puede alcanzar los 80 a 90 V.

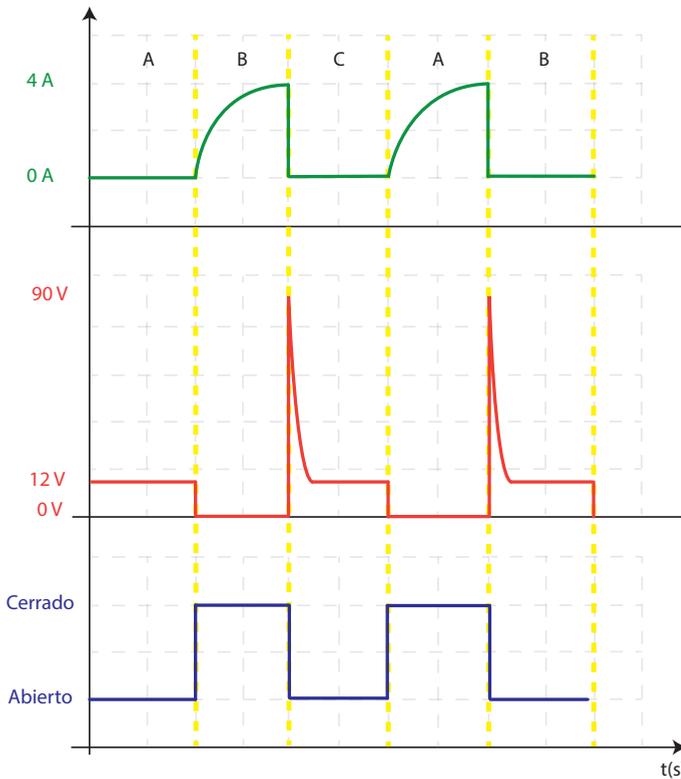


Figura 3.3. Oscilograma corriente voltaje y estado del ruptor en el circuito primario

Todo dispositivo que posee una inductancia genera una curva con un pico característico debido al cierre del contacto (ruptor), porque parte del campo magnético almacenado en el núcleo regresa al bobinado primario. La inductancia genera una curva y por ello requiere de un

tiempo adecuado de carga (periodo *dwell*) para obtener un valor de 4 A como se puede verificar en la Figura 3.4.

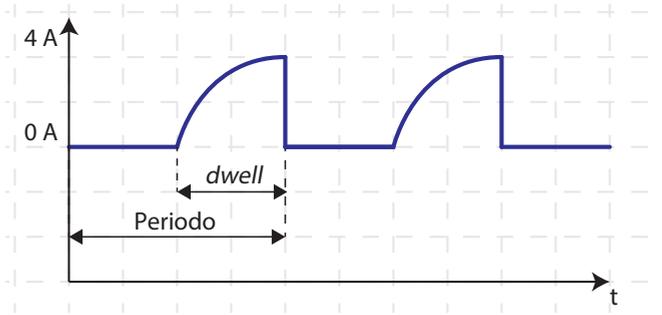


Figura 3.4. Oscilograma del periodo *dwell*

Como se observa en la Figura 3.5, el tiempo útil de trabajo es específico para cada bobina, si el periodo *dwell* es corto no se alcanza la corriente óptima requerida y si es excedido se incurre en un desperdicio energético.

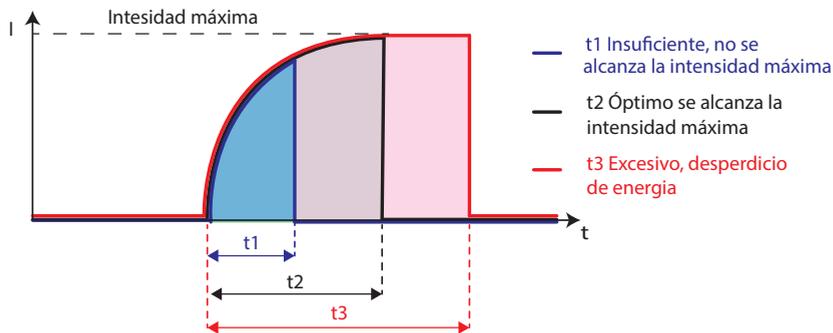


Figura 3.5. Oscilograma de intensidad acorde al tiempo de apertura del ruptor

En la Figura 3.6 se observa que un capacitor puede ser colocado en paralelo al ruptor para evitar que se produzca un arco eléctrico entre los contactos cada vez que el mecanismo realice una apertura o un cierre.

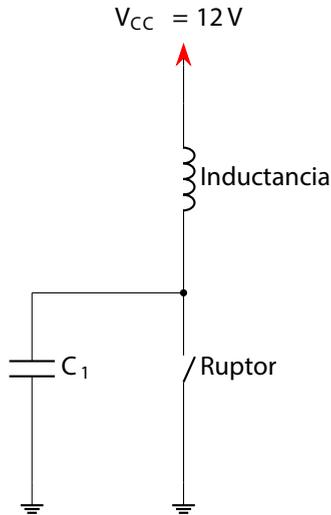


Figura 3.6. Ubicación del condensador en el circuito de encendido

Según se puede visualizar en la Figura 3.7, la variación del valor de la capacitancia es directamente proporcional con el valor del voltaje pico, con un condensador de $0.18\ \mu\text{F}$ (ver Figura 3.7a) se produce una distorsión del voltaje evitando que se cierre por completo. Para un valor de capacitancia de $0.45\ \mu\text{F}$ (ver Figura 3.7b) se produce un voltaje pico muy bajo y para una capacitancia de $0.22\ \mu\text{F}$ se obtiene voltaje pico adecuado sin la presencia de distorsiones de voltaje, obteniéndose un oscilograma ideal (ver Figura 3.7c).

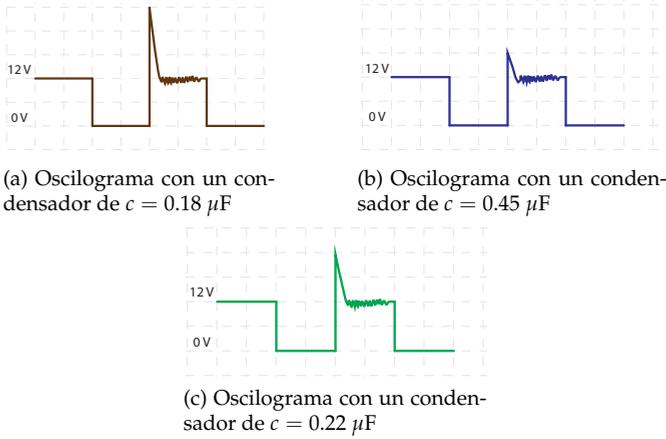


Figura 3.7. Oscilograma del voltaje acorde a diferentes condensadores

El periodo *dwell* se mide en porcentaje y garantiza un tiempo de apertura adecuado, representa la relación entre el tiempo de apertura y cierre del contacto. Este periodo *dwell* se mantiene constante y regula el trabajo en un valor de $48\% \pm 2\%$, aun si el número de revoluciones aumenta como se ve en la Figura 3.8.

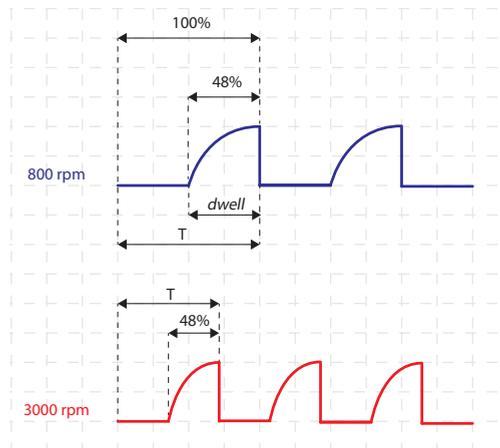


Figura 3.8. Oscilograma tiempo variable-*dwell* constante

3.1.3. Circuito secundario

El circuito secundario está conformado por el devanado de alta tensión de la bobina, los cables y las bujías, cuando la corriente eléctrica circula por el arrollamiento del circuito primario se induce un campo magnético. Este campo es transferido al circuito secundario el cual está formado por un cable de menor calibre pero con mayor número de espiras. De esta forma, se logra una elevación de voltaje y una disminución de intensidad como se representa esquemáticamente en la Figura 3.9.

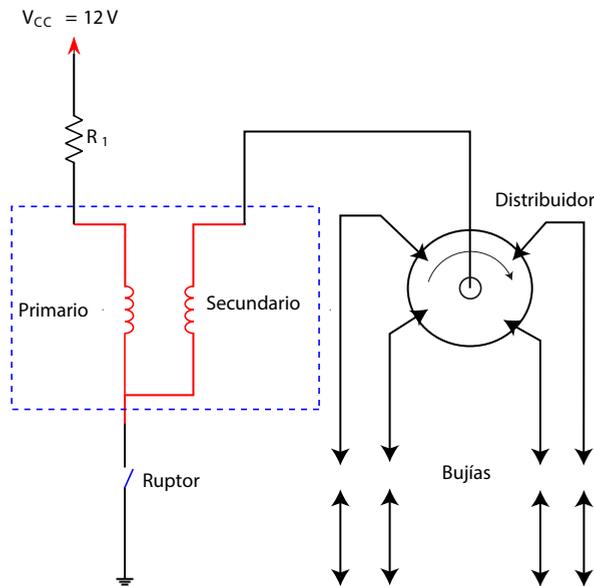


Figura 3.9. Ubicación del circuito secundario en el sistema de encendido

Para que se produzca la chispa entre los electrodos de la bujía, es necesario que el raptor permanezca cerrado durante un período denominado tiempo de carga (*dwell*). Durante este tiempo, se genera un campo magnético en la bobina primaria. Cuando el raptor se abre, el colapso repentino de este campo magnético induce una corriente de alta tensión en el bobinado secundario. Este incremento de voltaje genera un pico de voltaje de encendido, suficiente para superar la resistencia al paso de electrones en el espacio entre los electrodos de la bujía. Una vez que

se alcanza este voltaje, se produce la chispa, provocando la ignición de la mezcla de aire y combustible en el cilindro. Finalmente, el sistema experimenta un proceso de amortiguamiento hasta que la corriente se estabiliza, preparando el ciclo para la siguiente chispa como se muestra en la Figura 3.10.

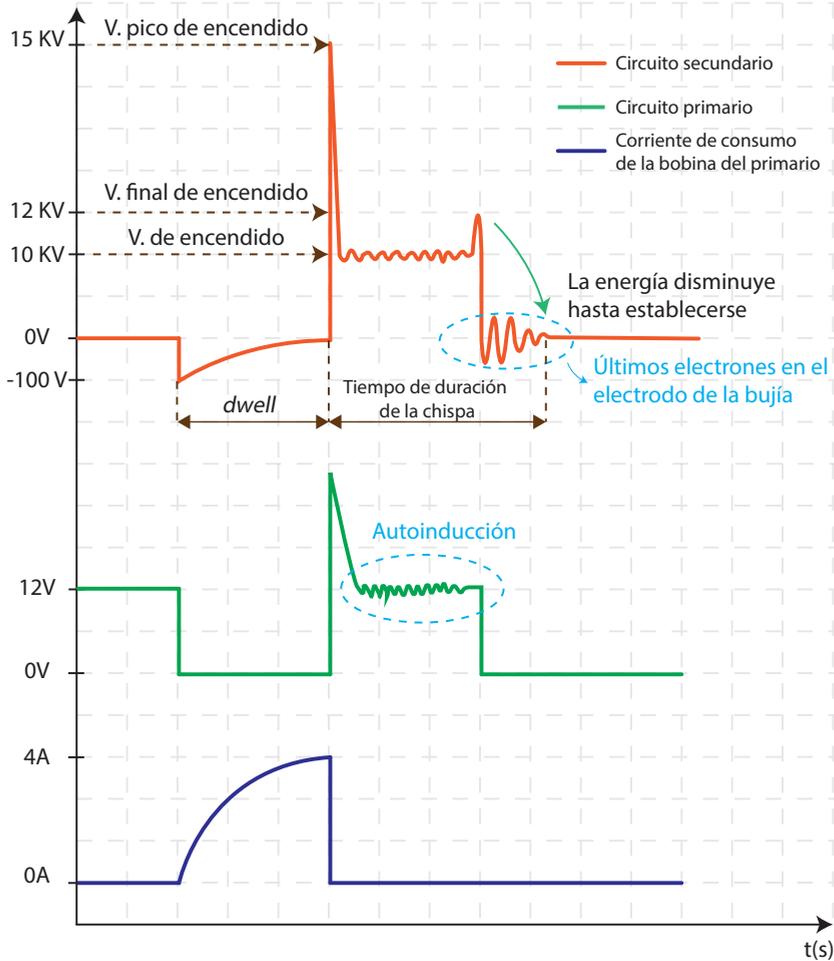


Figura 3.10. Oscilograma del sistema de encendido del circuito secundario

Generación del arco eléctrico entre los electrodos de la bujía.

- La bobina es el dispositivo usado para causar la elevación de voltaje de los 12 V disponibles en la batería hasta una tensión de aproximadamente 15 kV en el devanado secundario de la bobina. Este voltaje elevado es necesario para producir el salto de electrones desde el electrodo central hacia el electrodo de masa de la bujía.
- El voltaje que genera la chispa para el encendido de la mezcla es producido por la acumulación de electrones en el electrodo central de la bujía, la cual ocurre cuando se cierra el contacto en el distribuidor. Esto genera un valor pico de voltaje suficiente para ionizar el aire (ver Figura 3.11). Posteriormente, ocurre un descenso en la tensión conocido como voltaje de encendido momento en el cual se inicia el proceso de combustión en la cámara.
- En el circuito primario y secundario el periodo *dwell* permanece constante.
- La resistencia representa la oposición al salto de la chispa que se produce entre los dos electrodos (es decir, al paso de electrones). Una mezcla pobre presenta mayor resistencia al salto de la chispa debido a que el aire muestra mayor resistencia, mientras una mezcla rica facilita la ionización del aire, lo que contribuye a una combustión más eficiente.



(a)
Acumulación de electrones en el electrodo central de la bujía

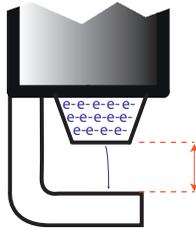


(b)
Flujo de electrones

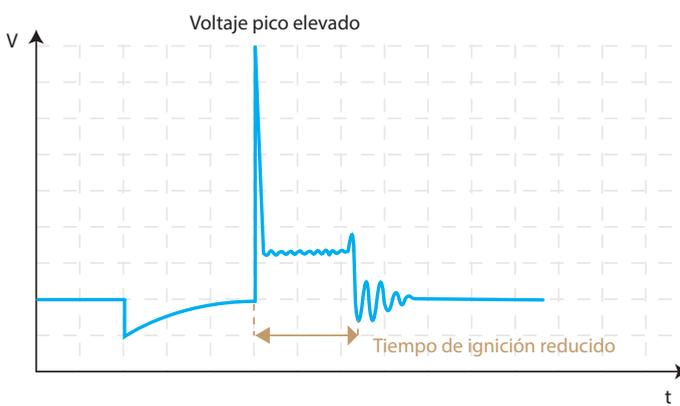
Figura 3.11. Proceso de ignición de una bujía

Influencia de la distancia de separación entre los electrodos para el salto de la chispa

Con una mayor separación entre los electrodos de la bujía, el voltaje pico aumenta, lo que disminuye el voltaje de encendido y reduce la duración de la chispa (ver Figura 3.12), esto puede provocar una combustión incompleta.



(a) Mayor distancia para el salto de la chispa



(b) Oscilograma del voltaje con una distancia mayor para el salto de la chispa

Figura 3.12. Distancia mayor para el salto de la chispa

Por el contrario, si la distancia de separación disminuye, el voltaje pico es menor y el tiempo de encendido se incrementa como se puede observar en la Figura 3.13.

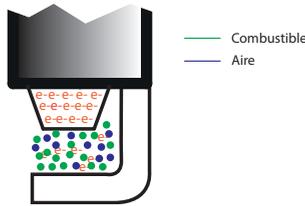


Figura 3.14. Electrón entre las partículas de combustible y aire

El oscilograma generado varía con el tipo de mezcla (pobre, rica, estequiométrica e ideal) como se estudiará a continuación.

Mezcla pobre

No hay voltaje pico porque la resistencia es muy baja en el interior de la cámara de combustión, las oscilaciones generan desorden molecular, y producen un aumento en la temperatura sin la generación de trabajo como se visualiza en la Figura 3.15.

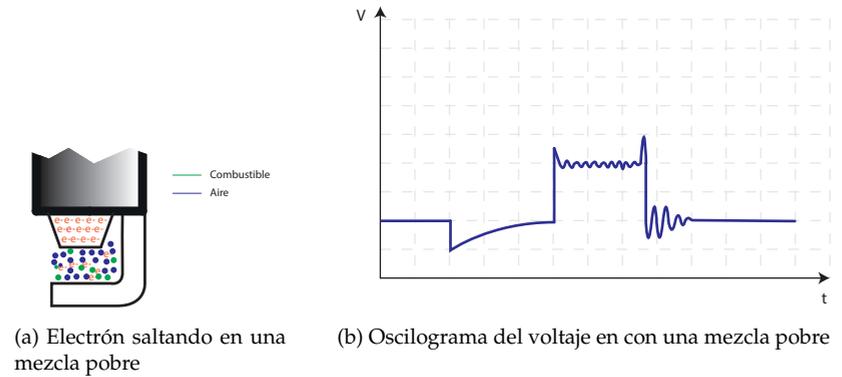
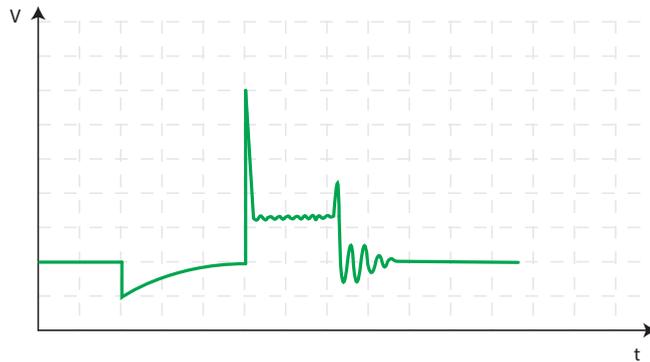


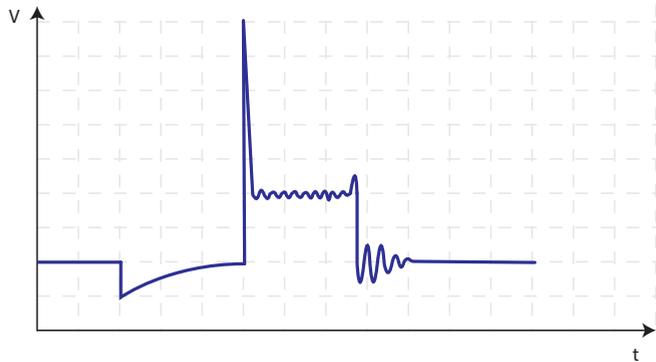
Figura 3.15. Comportamiento durante mezcla pobre

Mezcla estequiométrica y rica.

Como se observa en la Figura 3.16, la mezcla rica produce un pico más alto en comparación con la mezcla estequiométrica debido a que en la cámara de combustión se presenta una mayor oposición al salto de la chispa. Esto da lugar a un mayor voltaje de encendido y favorece una combustión por deflagración.



(a) Oscilograma del voltaje con una mezcla estequiométrica



(b) Oscilograma del voltaje en con una mezcla rica

Figura 3.16. Diferencia entre oscilogramas de mezcla estequiométrica y rica

3.1.4. Adelanto al encendido

En los motores de encendido provocado se genera un avance al encendido para que el salto de la chispa se produzca antes de que el pistón alcance el PMS, consiguiéndose una combustión completa y progresiva. Este adelanto puede obtenerse mediante dos tipos de mecanismo:

- **Adelanto por vacío:** en condiciones de ralentí se tiene una menor presión de vacío en el colector de admisión, por lo que se desplaza ligeramente la membrana dándose un reducido adelanto al encendido, mientras que a elevadas rpm la presión de vacío se incrementa desplazándose en mayor grado la membrana de avance (ver Figura 3.17).
- **Adelanto centrífugo:** depende del régimen de giro del motor, mientras mayor sean las rpm el adelanto debe ser más amplio para compensar la rapidez con la que se realiza el proceso de combustión. Esta acción se consigue mediante masas rotativas ubicadas en el distribuidor o la utilización de mapas cartográficos.

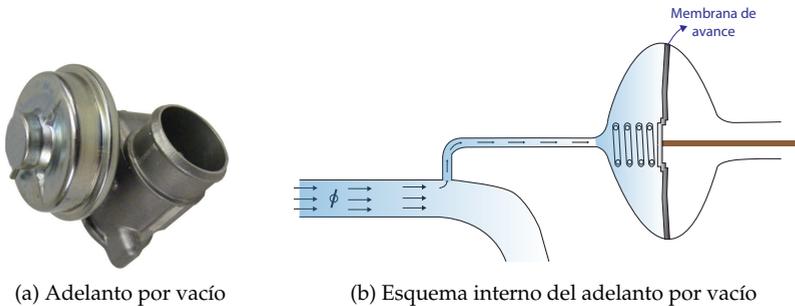
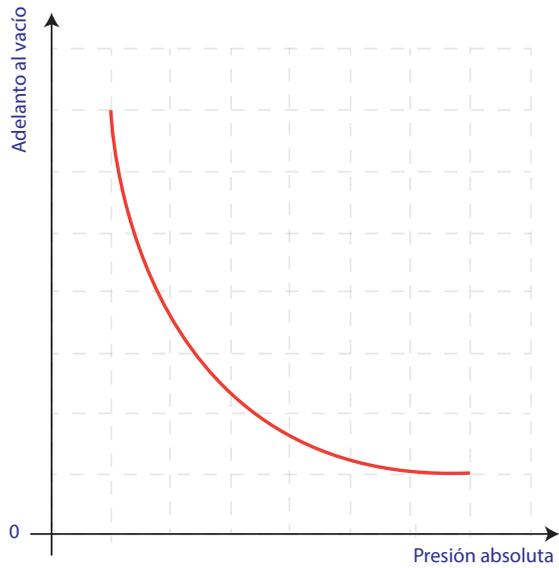
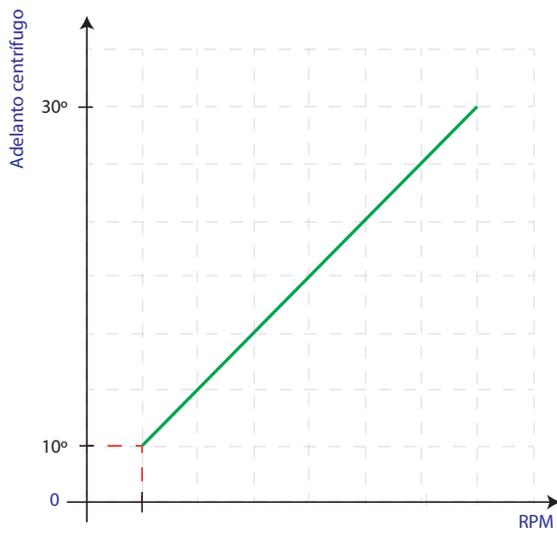


Figura 3.17. Válvula de vacío

El avance por vacío está relacionado con la presión absoluta que produce el motor como se puede verificar en la Figura 3.18.



(a) Oscilograma del adelanto por vacío



(b) Oscilograma del adelanto centrífugo

Figura 3.18. Oscilograma del adelanto al encendido

La carga es la oposición que presenta el motor a girar.

$$P_{man} = f(n) + T \quad (3.1)$$

Donde:

- P_{man} : es la presión media efectiva del motor, que representa la oposición que presenta el motor a girar.
- $f(n)$: es una función que depende de la velocidad del motor .
- T : es una constante que representa la carga total del motor.

Al tener una alta carga del motor el adelanto al encendido se disminuye para evitar el auto encendido de la mezcla especialmente en carreteras con elevadas pendientes como se esquematiza en la Figura 3.19.

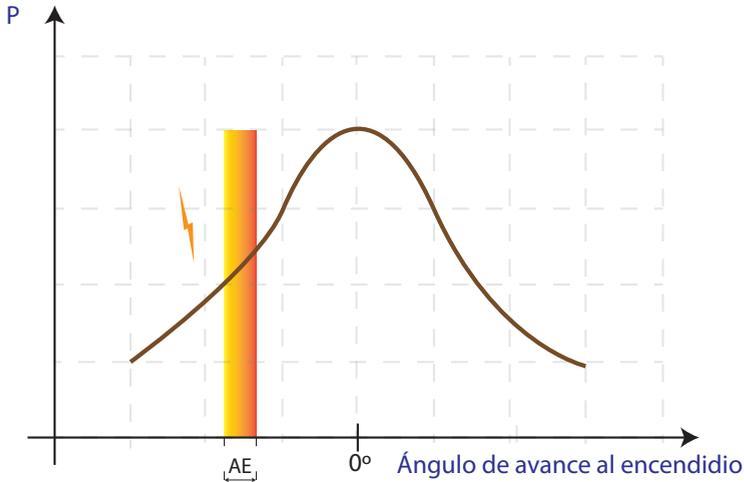


Figura 3.19. Diagrama de presión frente al adelanto al encendido

Desventajas del sistema SZ (platinos)

- Trabaja a bajas intensidades (corriente limitada).
- Desgaste de los contactos.
- Rebote de contactos (a altas revoluciones el platino oscila involuntariamente).
- Porcentaje de *dwell* constante.
- Utiliza adelantos al encendido mecánicos.
- Distribución mecánica de la chispa.
- Requiere operaciones reiteradas de mantenimiento.

3.1.5. Bujías

Las bujías son el elemento encargado de producir la chispa eléctrica, necesaria para iniciar el proceso de combustión por deflagración en el interior de la cámara. La corriente eléctrica es suministrada por la bobina del circuito secundario. Al elegir una bujía para el motor, se debe verificar el tipo específico que requiere, ya que el uso de una bujía no resistiva en un sistema diseñado para este tipo de componente puede provocar un desgaste acelerado del componente y un aumento en el consumo de combustible. La Figura 3.20 presenta un esquema representativo de las partes básicas de una bujía.

En la Tabla 3.1 se describe la designación de bujías habituales en el medio ecuatoriano. Los tipos de bujías resistivas son usadas en vehículos actuales para reducir interferencias electromagnéticas, mientras las bujías no resistivas se usan en sistemas con encendido convencional.

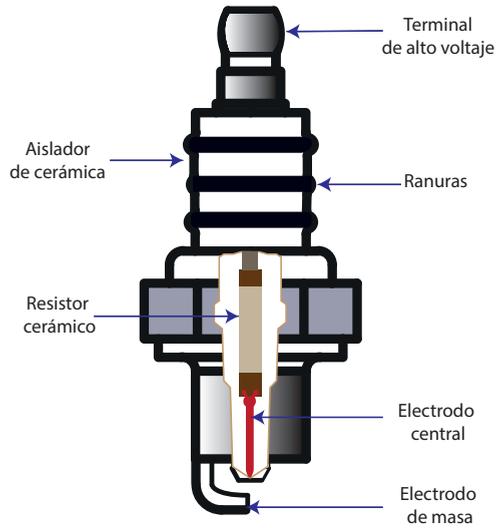


Figura 3.20. Composición interna de una bujía

Tabla 3.1. Codificación de bujías resistivas y no resistivas para autos comerciales en Ecuador

Marca	Resistiva	No Resistiva	Codificación y Explicación	Aplicación Común
NGK	BKR6E-11, BPR5ES	BP5ES, BP6ES	Ejemplo: BKR6E-11 B: Diámetro de rosca 14 mm K: Tipo de asiento cónico R: Resistiva 6: Grado térmico (más alto = más fría) E: Longitud de la rosca 19 mm 11: Separación de electrodos (1.1 mm)	Chevrolet Aveo, Hyundai Accent, Toyota Corolla
Bosch	WR8DC+, FR7DC	W8DC, F7DC	Ejemplo: WR8DC+ W: Diámetro de rosca 14 mm R: Resistiva 8: Grado térmico (más alto = más fría) D: Tipo de electrodo de cobre C: Con resistencia de 5kΩ + : Mejor rendimiento y duración	Kia Rio, Nissan Sentra, Volkswagen Gol
Champion	RC12YC, RN9YC	N9YC, L82C	Ejemplo: RC12YC R: Resistiva C: Material del electrodo de cobre 12: Grado térmico (más alto = más caliente) Y: Electrodo de masa extendido C: Tipo de rosca estándar	Ford Fiesta, Mazda 3, Renault Duster

3.2. Sistema comandado por transistores

En el sistema de encendido convencional, la vida útil de los contactos se encuentra limitada debido al desgaste provocado por el arco eléctrico generado durante su operación. Para la mejora del rendimiento del sistema, se incorpora un transistor entre la bobina y los contactos del distribuidor. Este transistor permite incrementar la corriente en el circuito primario, mejorando la calidad de la chispa al aumentar el voltaje de encendido y prolongar la duración de la descarga del arco eléctrico entre los electrodos de la bujía. Los contactos del sistema solo controlan una corriente reducida que actúa sobre la base del transistor, el cual es responsable de interrumpir la corriente principal del primario. Para proteger al transistor de posibles corrientes parásitas que puedan dañarlo, se instala un diodo en antiparalelo como elemento de protección (ver Figura 3.21).

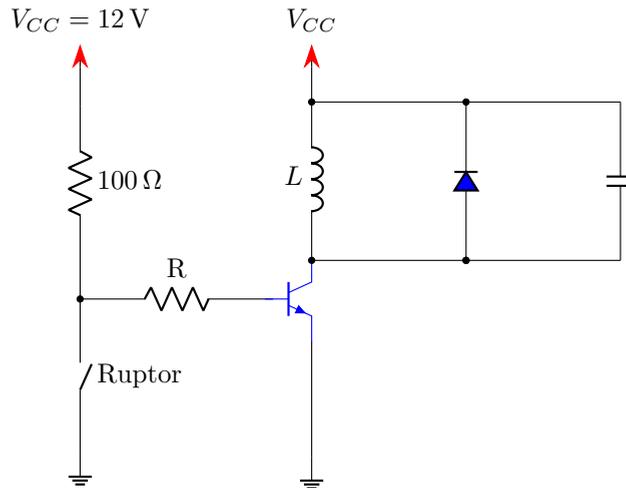


Figura 3.21. Circuito de un sistema de encendido transistorizado con un transistor

Usar un transistor alarga la vida del ruptor porque circula una corriente inferior entre sus contactos, pero esta configuración ocasiona que la chispa salte en otro instante de tiempo, como se ve en la Figura

3.22. En el diagrama, se observa que la corriente presenta picos de hasta 4 amperios correspondientes al salto de la chispa, que se desfasa 180 grados. Para solucionar este desfase, se coloca un segundo transistor, garantizando un control sobre el encendido. La curva roja representa el estado del ruptor, indicando los ciclos de apertura y cierre que permiten el flujo de corriente y el encendido del motor.

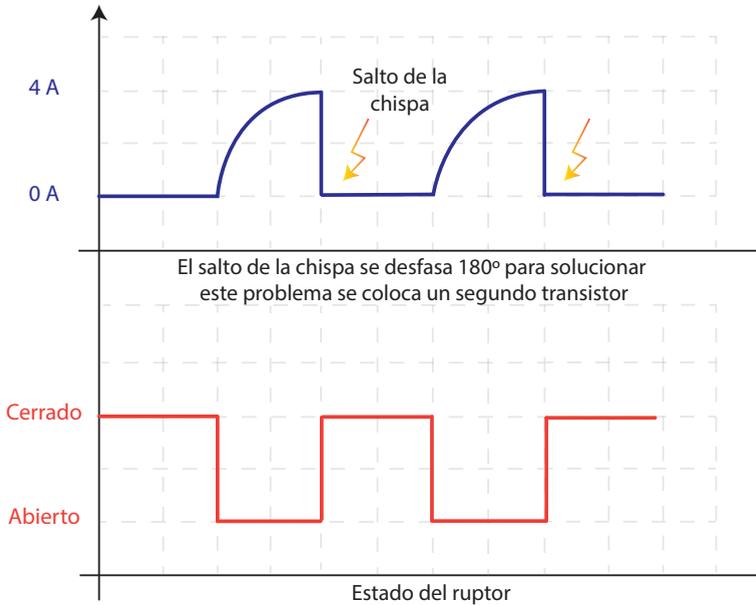


Figura 3.22. Diagrama de la corriente en el encendido con un transistor

Sistema de encendido con dos transistores

En la Figura 3.23 se puede observar un circuito con dos transistores, el primer transistor funciona como amplificador de la señal inicial proveniente del cierre del platino, el segundo transistor de potencia maneja corrientes más altas y permite que el proceso de conmutación sea más rápido. El diodo es usado para proteger el circuito de los picos de voltaje inducidos por la bobina y el condensador suaviza las fluctuaciones de voltaje.

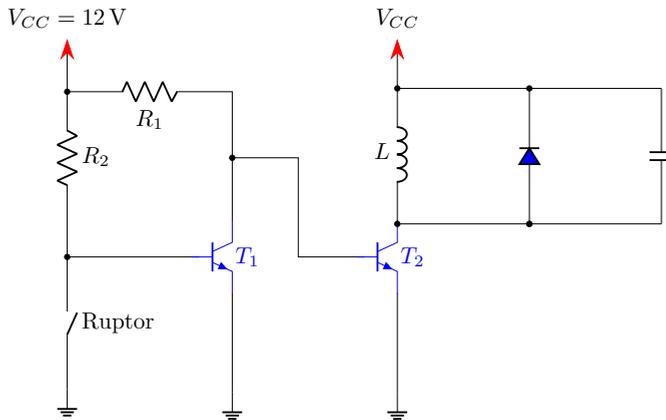


Figura 3.23. Circuito de un sistema de encendido transistorizado con dos transistores

Ventajas

- Menor consumo de combustible.
- Mayor intensidad en el primario, por ende más energía para encendido.
- Mejor chispa.

En la Figura 3.24 se presenta un esquema de activación del circuito con dos transistores en donde se visualiza que al cerrarse el ruptor del platino se cierra el primer transistor permitiendo la activación del segundo, en la curva de amperaje se identifica la carga de la bobina para la posterior generación de la corriente de inducción.

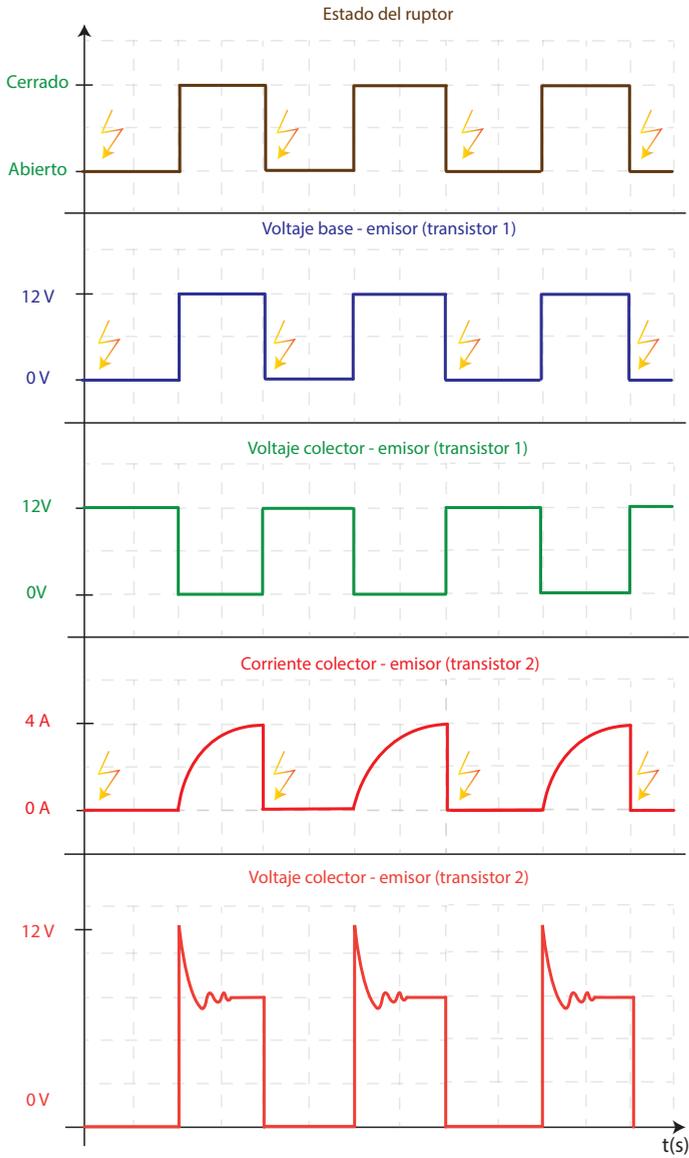


Figura 3.24. Diagrama de la corriente en el encendido TSZ con dos transistores

3.2.1. Módulo de encendido

El módulo de encendido cumple la función de actuar como un interruptor de contacto hacia la bobina, es el encargado de alimentar el devanado primario regulando el tiempo y la intensidad de la corriente a través de un circuito transistorizado interno. Este circuito genera la señal que permite que la chispa ocurra en el momento exacto (ver Figura 3.25).

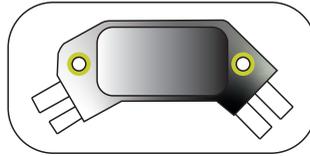


Figura 3.25. Módulo de encendido

Cálculo de un módulo de encendido

Ejemplo 3.1. Para la gráfica mostrada en la Figura 3.26 calcular la intensidad del colector I_c y resistencia de la base R_B .

Datos:

- Tensión de alimentación: $V_{cc} = 12 V$
- Resistencia de carga: $R_c = 8 \Omega$
- Ganancia de corriente del transistor: $HFE = 80$
- Tensión de encendido de la unión base-emisor: $V_{BE} = 0.7 V$
- Tensión de control de la base: $V_{BB} = 5 V$

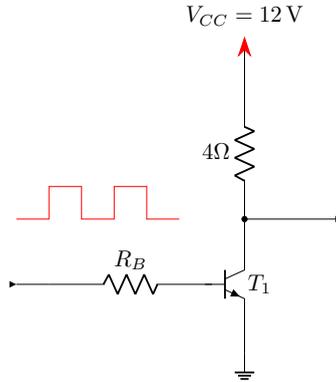


Figura 3.26. Circuito del módulo de encendido

Fórmulas:

$$I_c = \frac{V_{cc}}{R_{cc}} \quad (3.2)$$

$$I_b = \frac{I_c}{HFE} \quad (3.3)$$

$$I_b = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad (3.4)$$

$$(3.5)$$

Resolución

$$I_c = \frac{12 \text{ A}}{4} = 3 \text{ A} \quad (3.6)$$

$$I_b = \frac{3 \text{ A}}{80 \Omega} = 0.0375 \text{ A} \quad (3.7)$$

$$R_b = \frac{5 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{0.037 \text{ A}} = 114.67 \Omega \quad (3.8)$$

$$(3.9)$$

En varias aplicaciones automotrices se recomienda reducir R_B para garantizar que el transistor entre en saturación con seguridad. Un criterio usado es dividir la resistencia calculada entre un factor de 2.

$$R_B = \frac{114.67 \Omega}{2} = 57.33 \Omega \approx 58 \Omega \quad (3.10)$$

3.2.2. Encendido con generador de impulsos de efecto Hall

El sistema de encendido con generador de impulsos de efecto Hall reemplaza el mecanismo de ruptor tradicional por un sensor electrónico encargado de abrir y cerrar el circuito primario de la bobina de encendido. Al no depender de piezas mecánicas en movimiento, este sistema evita el desgaste y mantiene una sincronización precisa en la generación de la chispa.

El circuito integrado Hall tiene tres terminales: uno de alimentación (+), que entrega 12 V o 5 V, dependiendo del modelo; otro a masa (-); y un tercero, que es el de señal (0). Cuando la pantalla del tambor obturador, fabricada de un material diamagnético, se interpone entre el semiconductor Hall y el imán, dispersa las líneas de fuerza, de modo que el campo magnético no afecta al sensor Hall. Como resultado, la tensión entre el terminal de señal y masa es cero ($V = 0$), y no se genera señal de salida.

Por el contrario, cuando la pantalla deja libre el entrehierro, el campo magnético actúa sobre el sensor, generando una diferencia de potencial denominada tensión Hall (U_h). Esta tensión produce una señal de salida que varía entre U_h y 0 en función de la posición del tambor obturador, generando una señal cuadrada utilizada para el control del encendido. Una representación del funcionamiento de este sistema de encendido se puede ver en la Figura 3.27.

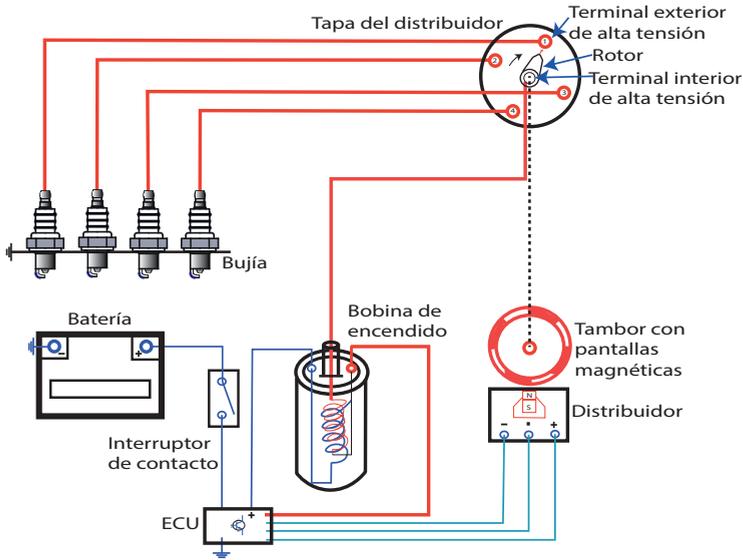


Figura 3.27. Sistema de encendido Hall

Como resultado, la etapa de potencia del módulo electrónico permite la circulación de corriente a través del devanado primario de la bobina, de forma similar al encendido convencional, cuando los contactos del ruptor se cierran, con un ángulo de cierre determinado por el ancho de la pantalla del tambor del obturador. Cuando la pantalla se aleja del entrehierro, el campo magnético actúa generando una diferencia de potencial entre los terminales de señal y masa, conocida como tensión Hall. En ese instante, el circuito Hall se activa y el módulo electrónico interrumpe el paso de corriente en el devanado primario, provocando la generación de la chispa de encendido. En un generador de efecto Hall, al aumentar la velocidad de giro, la frecuencia de la señal también se incrementa, mientras que la tensión se mantiene constante [6]. Un esquema de funcionamiento del sistema se puede observar en la Figura 3.28.

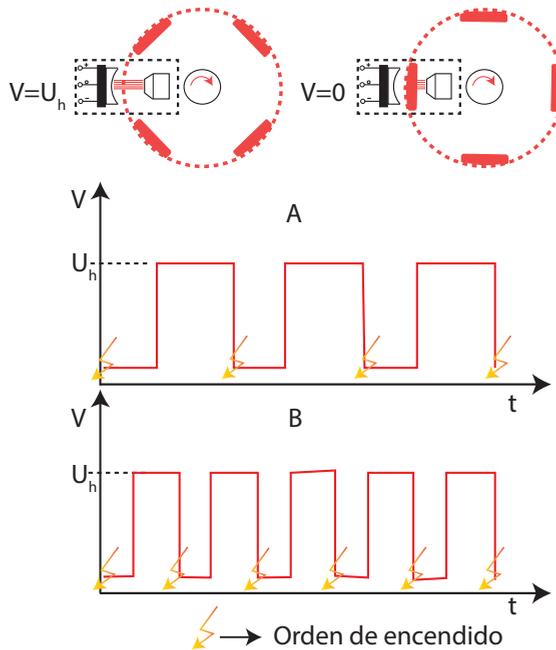


Figura 3.28. Principio de funcionamiento del sensor Hall

3.2.3. Sistema de encendido con generador de impulsos inductivos

Este sistema de encendido es muy similar al anterior, con la diferencia de que el generador Hall es reemplazado por un generador de impulsos por inducción. El generador de impulsos funciona como se muestra en la Figura 3.29. Un rotor (1), fabricado en material ferromagnético, gira arrastrado por el eje de mando del distribuidor y posee tantos salientes como cilindros tenga el motor. Un estator está compuesto por un imán permanente (2) y una bobina (3) enrollada alrededor de un núcleo metálico.

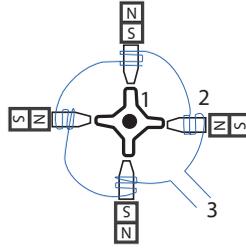


Figura 3.29. Generador de impulsos inductivo de un motor de cuatro tiempos

En la Figura 3.30, en la sección A, cuando un saliente del rotor se aproxima al estator, el entrehierro disminuye, lo que incrementa el flujo magnético, e induce una tensión positiva en la bobina. Al final del recorrido del flanco ascendente del rotor, se alcanza el valor máximo de tensión positiva. El extremo del saliente del rotor tiene una forma tal que, durante su giro, evita que el entrehierro varíe con el estator, como se muestra en la sección B. Por lo tanto, no hay variación en el flujo magnético y la tensión inducida desaparece hasta llegar a cero. Al observar la sección C, cuando el flanco descendente del diente del rotor comienza a alejarse del estator, el entrehierro aumenta, disminuyendo bruscamente el flujo magnético. Esto produce una tensión inducida negativa en la bobina, que alcanza su valor máximo negativo cuando termina el recorrido de flanco. Posteriormente, en la sección D, debido a que el cuerpo central del rotor es circular, el entrehierro no varía [2]. Al no haber variación en el flujo magnético, la tensión inducida regresa hasta llegar a cero. Tras este punto, el ciclo se repite.

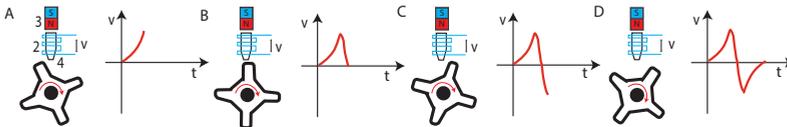


Figura 3.30. Principio de funcionamiento del sistema de encendido con sistema inductivo

3.2.4. Encendido electrónico DIS

El sistema DIS (Distribuidorless Ignition System) no implementa un distribuidor en el sistema de encendido, lo que reduce el desgaste al eliminar componentes mecánicos. Los extremos del arrollamiento secundario son conectados a cada bujía de manera directa (encendido secuencial). En algunos casos cada bobina activa dos bujías (encendido semi-secuencial), configurándose como un sistema de chispa perdida. En este tipo de encendido la chispa salta en dos cilindros a la vez debido a la disposición de los pistones al trabajar en parejas como se ve en la Figura 3.31.

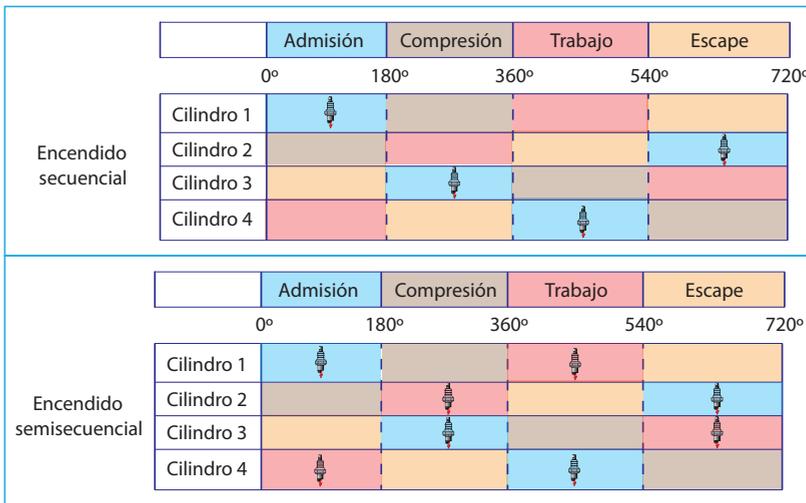


Figura 3.31. Configuración del orden de encendido

La primera chispa se denomina chispa principal y ocurre durante la fase de compresión, por lo que presenta un alto voltaje, necesario para superar la presión elevada en la cámara de combustión. Por otro lado, la chispa perdida se produce en el cilindro que está en la fase de escape, donde la presión es baja. Esta chispa requiere menos energía, no provoca combustión y no afecta negativamente el funcionamiento del motor, ya que la mezcla presente es escasa y la temperatura es

reducida. El módulo de encendido se encarga de controlar el orden de activación de las bobinas.

3.2.5. Encendido electrónico EDIS

Este sistema permite la eliminación total de elementos mecánicos, el funcionamiento del sistema de encendido consiste en que la unidad de control, mediante datos predefinidos de información como carga, revoluciones y otras condiciones de funcionamiento del motor, activa las bobinas de encendido colocadas directamente sobre las bujías evitando caídas de tensión.

Cartografía de encendido

La unidad de control electrónica (ECU) mediante información de diversos parámetros o variables del motor como el adelanto al encendido (α_e), carga del motor (%) y régimen de giro (η), se encarga de realizar ajustes a su funcionamiento a partir de un mapa base. El objetivo es lograr que la mezcla de aire-combustible se quemara de manera eficiente, evitando el autoencendido (pistoneo), reduciendo las emisiones contaminantes y mejorando las prestaciones del motor. En el mapa de encendido se representan gráficamente las variables a ser controladas de un motor de combustión interna. Estas variables permiten una corrección del avance al encendido de manera eficiente en función de la demanda requerida, la ECU calcula y realiza las correcciones de las variables nombradas anteriormente. En la Figura 3.32 se puede observar la representación de un mapa de encendido.

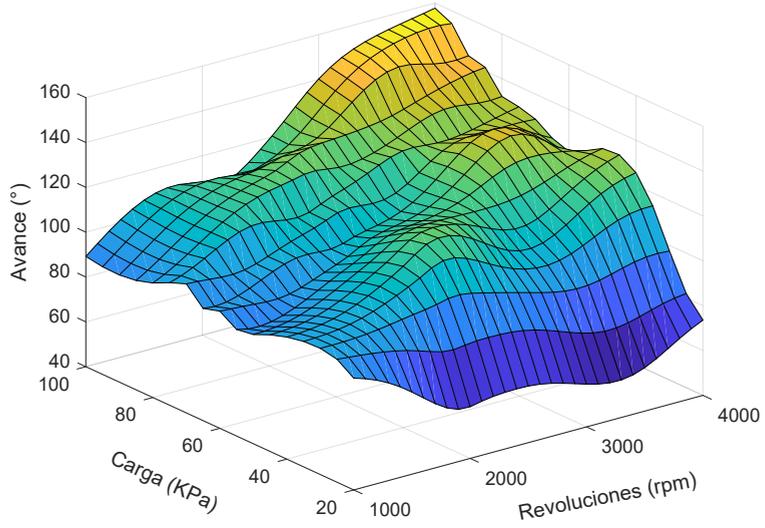


Figura 3.32. Mapa de encendido

Bibliografía

- [1] *Manual técnica del automóvil*, Robert Bosch, Alemania, 2005.
- [2] Pardiñas J., y Feijó R., *Sistemas Auxiliares del motor*, Editex, 2018.
- [3] Rakesh K. M., *Reciprocating Engine Combustion Diagnostics*, Springer International Publishing, 2019
- [4] Darrigrandi Marqués, *Sistemas de encendido*, Reverte, 2000.
- [5] Sánchez, E. *Sistemas auxiliares del motor*, Macmillan Iberia, S.A., 2009. ProQuest Ebook Central. Recuperado de: <https://bit.ly/4jILDwh>
- [6] Cramer M. y Hoffmann J., *Performance Fuel Injection Systems HP1557: How to Design, Build, Modify, and Tune EFI and ECU Systems. Covers Components, Sensors, Fuel and Ignition Requirements, Tuning the Stock ECU, Piggyback and Standalone Systems*, Penguin Publishing Group, 2010.
- [7] MIATATURBO, Need good Ignition map for turbo setup, 2019, 25 de junio. Recuperado de: <https://bit.ly/4i1SZEP>.

4 | Diagnóstico de los sistemas de inyección

4.1. Diagnóstico

El fin de la gestión electrónica es identificar cuándo se debe inyectar el combustible y en qué cantidad en función de los PID (identificador de parámetro de diagnóstico), dichos parámetros se encuentran normalizados por protocolos de comunicación. Los datos obtenidos pueden ser de tipo analógicos o digitales y permiten el reconocimiento, análisis y diagnóstico de vehículos mediante la correlación de las diferentes señales. Existen más de un centenar de PID disponibles que facilitan al técnico el proceso de diagnóstico. En muchos casos, se necesitan tan solo 25 PID (o incluso menos según la pericia del técnico) para resolver un problema de desempeño del motor como se observa en la Figura 4.1.

PID

Son variables físicas procesadas por la unidad de control que posteriormente son parametrizadas mediante la recolección de información de sensores y actuadores.

PID → variable física del motor (sensores).
 PID → diagnóstico (procesamiento).
 PID → variable de salida (actuadores).

**Para saber ¿cuándo y cuánto inyectar?,
 analizamos los siguientes sensores con sus respectivos PID.**

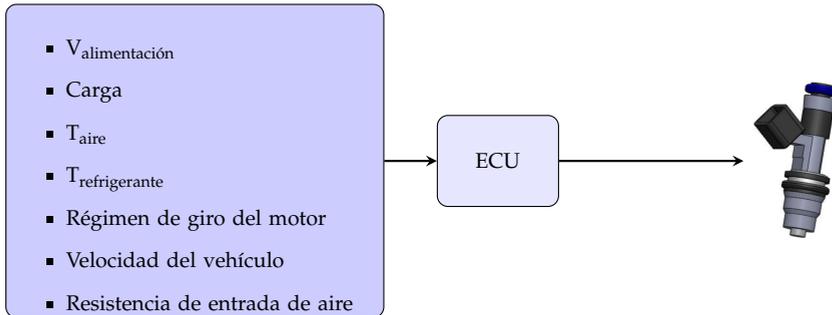


Figura 4.1. Distintos PID utilizados en la inyección

4.2. Sensor de posición del cigüeñal (CKP)

Determina la posición angular del cigüeñal, así como su velocidad y aceleración angular, con el uso un escáner se puede observar el comportamiento de las variables que fueron interpretadas por la unidad electrónica de control (ECU) como se puede ver en la Figura 4.2.



Figura 4.2. Distintos tipos de sensores CKP

En la Figura 4.3 se esquematiza cómo diferentes parámetros pueden ser obtenidos a partir de un mismo sensor, en este caso, la posición del pistón es obtenida a través del CKP y por intermedio de este también la velocidad del giro del motor, variables usadas para predecir la cantidad e instante de la dosificación del combustible.

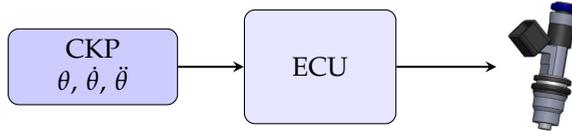


Figura 4.3. Distintos PID proporcionados por el sensor CKP

Cuando el motor se encuentre en condiciones inestables de funcionamiento puede ser ocasionado por lecturas irregulares del sensor CKP, como se pueden visualizar en la Figura 4.4. Adicionalmente, puede ser una herramienta de diagnóstico útil para verificar defectos durante el encendido del motor, como se ve en la Figura 4.5, donde se muestra el caso en el que el sensor CKP se encuentra averiado, lo que provoca un retraso al arrancar, e indica problemas durante el encendido del motor.

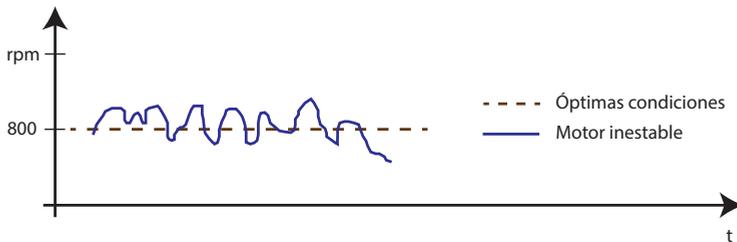


Figura 4.4. PID del sensor CKP cuando el motor está en ralentí

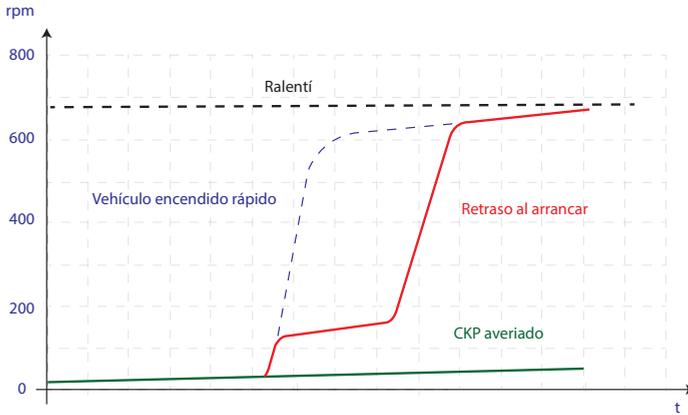


Figura 4.5. Gráficas de los PID de los distintos tipos de arranque

Algunos vehículos cuentan con un sistema de seguridad de encendido para garantizar la lubricación durante los arranques en frío, si no dispone información proveniente del sensor CKP, los inyectores no funcionarían porque tienen dependencia de la información aportada por el sensor CKP.

4.2.1. Falla en el encendido

Como se dijo, en el apartado anterior, cuando ocurre una falla como la pérdida de señal del sensor CKP, la computadora abordo genera un DTC (Data Trouble Code), este código de avería es detectado por la unidad de control como un fallo (Check Engine) pudiéndose ver algunas de sus variantes en la Figura 4.6.



Figura 4.6. Diferentes tipos de luz indicadora MIL→ (Malfunction Indicator Light)

4.3. Sensor de posición del árbol de levas (CMP)

El sensor de posición del árbol de levas se encarga de determinar cuando el cilindro 1 se encuentra en el punto muerto superior (PMS) durante la fase de compresión. Este sensor permite la sincronización precisa de la inyección de combustible y del encendido. La representación física del sensor se puede ver en la Figura 4.7



Figura 4.7. Sensor CMP

Como se observa en las Figuras 4.8 y 4.9, puede haber una pérdida de señal del sensor de posición del cigüeñal (CKP) o del sensor de posición del árbol de levas (CMP). Esta pérdida puede ser producida por fallos en el sistema de distribución, originando códigos de avería como P0320 o P0304. Entre las causas más comunes de estos problemas se incluyen la rotura de la banda de distribución, un sensor en mal estado o un mal contacto de los cables en la unidad de control del motor (ECU).

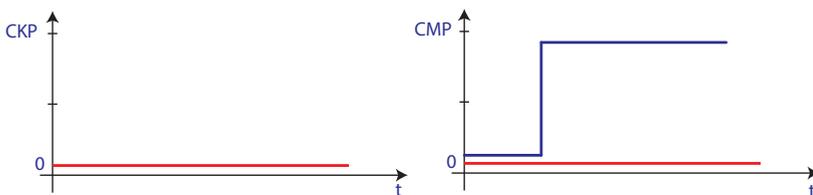


Figura 4.8. Gráfica donde la ECU determina "mal fuction" o "no signal" del sensor CKP

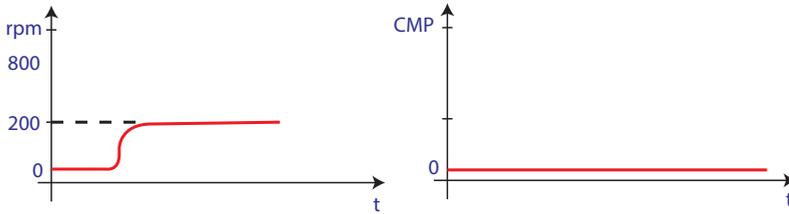


Figura 4.9. Gráfica donde la ECU determina "mal fuction" o "no signal" del sensor CMP

Al observar una curva similar a la presentada en la Figura 4.10, que indica la ausencia de señal en el sensor CMP, la computadora del vehículo activará la luz de indicación de mal funcionamiento (MIL) en el tablero. En respuesta a esta situación, el sistema de inyección cambiará de un modo semisecuencial o simultáneo.

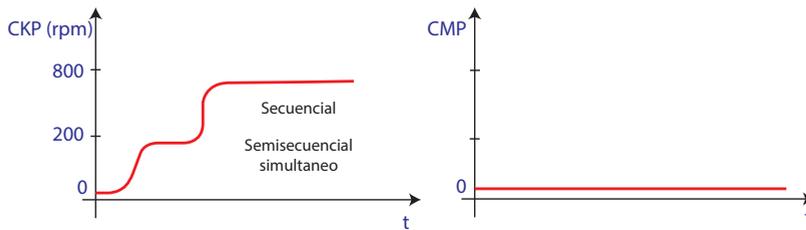


Figura 4.10. Gráfica donde la ECU determina falla del sensor CMP y cambia de tipo de inyección

Cuando se produce una avería en el sensor CMP o en su cableado, muchos vehículos cambian automáticamente de un sistema de inyección secuencial a uno semisecuencial, lo que permite que el motor continúe funcionando, aunque con un bajo rendimiento. Sin embargo, existen vehículos que no eliminan el código de avería hasta que se desconecte el borne negativo de la batería o que un mecánico lo elimine.

La ecuación 4.2, que representa la ley de los gases ideales, describe las propiedades de un gas teórico y puede utilizarse para inferir el tiempo de inyección en un motor de encendido provocado.

Para saber cuánto inyectar, se analizan los siguientes sensores con sus respectivos PID.

$$PV = nRT \tag{4.1}$$

$$m = \frac{PV}{nrT} \tag{4.2}$$

- P= presión absoluta en el colector de admisión → obtenida del sensor MAP
- V= volumen → obtenido del volumen del cilindro
- R= constante universal de gases (8.314J/mol · K)
- T= temperatura absoluta → calculada a partir del sensor IAT
- n= masa molecular

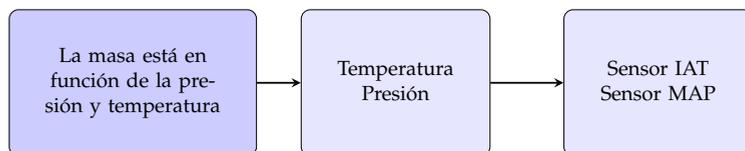


Figura 4.11. PID necesarios para determinar el tiempo de inyección

4.4. Sensor de presión absoluta del colector de admisión (MAP)

El sensor MAP genera el PID "presión absoluta del colector de admisión" y a través de un cálculo permite obtener un parámetro de masa de aire, en caso de que el motor disponga únicamente del sensor MAF este

indica directamente los valores de masa de aire por unidad de tiempo directamente. El sensor MAP debe ubicarse en un punto central, alejado del cilindro 1, para asegurar la medición de valores de presión representativos de todo el colector de admisión, en lugar de registrar valores específicos de un solo cilindro. Un esquema referencial de su principio de funcionamiento es mostrado en la Figura 4.12.

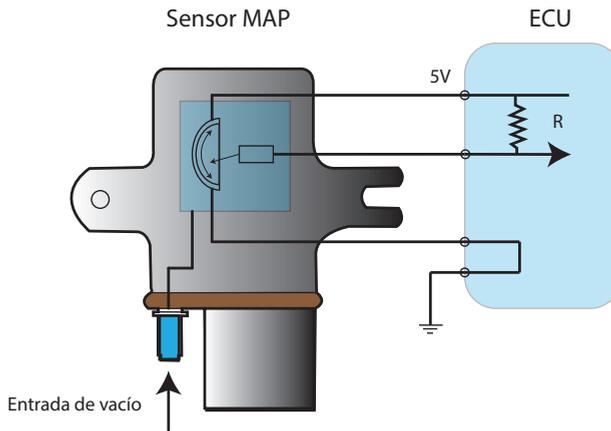


Figura 4.12. Representación del sensor MAP junto con su esquema electrónico

Análisis del torque y la carga motor a partir del sensor MAP

- La salida natural de un motor de combustión interna Otto es el torque (trabajo).
- La carga es un torque opositor al giro del motor.
- La velocidad de giro del motor es la resultante entre el torque que genera el motor, y el torque de oposición denominada potencia.
- La carga en ralentí representa un pequeño torque que no excede del 10% de trabajo que puede generar un motor.

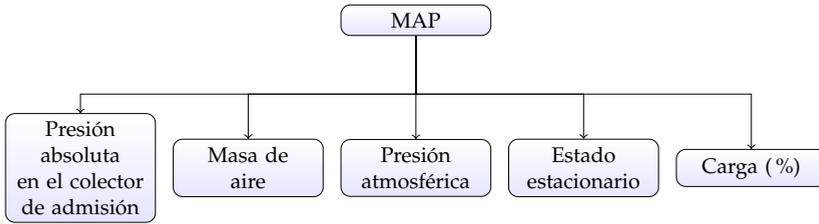


Figura 4.13. Distintos PID que se obtienen del sensor MAP

La carga del motor se encuentra relacionada con la marcha del vehículo como se visualiza en la Figura 4.14. Mientras mayor sea la reducción en la transmisión durante la fase de desaceleración del motor con acelerador cerrado, mayor depresión se puede generar en el colector de admisión.

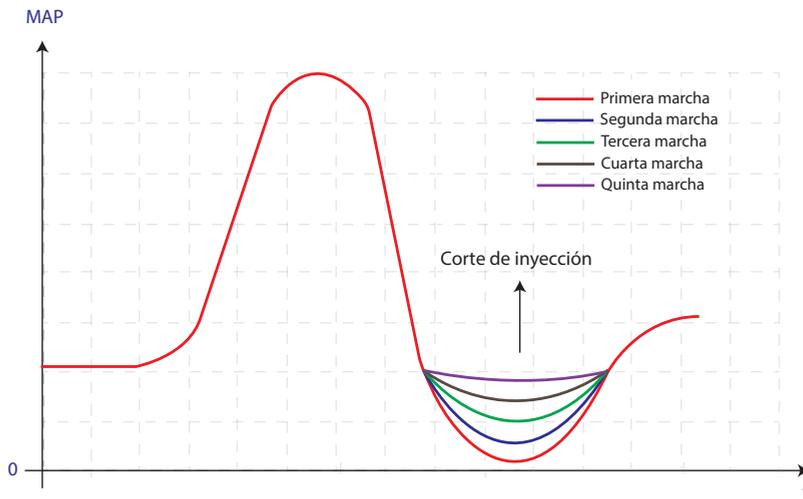


Figura 4.14. Sensor MAP en función de la marcha del vehículo

Según se observa en la Figura 4.15, la zona 1 identifica un motor en ralentí porque la presión absoluta es baja, mientras en la zona 2 la presión es similar a la atmosférica, después la velocidad aumenta progresivamente hasta volverse constante (se estabiliza). El PID de carga entre la zona 1 y 2 evidencia la existencia de un cambio de marcha.

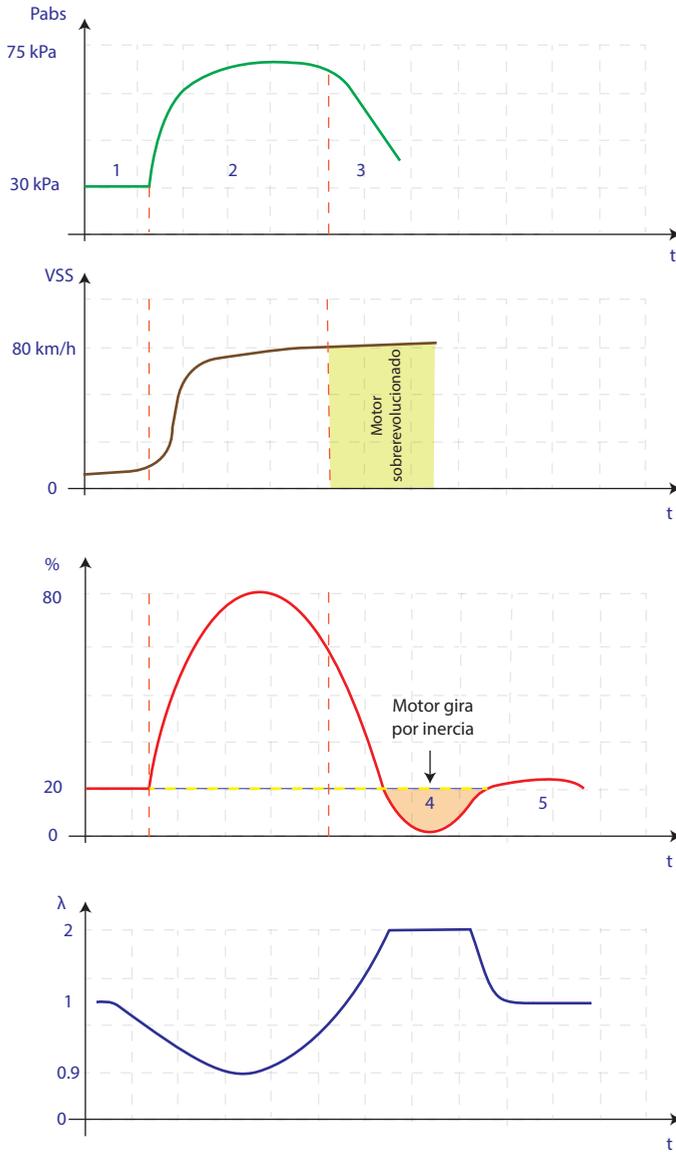


Figura 4.15. Gráfica de la relación presión en la admisión - velocidad del vehículo - porcentaje de carga

En la zona 3 la presión absoluta decae porque disminuye la carga en el motor, la velocidad permanece constante pero el motor está sobre-revolucionado, por lo cual la carga desciende debido a que el motor empezó a vencer la inercia del vehículo, identificando un nuevo cambio de marcha.

En la zona 4 el motor no genera potencia más bien está absorbiendo la potencia generada por los neumáticos, en este momento el tiempo de inyección se reduce a cero y el motor se apaga.

Una vez que no exista potencia que absorber como se muestra en la zona 5, el motor se enciende nuevamente y se mantiene en ralentí.

Como se describió anteriormente, la presión del colector de admisión tiene una relación directa con la carga del motor, si el sensor detecta baja carga y presión en el colector de admisión, entonces la ECU empobrece la mezcla e inyecta menos combustible, si la carga es alta y la presión es alta en el colector de admisión, la ECU enriquece la mezcla.

En la Figura 4.16 se muestra el oscilograma del voltaje de señal de salida de un sensor MAP, a partir del cual se puede interpretar lo siguiente:

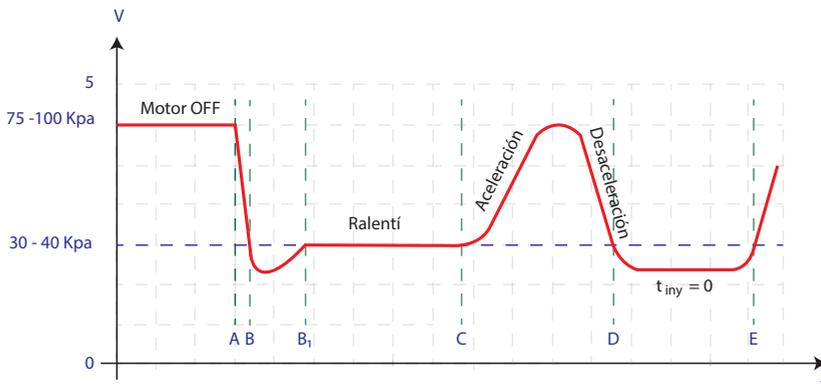


Figura 4.16. Oscilograma del tiempo vs. voltaje del sensor MAP

- Hasta el punto A, el motor está apagado, la presión del colector de admisión es igual a la presión atmosférica (75 kPa en una ciudad a 2500 msnm y 100 kPa a nivel del mar).

- Desde el punto A al punto B, el motor es acelerado por lo cual se genera un vacío en el colector de admisión provocado por la succión de los pistones.
- Del punto B al punto B_1 , se genera el llamado “valle de presión”. Esto se relaciona con una acentuación del vacío justo antes de que el flujo de aire y la apertura del acelerador se estabilicen.
- Del punto B_1 al punto C, el motor se encuentra en ralentí con una presión de 30 a 40 kPa, identificativo de un motor en buen estado, si esta presión supera los 50 kPa por ejemplo, pudiese significar que el motor ha perdido o está perdiendo su estanqueidad.
- Del punto C al punto D, la curva mostrada es el resultado de realizar una aceleración y desaceleración (pisar el pedal a fondo y soltar), producto de una necesidad extra de torque en las ruedas al subir una pendiente pronunciada o arrastrar peso extra (carga positiva o más carga al motor) y al desacelerar se deja de necesitar esta carga extra por la inercia vencida.
- Del punto D al punto E, se puede ver en el oscilograma un vehículo circulando en marcha directa (por lo general en cuarta marcha) y sin acelerar, lo que genera una carga negativa y permite el corte de inyección (se ahorra combustible y se enfría el motor porque funciona como un compresor).

En un vehículo con sistema de inyección el valle de presión visualizado en la Figura 4.16 se genera por un corte de inyección (no se inyecta combustible en el cilindro) y el motor se mueve por inercia. Un valle grande es indicativo de un motor en buenas condiciones, caso contrario, un valle de pequeñas dimensiones significara que el motor se encuentra en mal estado, por lo general el valle de presión tiene un valor de 15 kPa por debajo de la presión de ralentí.

Si se amplía la gráfica del ralentí en el oscilograma de la Figura 4.17, se puede observar el funcionamiento normal del motor en ralentí en la Figura 4.18. En (A), los picos representan el adelanto a la apertura de la válvula de admisión (AAA) y el retraso al cierre de la válvula de escape

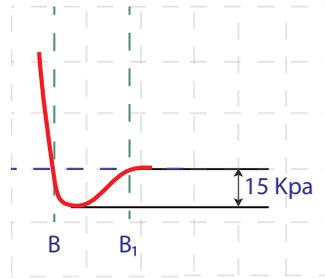


Figura 4.17. Valle de presión del Sensor MAP

(RCE). En (B), se muestra con una línea entrecortada cómo se vería la curva en caso de que el motor presentara alguna falla.

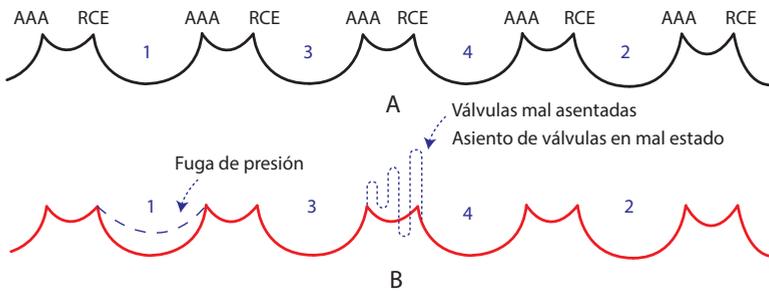


Figura 4.18. Gráfica del ralentí ampliada del sensor MAP. Funcionamiento normal del ralentí (A), gráfica representando ciertas fallas en los cilindros (B)

En la Figura 4.19 se presenta el funcionamiento clásico del sensor MAP, cuando el motor está apagado se detecta la presión atmosférica, la cual depende la zona geográfica, aproximadamente 100 kPa para ciudades ubicadas al nivel del mar y disminuye en unos 10 kPa por cada 1000 metros de altitud. En condiciones de ralentí la presión decrece debido al vacío generado por los cilindros del motor.

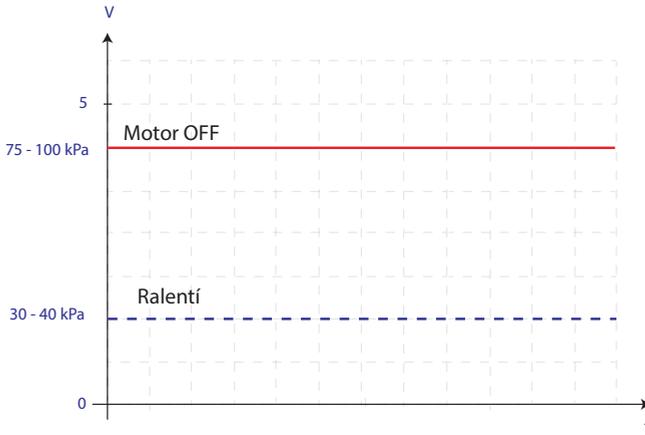


Figura 4.19. Estado del sensor MAP con motor apagado y encendido sin carga

El sensor MAP puede presentar deriva con el paso del tiempo como se ve en la Figura 4.20, esta deriva significa una desviación en la medición, esto hace que los valores medidos por el MAP no sean exactos, por lo cual es interesante conocer parámetros referenciales como la presión atmosférica y de vacío del motor.

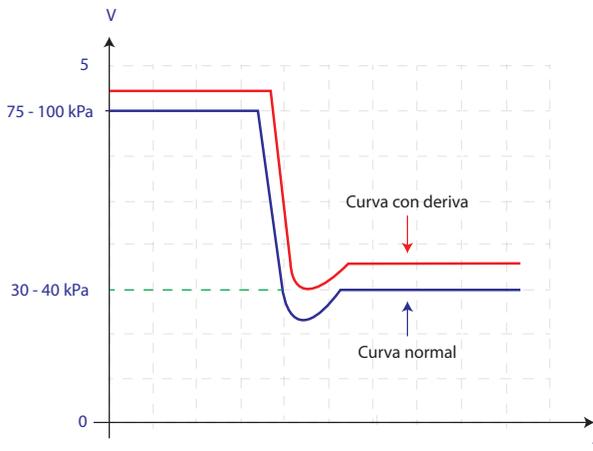


Figura 4.20. Gráfica del MAP presentando deriva

4.4.1. Parámetros estimados a partir del sensor MAP

La ECU necesita conocer la presión en el colector de admisión para calcular la cantidad de combustible a inyectar. Cuando encender la mezcla en el cilindro, y otras funciones. El sensor MAP permite medir los siguientes parámetros para calcular lo antes mencionado.

- Presión absoluta (P_{abs})
- Torque (trabajo generado)
- Tiempo de inyección (t_{iny})
- Valor de la carga (%)

Tiempo de inyección

El tiempo de inyección es calculado por la ECU en base a los parámetros que el sensor MAP entrega.

$$t_{iny} = \frac{P_{MAP} \cdot V_{iny}}{\rho_f \cdot T_{IAT} \cdot k \cdot AFR} \quad (4.3)$$

Donde:

- t_{iny} : tiempo de inyección.
- T_{IAT} : temperatura censada por el sensor IAT.
- P_{MAP} : presión que mide el sensor MAP.
- AFR : mezcla aire-combustible (14,7).
- V_{iny} : cilindrada unitaria.
- k : constante (R_a , constante del aire).
- ρ_f : densidad del combustible.

- Si el sensor IAT falla, la ECU toma una temperatura de $17\text{ }^\circ\text{C}$ ($^\circ\text{C} + 273$) como temperatura por defecto.
- Si falla el MAP, la ECU envía mezcla rica para mantener encendido el motor.

4.5. Sensor de posición del acelerador (TPS)

Se encuentra solidariamente unido al eje de la mariposa de aceleración y tiene como función informar a la unidad de control sobre el ángulo y la velocidad con la que se realiza la apertura o cierre de la aleta o mariposa de aceleración. Además, se pueden reconocer estados de funcionamiento como: ralentí cuando la válvula está completamente cerrada o condiciones de media o completa carga del motor cuando la aleta está completamente abierta [6].

En la Figura 4.21 se muestra el sensor TPS, el cual cumple funciones de identificación del motor estacionarias y transitorias. En condiciones estacionarias, se puede identificar tres zonas. Ralentí caracterizado por un 0% de apertura en la mariposa de aceleración, media carga cuando la mariposa de aceleración se encuentra en una posición intermedia y plena carga con el 100% de activación. Adicionalmente, este sensor permite identificar aceleraciones para adherir combustible al cálculo del tiempo de inyección o en desaceleración para limitar la inyección de combustible al cilindro.

Información del PID

Porcentaje de apertura \rightarrow % \rightarrow (0-100)

Ángulo de giro de la mariposa \rightarrow α \rightarrow (0-90)

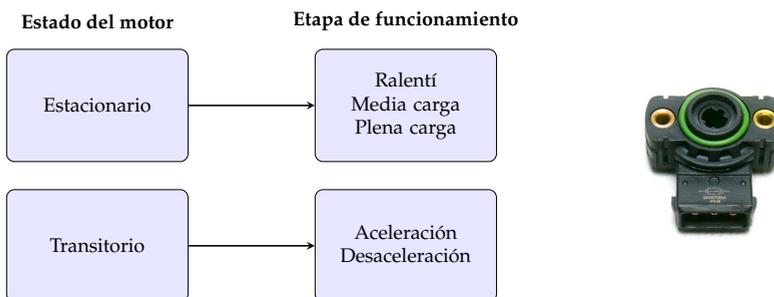


Figura 4.21. Estados del motor que determina un sensor TPS

La Figura 4.22 permite ilustrar el reconocimiento de cada etapa de funcionamiento sensor mediante la utilización de bandas.

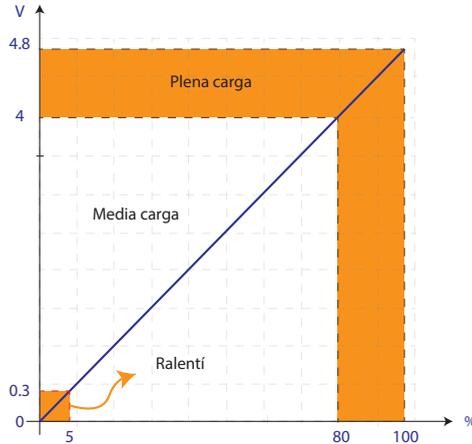


Figura 4.22. Gráfica de la relación voltaje-estado del motor

En la Figura 4.23 se puede apreciar los diferentes estadios de accionamiento del pedal del acelerador. Del punto 1 a 2 no se aprecia variación del pedal, lo cual se representa por una pendiente de cero. Del punto 2 a 3, debido al cambio producido en el pedal del acelerador se detecta una pendiente positiva. Entre los puntos 6 a 7 se identifica una desaceleración caracterizada por una pendiente negativa.

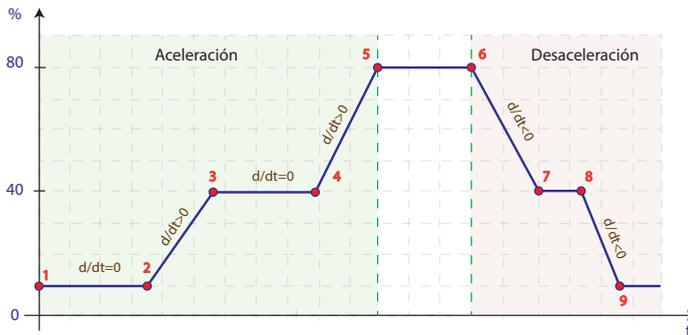


Figura 4.23. Gráfica del PID de porcentaje de apertura del acelerador

Como se mencionó anteriormente, el sensor TPS permite identificar aceleraciones y desaceleraciones, pero en compendio con el sensor MAP, como se visualiza en la Figura 4.24, se pueden realizar enriquecimientos en la mezcla y también disminuciones del tiempo de inyección al detectarse depresiones en el colector de admisión y desaceleraciones.

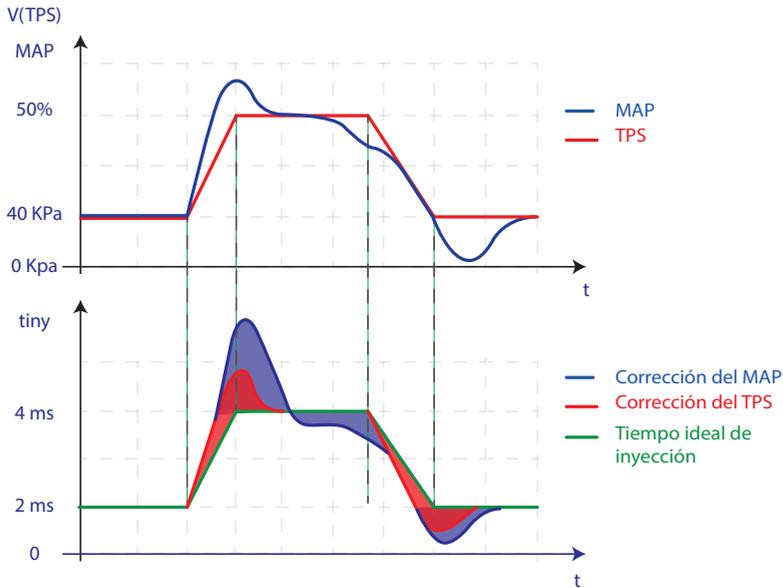


Figura 4.24. Gráfica de las correcciones en el tiempo de inyección realizada por el MAP y TPS

¿Por qué es mejor MAF y no el MAP?

- Con el sensor MAF se puede calcular instantáneamente el flujo de aire en el colector de admisión sin transformaciones ni sensores adicionales y en conjunto con el sensor O_2 corregir el tiempo de inyección del motor.
- Con el sensor MAP el conductor no se percatará de un aumento en la presión, el único síntoma en el motor será un aumento en las RPM y un leve incremento en el consumo de combustible.

En la Figura 4.25 se esquematiza cómo, los sensores MAP y TPS interactúan para proporcionar un determinado tiempo de inyección. Al presionar el pedal del acelerador sin carga se ocasiona una pendiente positiva en el PID del TPS, la carga en el sensor MAP aumenta y el tiempo de inyección crece de forma proporcional. En la segunda etapa el comportamiento es similar, en la última etapa al detectarse una pendiente negativa en el sensor TPS y depresión en el colector de admisión captada por el sensor MAP el tiempo de inyección disminuye hasta ser cero. Finalmente, se puede distinguir que al realizar el cambio de las marchas con el pedal del acelerador completamente presionado en marchas con poca reducción de transmisión el tiempo de inyección decrece y a medida que la relación aumenta el tiempo de inyección se incrementa.

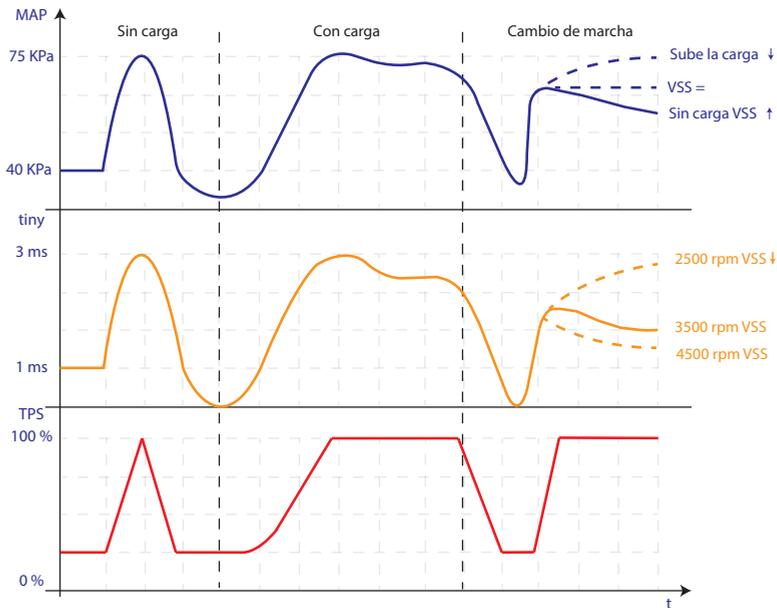


Figura 4.25. Gráfica del comportamiento del MAP, TPS y tiempo de inyección en un vehículo en movimiento.

4.6. Sensor de flujo másico de aire (MAF)

Tiene un hilo caliente que puede alcanzar una temperatura de 200 °C con el motor en temperatura de funcionamiento. Este sensor suele estar calefactado por una corriente variable, la resistencia del hilo varía por la circulación del aire aspirado por el motor. Como se vio en el capítulo 2, pueden encontrarse sensores MAF de tres tipos, hilo caliente, película caliente y Karman Vortex que generan corriente voltaje y frecuencia respectivamente. Una representación esquemática de su funcionamiento se puede ver en la Figura 4.26.

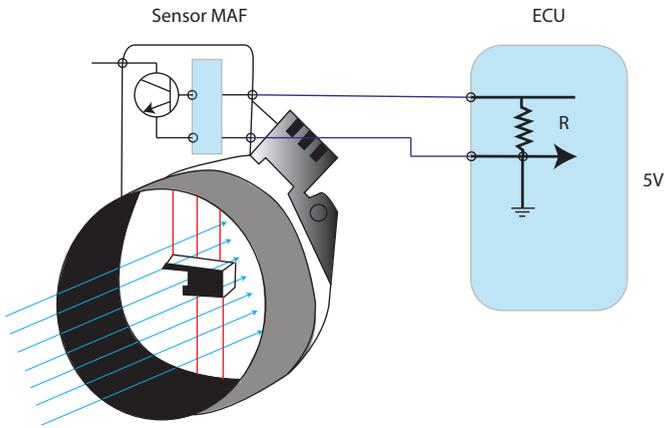


Figura 4.26. Imagen de un sensor MAF así como de su esquema electrónico

La elección entre sensores de flujo másico como el MAF y presión MAP depende de ideas en concepción del motor por parte de los fabricantes, pero si se evalúa la diferencia en su interpretación se puede inferir que el sensor MAP es capaz de detectar depresiones como se ve al final de la curva mostrada en la Figura 4.27, mientras en el sensor MAF se puede identificar esta característica con el aporte de información adicional de otros sensores.

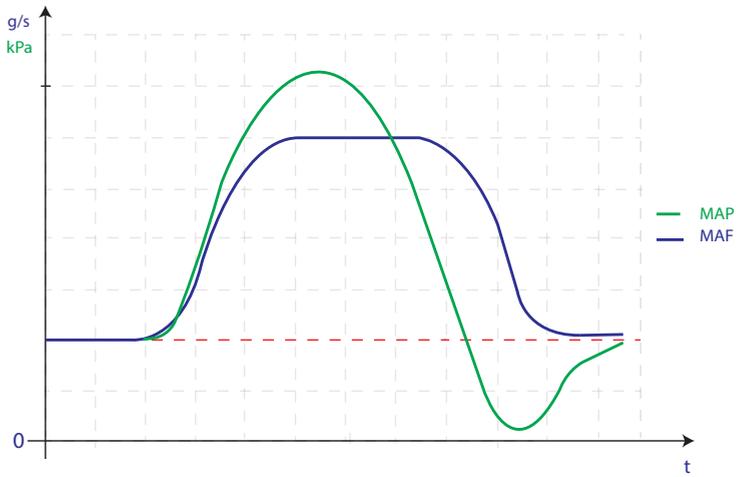


Figura 4.27. Diferencia entre sensor MAF y MAP

En sensores como el MAF se puede generar una resistencia en el cable debido al mal estado o deficiente contacto del mismo, por lo que la ECU puede generar lecturas erróneas de las señales emitidas por el sensor como se puede ver en la Figura 4.28.



Figura 4.28. Resistencia por cable en mal estado

Con poco aire se necesita poca intensidad, la ECU mide la intensidad y la transforma en flujo másico y mientras más alta es la intensidad más alto es el flujo másico como se puede observar en la Figura 4.29.

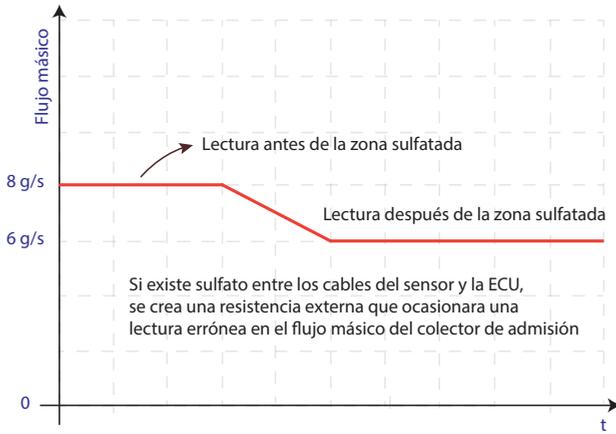


Figura 4.29. Representación de sulfato en los cables del sensor MAF

Al igual que el sensor TPS, el sensor MAF cuenta con bandas de verificación de funcionamiento que permiten identificar valores sobre el umbral de voltaje acostumbrado y debajo del límite estimado por el fabricante que se usan para identificar fallos, como se observa en la Figura 4.30.

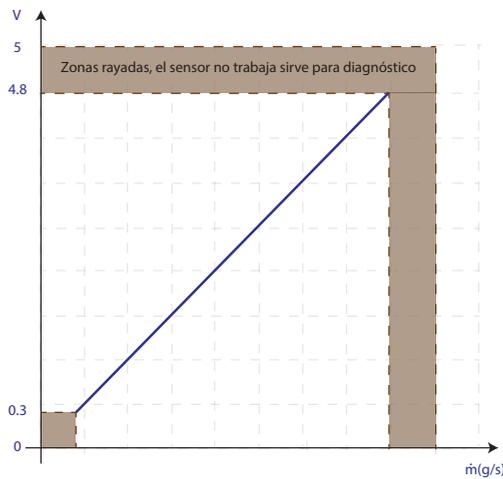


Figura 4.30. Diagrama de zona que trabaja sensor MAF

El sensor MAF de película caliente no trabaja en las zonas A, cuando la ECU detecta que la curva se encuentra en esta zona la unidad genera un código de falla como se presenta en la Figura 4.31.

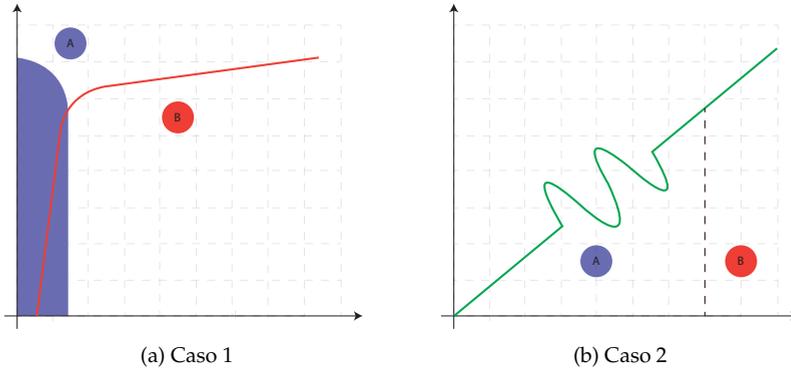


Figura 4.31. Diagrama de zona que no trabaja sensor MAF

4.7. Sensores de temperatura

Son sensores termo resistivos de tipo de coeficiente de temperatura negativa (NTC), cuya resistencia varía de una forma inversamente proporcional, porque al aumentar la temperatura su resistencia eléctrica disminuye [5].

4.7.1. Sensor de temperatura del refrigerante (ECT)

El sensor ECT mostrado en la Figura 4.32 adquiere la temperatura del motor a través del líquido refrigerante, esta información es procesada por la ECU para regular el tiempo de inyección y determinar las condiciones de arranque en frío o caliente del motor, para el proceso de dosificación de combustible. En caso de avería de este sensor, la ECU ingresa en modo de falla y mantiene activado el electroventilador, para evitar un posible sobrecalentamiento del motor, también ocasiona problemas en el arranque tanto con motor frío como caliente e incrementa el consumo de combustible.

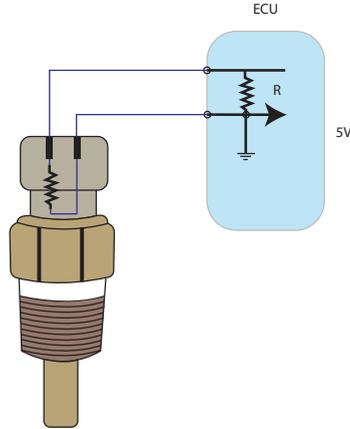


Figura 4.32. Imagen del sensor ECT y su esquema electrónico

ECT

- V_{ECT}
- $T_{coolant} \rightarrow ^\circ C \rightarrow ^\circ F$
- Arranque en frío
- Activación del ventilador

IAT

- V_{IAT}
- $T_{aire} \rightarrow ^\circ C \rightarrow ^\circ F$

Figura 4.33. Comparación entre sensores ECT e IAT

Cuando el motor tiene una temperatura de $20\text{ }^\circ\text{C}$ el voltaje es de 3 a 4 V y cuando el motor alcanza su temperatura normal de operación (de $85\text{ }^\circ\text{C}$ a $90\text{ }^\circ\text{C}$) el voltaje es de 0.5 a 0.8 V estos valores son referenciales deben ser consultados siempre en el manual del fabricante del vehículo.

4.7.2. Sensor de temperatura del aire (IAT)

Este dispositivo mide la temperatura del aire para optimizar la mezcla aire-combustible, este sensor interviene en una proporción pequeña en el cálculo del tiempo de inyección, pero un mal funcionamiento del sensor ocasionara problemas a largo plazo en el motor. Cuando se da-

ña este sensor se presentan inconvenientes como: elevadas emisiones de monóxido de carbono, problemas para arrancar el vehículo cuando está frío, consumo excesivo de combustible y una aceleración elevada. Algunos fabricantes de vehículos, cuando la unidad de control detecta una avería del sensor, ingresa en modo de falla, y asimila un valor teórico de temperatura del aire de $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ para obviar problemas durante el encendido.

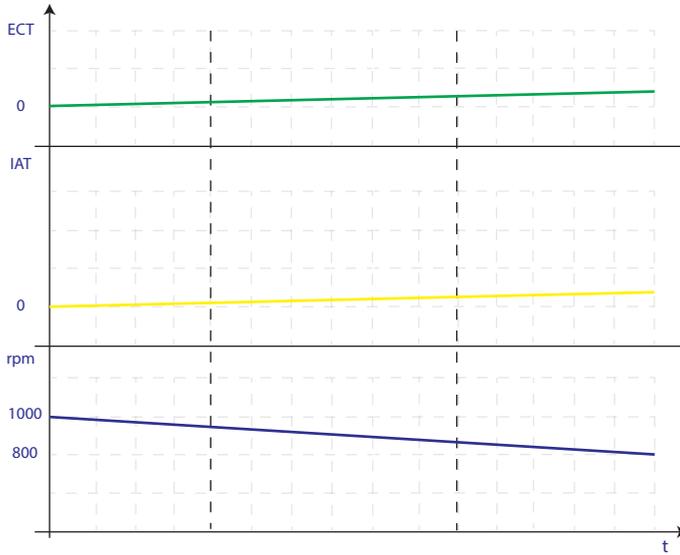
Arranque en frío

Todas las marcas tienen una condición para el arranque en frío [$T_{\text{ECT}} - T_{\text{IAT}} \leq 11\text{ }^{\circ}\text{C}$], esta restricción se usa para que la ECU enriquezca la mezcla generando un $\lambda < 1$ (mezcla rica) y contrarrestar el efecto Wall Film (película de pared). Por este efecto se aumentan las revoluciones del motor en ralentí, aumentando el calor \dot{Q} en cada ciclo, ganando T_{ECT} más rápido y disminuyendo las emisiones contaminantes de CO y HC. La ECU mantiene acelerado el motor hasta que se rompa la condición $T_{\text{ECT}} - T_{\text{IAT}} \leq 11\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras tanto la mezcla permanece enriquecida hasta que el motor alcance la temperatura de funcionamiento.

Efecto Wall Film

La gasolina tiende a pegarse en las paredes del colector de admisión y si el colector está por debajo de la temperatura ambiente el efecto es mayor, para contrarrestar el efecto se implementó el circuito de arranque en frío.

Como se observa en la Figura 4.34, un incremento en la temperatura del refrigerante produce un empobrecimiento de la mezcla, debido a que el motor alcanza su temperatura de funcionamiento alrededor de los $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, adicionalmente, se puede notar un establecimiento en las condiciones de operación.



λ	0.8	0.85	0.9	0.95	0.98	0.99
T (°C)	0	10	20	50	80	90

Figura 4.34. Gráfica de la relación entre el sensor ECT e IAT y las revoluciones del motor

En la Figura 4.35 se observa el ciclo de funcionamiento normal que tiene el motor en condiciones de ralentí. A medida que el motor gana temperatura producto de la transferencia de calor de los cilindros al líquido refrigerante, la temperatura del motor se incrementa, cabe destacar que la temperatura en el colector de aire aumentará por fenómenos de convección. Una vez que el ventilador se enciende la temperatura tiende a reducir, cabe mencionar que esta reducción es progresiva y depende del caudal que sea capaz de generar el ventilador sobre el radiador. Cuando finalmente la temperatura del radiador disminuye hasta cierto umbral el ventilador se apaga y no se volverá a encender hasta que la temperatura del líquido refrigerante que circula por el bloque motor alcance una temperatura definida.

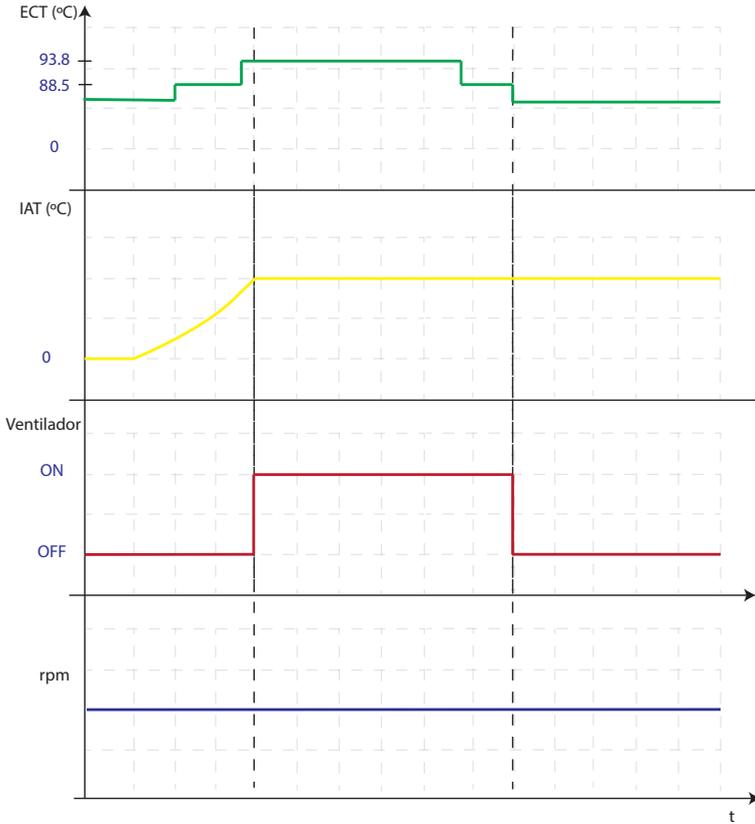


Figura 4.35. Gráfica de la relación entre el sensor ECT, IAT, RPM y el estado del ventilador.

4.8. Sensor de oxígeno

4.8.1. Interpretación de la unidad de control

Ejemplo: La computadora determina un tiempo de inyección de 2 ms en el sensor de oxígeno y se obtiene un voltaje superior a los 0.45 V se empobrece la mezcla como se observa en la Figura 4.36.

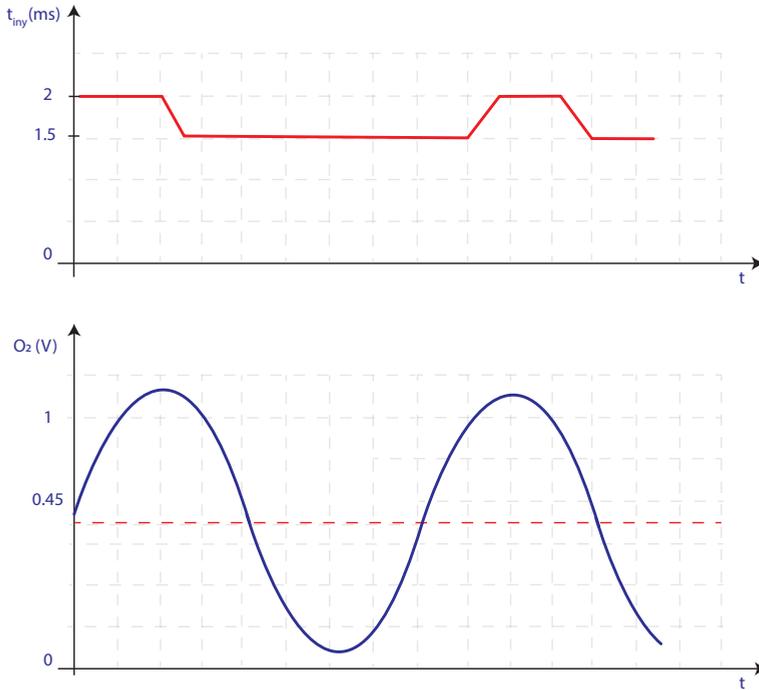


Figura 4.36. Gráfica de la corrección en el tiempo de inyección por parte del sensor de oxígeno.

El lazo de control se abre durante aceleraciones bruscas y en condiciones de desaceleración o compresión del motor, lo que provoca que el voltaje del sensor de oxígeno deje de oscilar y se estabilice en un valor característico de mezcla rica o pobre. En cambio, en estado estacionario, el lazo se cierra, permitiendo que el voltaje del sensor oscile de manera continua entre valores correspondientes a mezcla rica y pobre, regulando la inyección de combustible como se muestra en la Figura 4.37.

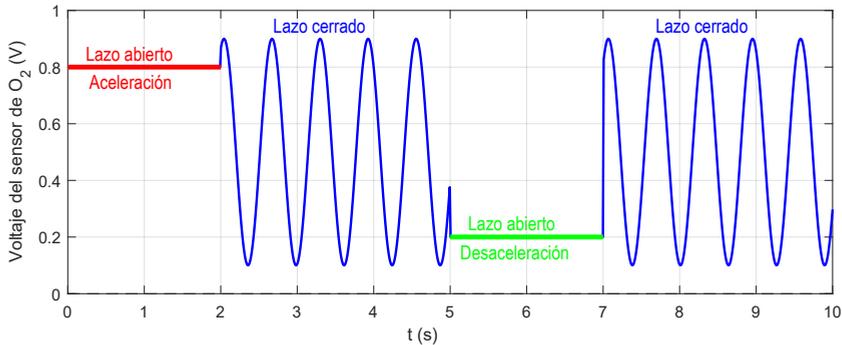


Figura 4.37. Comportamiento del voltaje del sensor de oxígeno en lazo cerrado y abierto

4.8.2. Ajustes de combustible

Los sistemas OBD II cuentan con un control adaptativo de corrección de combustible almacenado en la memoria interna de la unidad de control, para cumplir con este propósito existen los ajustes de corto plazo denominados STFT (Short Term Fuel Trim) y de largo plazo LTFT (Long Term Fuel Trim), ambos programas están diseñados para compensar las variaciones de funcionamiento en el motor y mantener la eficiencia del catalizador. Los ajustes de corto plazo se encuentran fluctuando continuamente basados en las mediciones del sensor de oxígeno, si el sensor de oxígeno mide una concentración pobre en los gases de escape el ajuste a corto plazo se cambiará para enriquecer la mezcla. Por ejemplo, si un motor opera a 3000 rpm con una carga del 40 %, el STFT puede aumentar la inyección de combustible en un 3 % para asegurar que el convertidor catalítico funcione adecuadamente. En modo de lazo cerrado, el sensor de oxígeno oscila constantemente, lo que permite que el STFT ajuste la mezcla aire-combustible de manera continua. Si en un momento dado se detecta una mezcla rica, el STFT reducirá la inyección de combustible para mantener la estequiometría [7]. El ajuste de largo plazo realiza correcciones permanentes, cuando el STFT supera un umbral de $\pm 10\%$ por un tiempo prolongado, el ajuste de corto plazo acepta un valor de 0. En la Figura 4.38, se presenta un ejemplo paso a paso de la modificación de cada parámetro de ajuste de combustible.

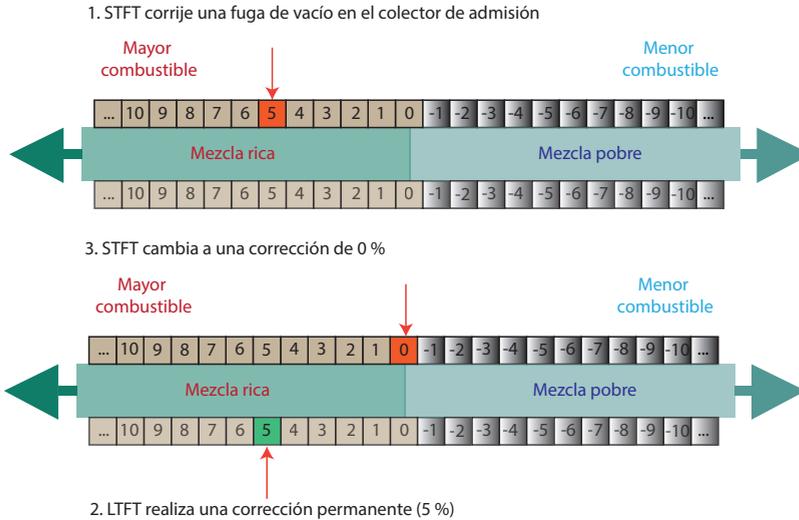


Figura 4.38. Ejemplo de una corrección de combustible

En la Figura 4.39 se presenta el flujo de datos del tiempo de inyección, sensor de oxígeno, ajustes de corto y largo plazo. El sensor de oxígeno siempre se encuentra fluctuando, como en el ejemplo anterior, al realizarse un ajuste en el corto plazo el tiempo de inyección se incrementa, posteriormente, al pasarse los ajustes de corto a largo plazo estos se ven reducidos, pero el tiempo de inyección queda modificado por este último parámetro.

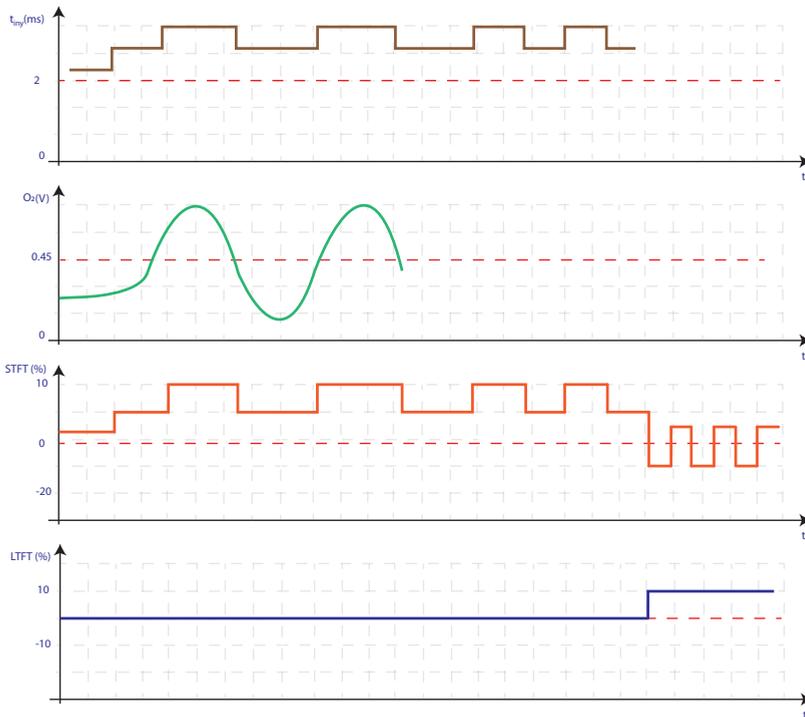


Figura 4.39. Gráfica de la relación entre el tiempo de inyección, O_2 , STFT y LTFT.

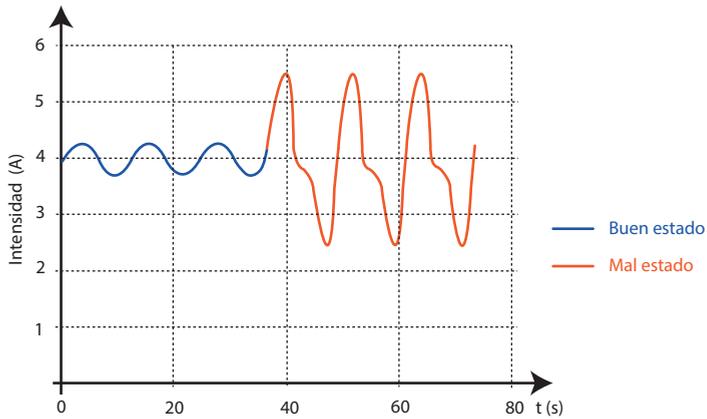
4.9. Comprobaciones de la bomba de combustible

1. Para comprobar el devanado de la bomba de combustible se mide la resistencia eléctrica que puede estar entre los 3 y 4 ohmios, mientras que los valores de presión pueden encontrarse entre los 35 y 60 psi con el motor apagado y la llave en posición ON. Con el motor encendido se hallan valores que oscilan entre 35-45 psi, que es la presión de trabajo.
2. Si el vehículo no enciende instantáneamente, puede deberse a una baja presión en la línea de combustible producto de una bomba defectuosa.

3. La presión residual debe conservarse, aunque el motor se apague, mientras la presión en la línea de combustible debe mantenerse constante al no existir retorno del combustible hacia el tanque.
4. La bomba termina su vida útil cuando sus escobillas ya no funcionan de forma correcta (ver Figura 4.41), la bomba de combustible, al encontrarse en condiciones normales, presenta una forma de onda en el osciloscopio, cuando esta presenta un defecto en uno de los contactos de las delgas se observa un pico elevado sobre el valor del amperaje.
5. Cuando el vehículo presenta pérdida de potencia del motor se puede sospechar de los filtros de combustible o de la bomba de gasolina.
6. Si se aplasta la cañería del regulador que está en riel, se esperan dos opciones:
 - a) Si la presión sube de manera excesiva, el problema es el regulador.
 - b) Si la presión no tiene variación el problema radica en la bomba de combustible.
7. En ralentí se obtiene una presión de 30-50 psi y en el regulador una presión similar, cuando se acelera debe subir la presión.
8. El voltaje de trabajo no varía de 4.1 V, aproximadamente, como se observa en la Figura 4.40, si existe una gran variación de voltaje se debe cambiar la bomba ya que se encuentra en mal estado.



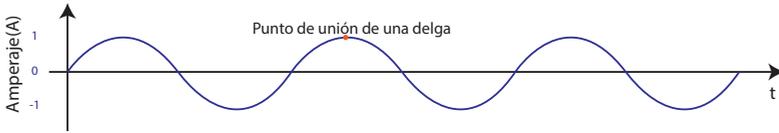
(a) Rotor eléctrico



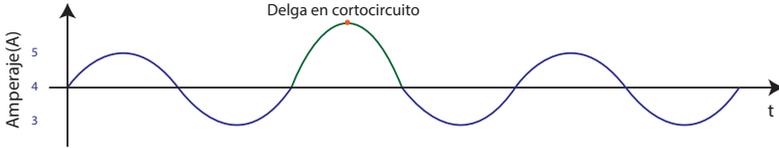
(b) Forma de la onda de corriente

Figura 4.40. Bomba de combustible

Otra forma de verificar el estado de las delgas en la bomba de combustible es verificar que cada uno de sus picos y valles se encuentre en un mismo nivel al ser medidos con un amperímetro, en caso de presentarse un pico considerablemente diferente con el resto se podría inferir un defecto de este elemento.



(a) Gráfica correspondiente al comportamiento normal de las delgas de una bomba



(b) Gráfica correspondiente a las delgas de una bomba en cortocircuito

Figura 4.41. Gráficas del comportamiento de las delgas de una bomba de combustible

Bibliografía

- [1] J. Turner, *Automotive Sensors*, Momentum Press, New York, 2009.
- [2] "Sensor de temperatura del refrigerante PTC," disponible en: <http://josemaco.wordpress.com/2010/09/25/sensor-de-temperatura-del-refrigerante-ptc/>. [Accedido: 06-ago-2024].
- [3] J. A. Ros Marin and O. Barrera Doblado, *Sistemas eléctricos y de seguridad y confortabilidad*, 2nd ed., Paraninfo, 2008.
- [4] "VRT intake air temp sensor," disponible en: <http://forums.vwvortex.com/showthread.php?3818595-vrt-intake-air-temp-sensor>. [Accedido: 06-ago-2024].
- [5] M. Rodríguez, J. C. *Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor de ciclo Otto (MF0133₂)*, IC Editorial, 2012. ProQuest Ebook Central.
- [6] J. Pardiñas, R. Feijó, *Sistemas auxiliares del motor*, Editex, 2018.
- [7] T. Martin, *How to Use Automotive Diagnostic Scanners*, MotorBooks International, USA, 2007.