



Universidad del Azuay
Facultad de Ciencia y Tecnología
Escuela de Ingeniería Electrónica

**“Control del Sistema de Inyección de
un Motor a Gasolina”.**

Trabajo de Graduación previo
a la obtención del Título de
Ingenieros Electrónicos.

Autores:

Yandri Loayza Romero.
y
Raúl Abril Rivera.

Director:

Ingeniero Leonel Pérez Rodríguez.

Cuenca-Ecuador
2005

Agradecimientos.

Les damos las gracias al Ingeniero Leonel Perez R. y a todas las personas que han colaborado con sus ideas y sugerencias para la realización de este proyecto.

Dedicatoria.

Este proyecto va dedicado a nuestros padres, quienes en los momentos difíciles, cuando hizo falta una mano amiga para guiarnos, siempre estuvieron presentes para apoyarnos y darnos un consejo que servía de sostén para seguir luchando y poder terminar la carrera de Ingeniería.

Capítulo 1. Inyección Electrónica de Combustible.

- 1.1 Ventajas de la Inyección de combustible.
- 1.2 Motor de Gasolina.
 - 1er tiempo: Admisión.
 - 2do tiempo: Compresión y encendido.
 - 3ro tiempo: Combustión y trabajo.
 - 4to tiempo: Escape.
- 1.3 Clasificación de los Sistemas de Inyección.
 - 1.3.1 Por el número de Inyectores.
 - 1.3.2 Por el sincronismo de la Inyección.
 - 1.3.3 Por la posición del Inyector.
 - 1.3.4 Por la regulación del caudal.
- 1.4 Esquema General del Equipo Mono-Motronic de Volkswagen.
- 1.5 Funcionamiento del Sistema de Inyección Electrónica Mono-Motronic en Motores a Gasolina.
 - 1.5.1 Circuito de admisión de aire.
 - 1.5.1.1 Caudalímetro.
 - 1.5.1.2 Captador de Ángulo de la mariposa del acelerador.
 - 1.5.1.3 Corrector de Ralentí.
 - 1.5.1.4 Colector de admisión.
 - 1.5.2 Circuito de alimentación de Gasolina.
 - 1.5.2.1 Bomba de Gasolina.
 - 1.5.2.2 Regulador de presión.
 - 1.5.2.3 Electroválvula de Inyección.
 - 1.5.3 Circuito de Control.
 - 1.5.3.1 Unidad Electrónica de Control (ECU).
 - 1.5.4 Sonda Lambda (Sensor de Oxígeno).
 - 1.5.5 Catalizador.
 - 1.5.6 Sensor de Temperatura del Motor.
- 1.6 Mezcla.
 - 1.6.1 Mezcla Rica.
 - 1.6.2 Mezcla Pobre.
- 1.7 Sistema de Encendido.
 - 1.7.1 Encendido Electrónico Estático.

Capítulo 2. Sistemas de Control.

- 2.1 Definiciones y Conceptos.
 - 2.1.1 Sistema.
 - 2.1.2 Sistema Estático.
 - 2.1.3 Sistema dinámico.
 - 2.1.4 Sistema de Control.
 - 2.1.5 Estabilidad.
 - 2.1.6 Estabilidad marginal.
 - 2.1.7 Inestabilidad.
 - 2.1.8 Modelado.

- 2.1.8.1 Método Analítico.
- 2.1.8.2 Método Experimental
- 2.2 Elementos del Sistema de Control.
 - Planta.
 - Entrada.
 - Salida.
 - Referencia.
 - Sensores.
 - Controlador.
 - Actuador.
 - Perturbación.
- 2.3 Variables Consideradas.
 - 2.3.1 Variables de entrada
 - 2.3.2 Variables de control
 - 2.3.3 Variables de salida
 - 2.3.4 Perturbaciones
- 2.4 Objetivos del Control.
- 2.5 Estrategia de Control.
 - 2.5.1 Sistemas de Control en Lazo Abierto.
 - 2.5.2 Sistemas de Control en Lazo Cerrado.
- 2.6 Control Directo e Indirecto.
 - 2.6.1 Control Directo.
 - 2.6.2 Control Indirecto.
- 2.7 Tipos de Controladores.
 - 2.7.1 Control Proporcional.
 - 2.7.2 Control Proporcional Derivativo.
 - 2.7.3 Control Proporcional Integral.
 - 2.7.4 Control Proporcional Integral Derivativo.
- 2.8 Propuesta de Control para el Sistema de Inyección Electrónica Monopunto.
 - 2.8.1 Introducción del Combustible en el Cilindro.
 - 2.8.1.1 Vaporización.
 - 2.8.1.2 Transporte.
 - 2.8.2 Dinámica del Combustible.
- 2.9 Variable de control.
- 2.10 Modelado Matemático.
 - Modelo del Combustible.
 - 2.10.1 Inyección.
 - 2.10.2 Evolución en el Colector.
- 2.11 Análisis del Modelo del Sistema.
 - 2.11.1 Análisis de la Respuesta del Sistema.
 - 2.11.2 Introducción del Controlador en el Sistema.
 - 2.11.3 Análisis del Sistema introduciendo una Perturbación.
 - 2.11.4 Análisis de Polos y Ceros.
 - 2.11.4.1 Polos.
 - 2.11.4.2 Ceros.

Capítulo 3. Controller Area Network (CAN).

- 3.1 CAN.
- 3.2 La red CAN y el Modelo OSI.
- 3.3 Conceptos del Bus CAN.
 - 3.3.1 Capa Física.
 - 3.3.2 Capa de Enlace.
 - 3.3.3 Implementación de CAN.
 - 3.3.4 Especificación CAN 2.0A y CAN 2.0B.
- 3.4 Mensajes y Tipos de Tramas.
 - 3.4.1 Trama de Datos.
 - 3.4.1.1 Inicio de Trama.
 - 3.4.1.2 Campo de Arbitraje.
 - 3.4.1.3 Campo de Control.
 - 3.4.1.4 Campo de Datos.
 - 3.4.1.5 Campo CRC.
 - 3.4.1.6 Campo de Reconocimiento ACK.
 - 3.4.1.7 Fin de Trama.
 - 3.4.2 Trama de interrogación Remota.
 - 3.4.3 Tramas de Error.
 - 3.4.4 Trama de Sobrecarga.
 - 3.4.5 Espacio Inter-tramas.
- 3.5 Codificación.
- 3.6 Tipos de Errores Detectados.
 - 3.6.1 CRC.
 - 3.6.2 ACK.
 - 3.6.3 Error de Forma.
 - 3.6.4 Error de Bit.
- 3.7 Limitación de Fallas.
 - 3.7.1 Error Activo.
 - 3.7.2 Error Pasivo.
 - 3.7.3 Bus Apagado.
- 3.8 División del Tiempo del Bit.
- 3.9 Ubicación del punto de Muestreo.
- 3.10 Propuesta de un Modelo General para la Red CAN de un Sistema Controlado.
 - 3.10.1 Estandarización.
 - 3.10.2 Modelo de la Red CAN de Alta y Baja Velocidad.
- 3.11 Productos Existentes.

Conclusiones Generales.

Anexo A: Abreviaturas.

Anexo B: Datos Técnicos de Motor.

Bibliografía.

Objetivos:

Objetivos Generales.

- Desarrollar la modelación de un Subsistema de Control de Inyección Electrónica Monopunto empleando Técnicas de Control Moderno.
- Estudio de una Propuesta para implementar una Red tipo CAN para la interconexión de los elementos del Sistema Controlado.

Objetivos Específicos.

- Estudio de las variables a medir y controlar dentro del Subsistema de Inyección Monopunto.
- Encontrar la Función Transferencial del Sistema de Inyección Monopunto.
- Simular la Respuesta del Controlador ante perturbaciones externas.
- Proponer un modelo general para la red CAN dentro de un automóvil.

Abril Rivera Raúl Alfredo

Loayza Romero Yandri Danilo

“Control del Sistema de Inyección de un Motor a Gasolina”

Director: Ing. Leonel Pérez Rodríguez

Cuenca, 11 de Enero de 2006

“Control del Sistema de Inyección de un Motor a Gasolina”

Capítulo 1

Inyección Electrónica de Combustible

Introducción.

En los motores de gasolina, la mezcla se prepara utilizando un carburador o un equipo de inyección. Hasta ahora, el carburador era el medio más usual de preparación de mezcla.

Desde hace algunos años, sin embargo, aumentó la tendencia a preparar la mezcla por medio de la inyección de combustible en el colector de admisión. Esta tendencia se explica por las ventajas que supone la inyección de combustible en relación con las exigencias de potencia, consumo, comportamiento de marcha, así como de limitación de elementos contaminantes en los gases de escape. Las razones de estas ventajas residen en el hecho de que la inyección permite una dosificación muy precisa del combustible en función de los estados de marcha y de carga del motor; teniendo en cuenta así mismo el medio ambiente, controlando la dosificación de tal forma que el contenido de elementos nocivos en los gases de escape sea mínimo;

además, asignando una electro válvula o inyector en los cilindros se consigue una mejor distribución de la mezcla, optimizando al máximo el consumo de combustible.

La supresión del carburador también permite dar forma a los conductos de admisión, permitiendo corrientes aerodinámicamente favorables, mejorando el llenado de los cilindros, con lo cual, favorecemos el par motor y la potencia, además de solucionar los conocidos problemas de la carburación, como pueden ser la escarcha, las inercias de la gasolina, etc.

Puesto que las normas de Anticontaminación dictadas en la mayoría de Países desarrollados a nivel mundial no admiten la presencia de carburadores en aquellos motores de cilindraje superior al litro, los fabricantes adoptaron una solución que consiste en incorporar en sus motores Sistemas de Inyección Electrónica. Este tipo de Inyección mejora en mucho las condiciones en las que se realiza el quemado de la mezcla aire combustible y por lo mismo emite gases menos contaminantes de lo que haría un carburador.

Los sistemas de Inyección electrónica Monopunto disponen de los mismos elementos que los multipunto, pero todo ello formando parte de una unidad muy compacta en donde se agrupan todos los elementos, y los cuatro o seis inyectores propios de los Multipunto han sido sustituidos por un solo inyector capaz de suministrar todo el combustible que requieren todos los cilindros, con un solo chorro.

La casa Alemana Bosch estudió y puso a punto un Sistema de Inyección Monopunto mucho más simplificado que los Sistemas Multipunto, con cuyo diseño se pretendía abaratar los fuertes costos que se incrementaban en los equipos de Inyección Multipunto; fruto de este proyecto fue desarrollado un Sistema Monopunto al que lo bautizaron con el nombre de Mono-Jetronic.

El Mono-Jetronic es la base de una serie de equipos posteriores que fueron mejorados en sus prestaciones hasta conseguir integrar en ellos los sistemas de Anticontaminación, con su control de los gases a través de un catalizador e incluso el control del encendido en general. Esta nueva versión recibió el nombre de Mono-Motronic y constituye uno de los Equipos de Inyección Monopunto más evolucionados del momento, y es este sistema el que será objeto de nuestro estudio, el mismo que es utilizado por la marca Volkswagen para algunos de sus vehículos.

1.1 Ventajas de la Inyección de Combustible.

Menor consumo de combustible. El registro de todos los datos operativos necesarios para el servicio del motor (por ejemplo, número de revoluciones, carga, temperatura posición de la mariposa etc.) permite una adaptación exacta a estados operativos estacionarios y no estacionarios; con ello se asegura que se dosifique la cantidad exacta de combustible que necesita el motor en cada momento bajo las correspondientes condiciones de servicio.

Mayor Potencia. La utilización de los sistemas de inyección permite optimizar la forma de los colectores de admisión con el consiguiente mejor llenado de los cilindros. El resultado se traduce en una mayor potencia específica y un aumento del par motor.

Aceleraciones sin retardo. Los sistemas de inyección electrónica se adaptan a las variables condiciones de funcionamiento casi sin demora; esto rige tanto para los sistemas de inyección individual (multipunto) como también para los de inyección centralizada (monopunto); en la inyección individual se inyecta el combustible directamente delante de las válvulas de admisión del motor, evitándose así ampliamente una humectación de la pared del conducto de admisión. Debido al transporte de la mezcla por el tubo de admisión en la inyección centralizada, es necesario considerar la formación de la película de combustible en la pared del conducto y su eliminación en los procesos no estacionarios.

Gases de Escape menos contaminantes. La concentración de los elementos contaminantes en los gases de escape depende directamente de la proporción aire/gasolina. Para reducir la emisión de contaminantes es necesario preparar una mezcla de una determinada proporción. Los sistemas de inyección permiten ajustar en todo momento la cantidad necesaria de combustible respecto a la cantidad de aire que entra en el motor.

Arranque en frío y fase de calentamiento. Mediante la exacta dosificación del combustible en función de la temperatura del motor y del régimen de arranque, se consiguen tiempos de arranque más breves y una aceleración más rápida y segura desde el ralentí.

1.2 Motor de Gasolina.

Modo de Actuación.

El motor de gasolina Otto, es un motor de combustión por encendido externo que transforma la energía contenida en el combustible en energía cinética. En el motor Otto de 4 tiempos y gasolina los sistemas de preparación de la mezcla aire-combustible (se dice combustible porque puede ser gasolina o gas) forman esta fuera de la cámara de combustión, la mezcla aspirada por el pistón en su descenso penetra en la cámara de combustión, aquí es comprimida durante el movimiento ascendente del pistón, la mezcla se inflama mediante una señal enviada a la bujía que es la encargada de generar la chispa. El calor liberado en la combustión aumenta la presión en el cilindro y en el pistón se mueve otra vez hacia abajo entregando su

esfuerzo al cigüeñal, después de cada combustión los gases quemados son expulsados del cilindro y se aspira mezcla fresca de aire-combustible; en los motores del automóvil, este intercambio gaseoso tiene lugar predominante según el principio de los 4 tiempos, un ciclo de trabajo necesita para ello dos vueltas del cigüeñal. Los pistones trabajan de 2 en 2 para mantener constante el torque que se entrega al cigüeñal.

Proceso de 4 Tiempos. El intercambio gaseoso es controlado por las correspondientes válvulas, las cuales abren o cierran los conductos de admisión y de escape del cilindro.

1er tiempo: Admisión:

- Válvula de admisión: abierta
- Válvula de escape: cerrada.
- Movimiento del pistón: descendente.
- Combustión: ninguna.

2do tiempo: Compresión y encendido.

- Válvula de admisión: cerrada.
- Válvula de escape: cerrada.
- Movimiento del pistón: ascendente.
- Combustión: fase de inflamación.

3ro tiempo: Combustión y trabajo.

- Válvula de admisión: cerrada.
- Válvula de escape: cerrada.
- Movimiento del pistón: descendente.
- Combustión: combustión.

4to tiempo: Escape.

- Válvula de admisión: cerrada.
- Válvula de escape: abierta.
- Movimiento del pistón: ascendente.
- Combustión: ninguna.

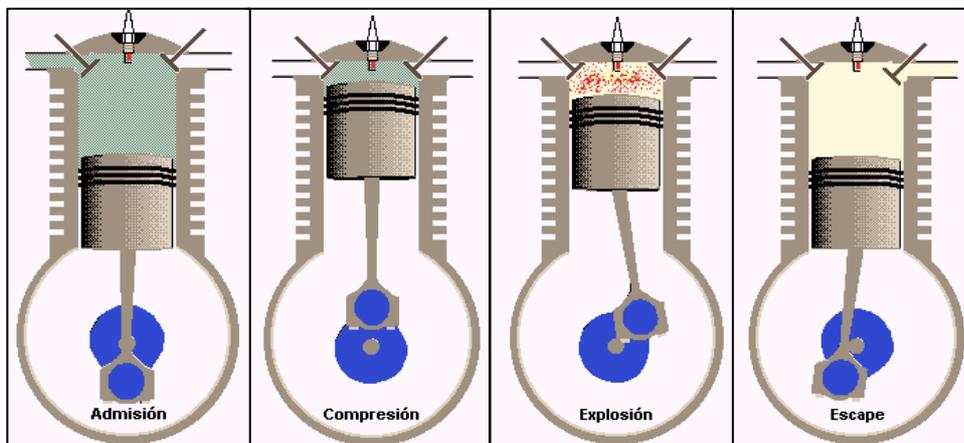


Figura 1.1: Los cuatro tiempos del motor.

1.3 Clasificación de los Sistemas de Inyección.

Los sistemas de Inyección se pueden clasificar de la siguiente forma:

1.3.1 Por el número de Inyectores:

- **Monopunto.** Posee un solo Inyector central para todos los cilindros.

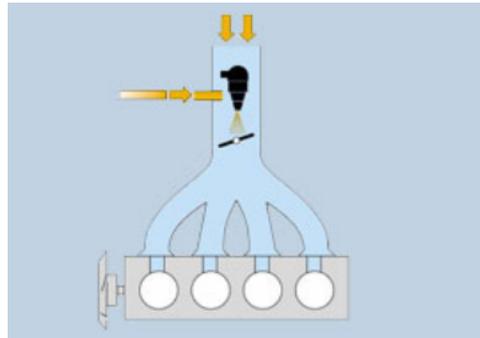


Figura 1. 2: Sistema de Inyección Monopunto.

- **Multipunto.** Posee un inyector por cada cilindro. Los inyectores se encuentran alojados en una regleta, que es la encargada de distribuir el combustible presurizado a los distintos inyectores.

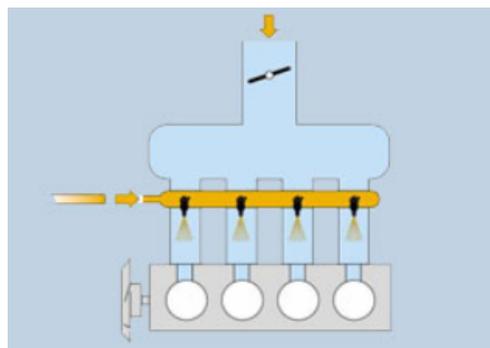


Figura 1. 3: Sistema de Inyección Multipunto.

1.3.2 Por el sincronismo de la Inyección.

- **Simultanea.** Todos los inyectores se abren a la vez.
- **Secuencial.** Cada inyector se abre en el momento óptimo que corresponde a cada cilindro respectivo, algo antes de que comience a abrir la válvula de admisión.

1.3.3 Por la posición del Inyector.

- **Directa.** Se encuentra dentro de la cámara de combustión, requiere presiones muy altas de más de 100 bar.
- **Indirecta.** Se encuentra ubicado en el Colector de admisión.

1.3.4 Por la regulación del caudal.

- **Continua.** El inyector produce un caudal variable continuo, regulado por tensión o por presión.
- **Discontinua.** El inyector recibe un tren de pulsos de una determinada duración, por lo que esta totalmente abierto o totalmente cerrado.

1.4 Esquema General del Equipo Mono-Motronic de Volkswagen.

El sistema de Inyección Electrónica Monopunto utilizado por la marca Volkswagen para automóviles de mediana y baja potencia es el sistema Mono-Motronic de la casa Bosch, el cual es el más evolucionado de los existentes, que integra en una misma ECU (Electronic Control Unit, Unidad Electrónica de Control) el control de la inyección y el encendido. Se trata de un sistema de inyección intermitente que trabaja a baja presión, dispone de sonda lambda y de catalizador y

es el sistema aplicado a las diferentes modelos como el Polo, con motores de 1,3 y 1,6 litros y también a los modelos Golf equipados con los motores más modestos de la marca.

Los tres elementos fundamentales que intervienen con mayor protagonismo en este equipo los tenemos representados en el siguiente gráfico:

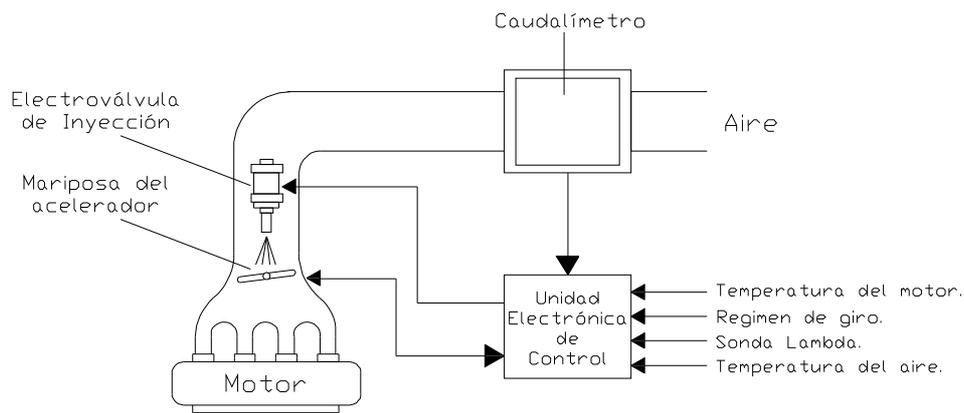


Figura 1.4: Esquema general de un equipo de Inyección de gasolina Mono-Motronic.

La **Electro válvula de Inyección** es la encargada de alimentar todos los cilindros del motor, como en el caso de un carburador esta válvula de encuentra situada en la parte central del colector de admisión y en una posición anterior a la válvula de mariposa del acelerador.

El sistema Mono-Motronic reúne una sola **Unidad Electrónica de Control** (ECU) toda la electrónica del control del motor que realiza todas las intervenciones de ajuste deseadas en el motor de gasolina. Además determina la cantidad de combustible a inyectar, la cual como en todos los casos de Inyección Electrónica, recibe información desde varios puntos como son:

- Caudalímetro.
- Sonda Lambda.
- Temperatura del motor.
- Régimen de giro del motor.
- Posición de la mariposa del acelerador etc.

El **Caudalímetro** permite conocer la cantidad de aire que penetra en el tubo de admisión. La cantidad de carburante inyectado depende del tiempo de abertura del inyector, manejado por la ECU en función del caudal de aire medido por el caudalímetro y de las condiciones de utilización del motor.

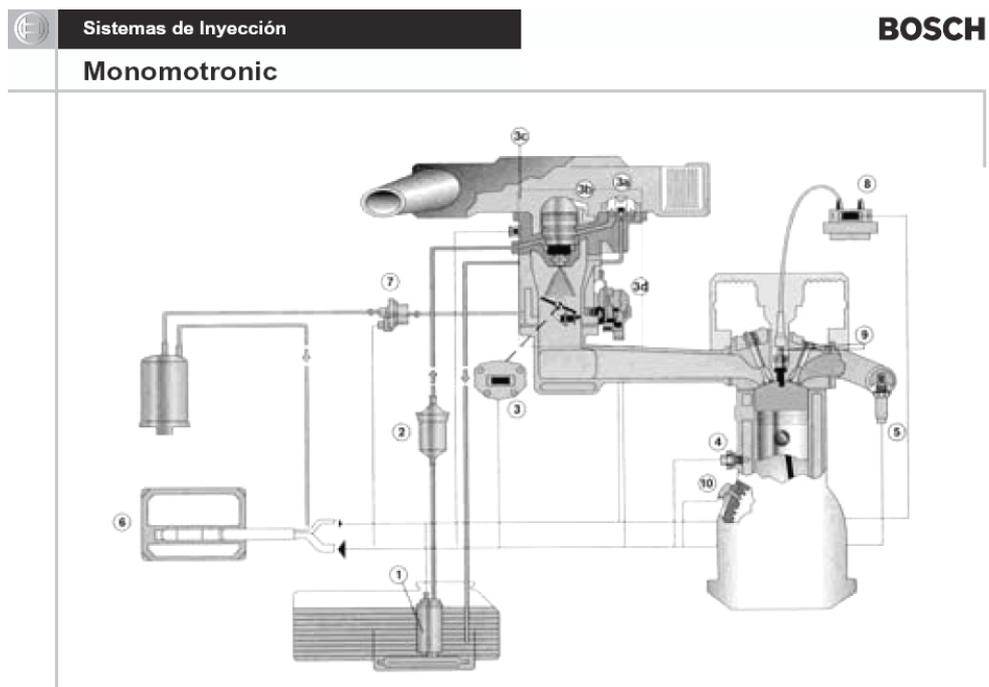


Figura 1.5: Esquema general del Sistema de Inyección Mono-Motronic.

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. Bomba de combustible. | 5. Sonda lambda. |
| 2. Filtro de combustible. | 6. ECU. |
| 3. Potenciómetro de la mariposa. | 7. Válvula de ventilación del tanque. |
| 3a Regulador de presión. | 8. Bobina de encendido. |
| 3b Válvula de inyección. | 9. Bujía de encendido. |
| 3c Sensor de temperatura del aire. | 10. Sensor de revolución. |
| 4. Sensor de temperatura. | |

1.5 Funcionamiento del Sistema de Inyección Electrónica Mono-Motronic en Motores a Gasolina.

En los Sistemas Monopunto de Inyección de gasolina, el caudal de aire sigue un camino independiente al seguido por la gasolina, de modo que la producción aportada por ambos elementos fundamentales de la mezcla (aire-gasolina), actúa por canales diferentes.

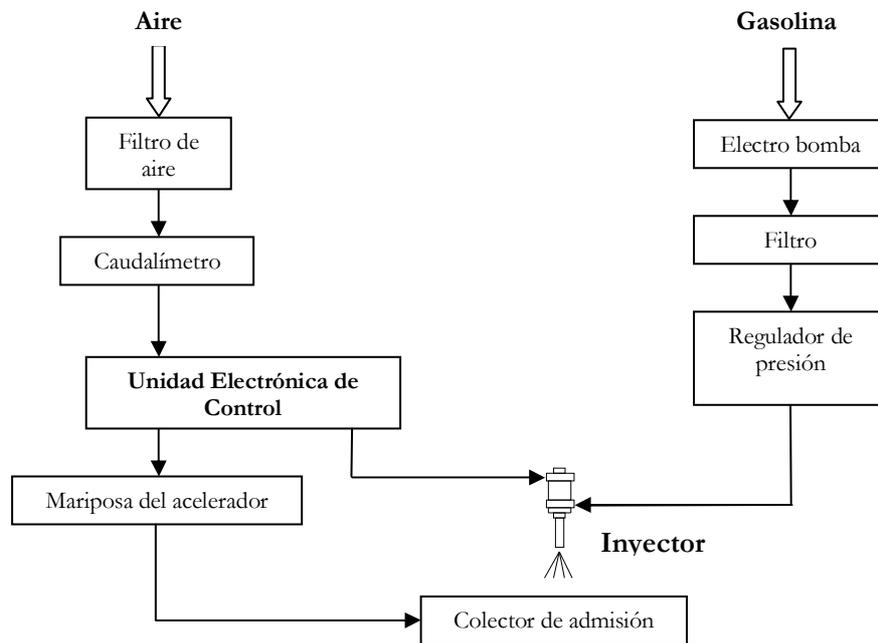


Figura 1.6: Diagrama de bloques del funcionamiento de un Sistema Mono-Motronic de Inyección de gasolina.

1.5.1 Circuito de admisión de aire.

Este circuito se compone de los siguientes elementos:

- Filtro de aire.
- Caudalímetro.
- Potenciómetro de mariposa del acelerador.

- Corrector de ralentí.
- Colector de admisión.

1.5.1.1 Caudalímetro.

Sirve para realizar el control del volumen de aire penetrado en el colector de admisión, hace unos pocos años se utilizaba un Caudalímetro llamado mariposa-sonda, pero presentaba algunos problemas como pérdida de carga que se produce en todo el conducto de admisión de aire, el aire no podía circular libremente, debido a que tiene que efectuar el empuje de una compuerta relativamente pesada, como es la compuerta de un caudalímetro mariposa-sonda.

Otro de los sistemas de control de volumen de aire utilizados en los Sistemas de Inyección Electrónica, es un Caudalímetro llamado de Hilo caliente, y presenta ventajas como:

- Medición instantánea de la cantidad de aire penetrado.
- La temperatura del aire aspirado se registra mediante un sensor de temperatura integrado en el medidor de masa de aire de hilo caliente.
- La medición de la densidad del aire, según la altura sobre el nivel del mar, se corrige automáticamente. El aire frío es siempre más denso que el aire caliente, y como la determinación de su masa se efectúa por su temperatura, existe una relación de enriquecimiento cuando el aire es más frío, lo que compensa esta situación.

El circuito consta esencialmente de una conexión en puente y de un amplificador.

El Caudalímetro de hilo caliente consiste en la colocación de un hilo fino de platino de 70 μ m de espesor, por el que circula una corriente eléctrica constante, el paso de esta corriente mantiene caliente el hilo, produciéndose de esta manera un desprendimiento de calor que es equivalente a una resistencia eléctrica determinada.

Cuando el hilo es atravesado por una masa de aire que entra hacia el conducto de admisión, esta masa refrigera el hilo, de modo que existen variaciones en su resistencia eléctrica, las mismas que son captadas por la ECU, la cual puede saber de esta manera la cantidad de aire que corresponde a cada estado de resistencia eléctrica, produciéndose de esta forma una señal capaz de ser tratada por la ECU, de modo que proporcione la base de la actuación para conseguir una dosificación mas precisa en todas las situaciones de funcionamiento del motor.

El hilo caliente forma parte de un circuito de puente mostrado en la figura 1.7, cuya tensión en bornes es regulada a cero variando la corriente de calentamiento que lo recorre, si aumenta el caudal de aire el hilo se enfría, y por tanto disminuye su resistencia, lo que provoca un desequilibrio de la tensión en bornes del puente, que es corregida inmediatamente por el circuito electrónico, elevando la corriente de calefacción del hilo, así pues el valor de esta corriente representa la medida de la masa de aire aspirada por el motor.

La temperatura inicial del hilo es aproximadamente 100 °C, dada la escasa masa del hilo caliente, las variaciones de temperatura se corrigen en forma muy rápida, lo que permite conseguir constantes de tiempo de pocos milisegundos, es decir que la

capacidad de respuesta en la medida para variaciones del caudal del aire aspirado es casi instantánea. La corriente de paso a través del hilo caliente se mide como caída de tensión en la resistencia de precisión, cuyo valor ohmico junto con el hilo caliente esta debidamente calculado para que la corriente de caldeo oscile entre valores de 500 a 1200 mA, en función del caudal de aire.

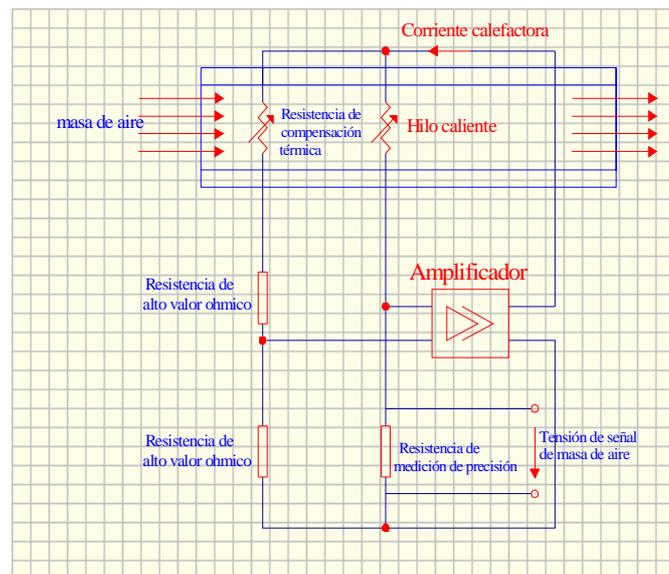


Figura 1.7: Circuito del medidor de la masa de aire por hilo caliente.

El hilo caliente y la resistencia de precisión están situados en una de las ramas del puente eléctrico, mientras en la otra se encuentra la resistencia de compensación térmica, mediante la cual se compensan las variaciones de temperatura del aire aspirado. Un segundo después de parar el motor, la ECU envía una corriente al filamento durante unos instantes, que le hace alcanzar una temperatura aproximadamente de 1000 °C, que quema los residuos carbónicos depositados en el hilo, que podrían alterar su corriente de mantenimiento.

1.5.1.2 Captador de Ángulo de la mariposa del acelerador.

Esta situado en el exterior del cuerpo de inyección y esta comandada por una leva fijada en el eje de la mariposa.

El captador es un potenciómetro alimentado por la central electrónica a 5 Volts que se utiliza como referencia. La variación de posición de mariposa hace variar la posición de la leva del captador, del cursor del potenciómetro y así la resistencia del circuito. Cuando la mariposa de aceleración se encuentra en su posición de reposo (ralentí), la cantidad de tensión que se envía como señal será de unas cuantas décimas de voltio y esta señal se irá incrementando paulatinamente, de acuerdo al incremento en el movimiento de la mariposa, hasta llegar al tope de la escala, la cual nos dará un valor cercano a los 5 Voltios de la referencia.

1. Contacto de plena carga.
2. Leva de mando.
3. Eje de la mariposa.
4. Contacto de ralentí.

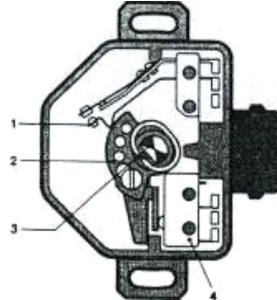


Figura 1.8: Mariposa del acelerador.

La información que se envía a la ECU, se toma del interruptor posicionado en el eje de la mariposa de gases, en el cual su leva de mando acciona los contactos 1 y 4 para las posiciones de plena carga y ralentí, respectivamente. Las señales enviadas a la ECU en función de estas posiciones determinan que esta corrija el caudal inyectado en función de la posición que toma la mariposa de gases; resulta así que el

caudal de inyección determinado por las señales enviadas por el caudalímetro de aire y el régimen de giro del motor pueden ser corregidos también en función de la carga. La señal en Volts, existentes entre los bordes de la resistencia del potenciómetro llega a la ECU y determina así la abertura de la mariposa. La ECU calcula la demanda de combustible a partir de 15 posiciones diferentes de la mariposa y 15 regímenes diferentes del motor almacenados en su memoria.

1.5.1.3 Corrector de Ralentí.

En todas las fases de funcionamiento, un motor paso a paso controla la regulación del régimen del ralentí, en régimen de ralentí el motor paso a paso actúa sobre un caudal de aire en paralelo con la mariposa, realizando un desplazamiento horizontal graduando la cantidad de aire que va directamente a los conductos de admisión. La forma de regular el caudal de aire es mediante una válvula de mariposa colocada en el colector de admisión y accionada a voluntad por el conductor mediante el pedal del acelerador.

El motor recibe impulsos eléctricos de la Unidad de Control Electrónica que le permiten realizar un control del movimiento del obturador con gran precisión; el motor se desplaza en un sentido u otro en función de que sea necesario incrementar o disminuir el régimen del ralentí.



Figura 1.9: Actuador de ralentí.

Este mecanismo también ejecuta las funciones de depósito de aire adicional y de regulador de la puesta en funcionamiento del sistema de climatización; cuando la central electrónica recibe información de que se ha puesto en marcha el sistema de climatización da orden al motor paso a paso para incrementar el régimen de ralentí en 100 rpm.

1.5.1.4 Colector de Admisión.

El colector de admisión cumple dos funciones: facilita la vaporización de la mezcla de gasolina-aire, y la distribuye a cada cilindro del modo más uniforme posible.

El llenado de los cilindros se produce por aspiración, durante la carrera descendente del pistón mientras la válvula de admisión esta abierta o bien comprimiendo previamente el aire, lo que se denomina sobrealimentación.

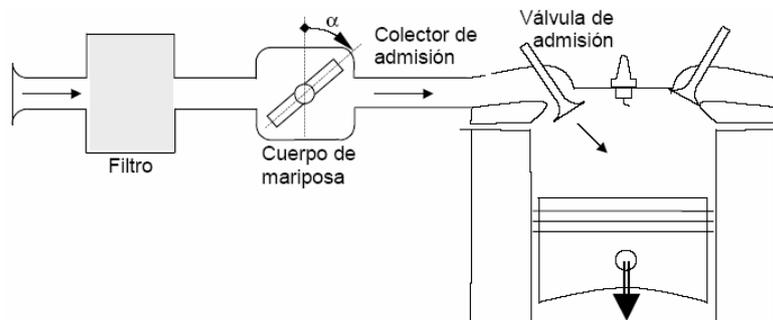


Figura 1.10: Sistema de admisión de aire.

1.5.2 Circuito de alimentación de Gasolina.

El sistema de alimentación suministra a baja presión la cantidad de combustible necesaria para el motor en cada estado de funcionamiento.

Esta compuesto por los siguientes elementos:

- Bomba de Gasolina.
- Filtro.
- Electro válvula de Inyección.
- Regulador de presión de Gasolina.

1.5.2.1 Bomba de Gasolina.

La bomba se halla situada en el depósito de la gasolina y conduce bajo presión el combustible, a través de un filtro, hasta el regulador de la presión y el inyector. La bomba integra en el depósito un transmisor del nivel de llenado y un cuerpo de rotación para separación de burbujas de vapor en el retorno del combustible.

La bomba es accionada por medio de un motor eléctrico, el cual hace girar en el extremo de la misma una bomba de rodillos, que es la encargada de impulsar el combustible y proporcionar la presión debida.

1. Inducido.
2. Colector.
3. Escobillas.
4. Masas polares.
5. Bomba de rodillos.
6. Entrada de combustible.
7. Salida de combustible.
8. Válvula de retención.
9. Válvula limitadora de presión.

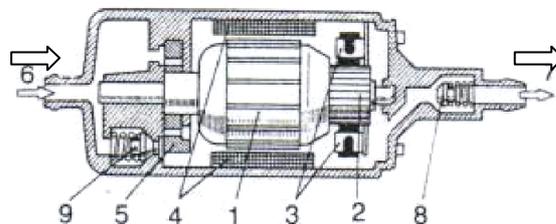


Figura 1.11: Composición interior de la bomba de gasolina.

El inducido es el encargado de recoger la corriente desde su colector a través de las escobillas; por otra parte las masas polares establecen las líneas magnéticas necesarias para proporcionar el movimiento rotatorio del inducido, cuando este es recorrido por una corriente eléctrica; en uno de los extremos del inducido se encuentra la bomba celular de rodillos, que es la impulsora del combustible. La válvula de retención solamente se abre cuando la bomba adquiere un determinado valor de presión.

1.5.2.2 Regulador de Presión.

El regulador de presión mantiene fija la presión de alimentación al inyector, es un dispositivo de tipo mecánico a membrana, formando parte del cuerpo de inyección donde esta alojado el inyector. El regulador esta constituido de una carcasa contenedora, un dispositivo móvil compuesto por un cuerpo metálico y una membrana accionada por un muelle calibrado.

Cuando la presión del combustible sobrepasa un valor determinado, el dispositivo móvil se desplaza y permite la apertura de la válvula que deja salir el excedente de combustible, retornando al depósito por un tubo; un orificio calibrado previsto en el cuerpo de inyección pone en comunicación la cámara de regulación con el tubo de retorno, permitiendo disminuir la carga hidrostática sobre la membrana cuando el motor esta parado, la presión de funcionamiento es de 0.8 bar.

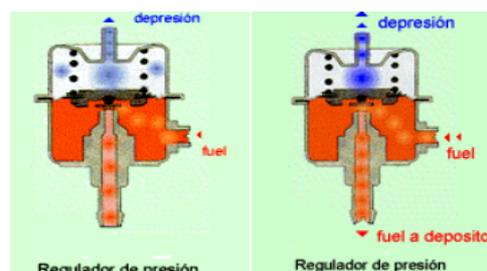


Figura 1.12: Regulador de presión.

1.5.2.3 Electro válvula de Inyección.

El único dispositivo empleado en la formación de la mezcla es el Inyector, representado en forma esquemática en la figura 1.13.

La inyección se produce al llegar el combustible presurizado al inyector, gracias a una bomba de eléctrica situada en el depósito. El inyector se encarga de inyectar el combustible por intermitencia en el colector de admisión a una presión relativamente baja, permitiendo la realización de una mezcla controlada electrónicamente evitando las pérdidas, es accionada por medio de impulsos eléctricos que le llegan desde la Unidad Electrónica de Control, abriéndose y cerrándose en respuesta a ellos.

1. Malla
2. Conexión eléctrica
3. Bobina magnética
4. Muelle antagonista.
5. Inducido
6. Aguja
7. Perno cónico

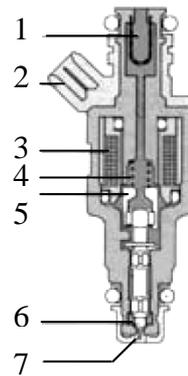


Figura 1.13: Inyector.

La electro válvula esta constituida por un bobina, cuya acción magnética al paso de la corriente eléctrica, es capaz de desplazar al núcleo contra la acción del muelle antagonista, dejando retirada de su asiento la aguja (aproximadamente 0.1 milímetro), con lo que el combustible llega a presión a través del filtro, pasando alrededor del núcleo para ser finalmente pulverizado por la boquilla. Cuando el devanado magnético no recibe corriente, la aguja es presionada contra su asiento por el muelle, impidiendo la salida de combustible por la boquilla.

El inyector se encuentra en el cuerpo de inyección y tiene una boquilla o tobera especial, con seis agujeros dispuestos radialmente, que pulveriza la gasolina en forma de cono en el espacio comprendido entre la mariposa y la pared del venturi.

El número, tamaño y posición de los orificios de la boquilla, permite lograr un chorro de combustible pulverizado, el cual se unirá a la corriente de aire que llega a través del colector de admisión, formando de esta manera la mezcla de combustible. La electro válvula queda abierta el tiempo necesario para proporcionar al motor la dosificación correcta según la cantidad de aire aspirado.

1.5.3 Circuito de Control.

1.5.3.1 Unidad Electrónica de Control (ECU).

La Unidad Electrónica de Control (ECU) esta constituida por un conjunto de componentes electrónicos dispuestos en placas de circuito impreso, alojadas en una caja de aluminio, que sirve como disipador de calor. Hasta la unidad llegan diversas señales sobre el funcionamiento del motor, que le son transmitidas por los diferentes sensores; la cantidad de combustible a inyectar esta determinada por el unidad electrónica que gobierna directamente a la corriente de mando del Inyector.

La figura 1.14 muestra un diagrama de bloques de los circuitos electrónicos de la Unidad de Control. Un circuito electrónico llamado conformador de impulsos recibe la señal de régimen de giro del motor y después de tratarla convenientemente la envía al multivibrador, que a su vez recibe la señal de caudal de aire, magnitudes ambas que son fundamentales para determinar el tiempo de inyección; de esta

manera el multivibrador transforma estas señales en impulsos eléctricos para aplicarlos al inyector, la duración de los mismos determina el caudal inyectado.

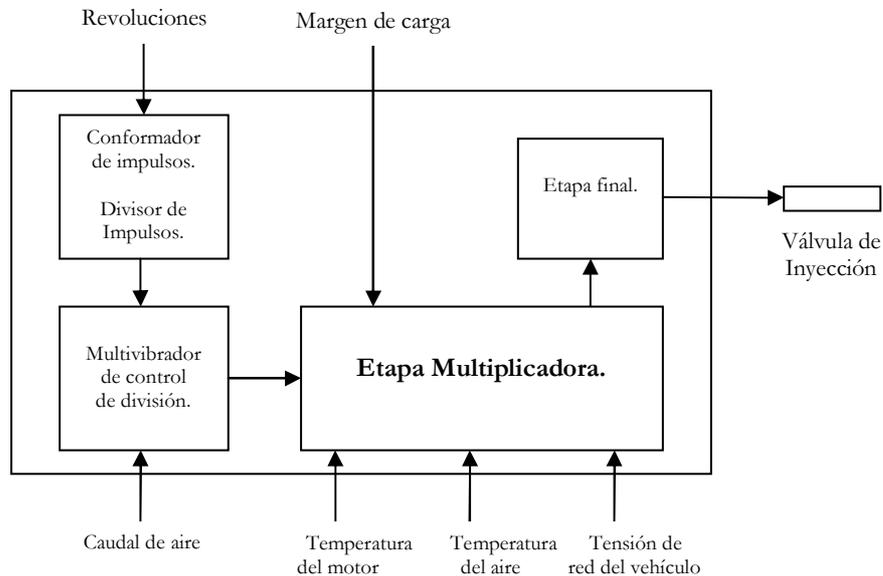


Figura 1.14: Diagrama de bloques de los circuitos electrónicos de la ECU.

Desde el multivibrador, la señal de mando para el inyector pasa a la etapa multiplicadora, la cual adapta esta señal en función de otras que recibe de los distintos sensores del motor, como carga, temperatura del motor, temperatura el aire de admisión, tensión del vehículo etc; de esta manera el combustible inyectado es corregido en función de estos factores modificando el tiempo de inyección.

En esta etapa es muy importante tener en cuenta el valor de la tensión de la instalación eléctrica del vehículo, dado que afecta notablemente a los caudales inyectados, pues cuanto mas baja sea la tensión de la batería, menos combustible recibe el motor. La etapa multiplicadora corrige convenientemente la tensión para que la inyección no se vea afectada y así por ejemplo en el instante de arranque del

motor, cuando se produce una caída de tensión importante de la batería, la unidad de control detecta esta señal como condición de arranque y multiplica el tiempo de inyección para aumentar el caudal de inyección en esos instantes. Los impulsos de inyección tratados en la etapa multiplicadora se aplican a continuación en la etapa final, en la que son amplificados para posteriormente enviarlos al inyector.

Cuando se acciona la llave de contacto, se alimenta de corriente la Unidad Electrónica, el sistema de encendido y el relé de la bomba de alimentación de combustible, la cual es puesta en funcionamiento durante unos pocos segundos para presurizar la rampa de inyección; en este tiempo, el regulador limita la presión al valor estipulado, vertiendo el exceso de combustible al depósito.

Cuando se acciona el motor de arranque, la ECU alimenta al caudalímetro de aire y al inyector, así como al corrector de ralentí; al mismo tiempo recibe señales de temperatura del motor, posición de la mariposa, flujo de aire, e impulsos de encendido; con estos parámetros la ECU calcula la cantidad de combustible requerida y determina el periodo de apertura del inyector. Durante el arranque el inyector se abre a cada impulso de encendido, es decir al doble del régimen normal, lo cual proporciona un enriquecimiento necesario en esta fase de funcionamiento.

Una vez arrancado el motor, la ECU modifica los periodos de apertura del inyector a medida que la temperatura aumenta y gobierna el corrector de ralentí para adecuar el caudal de aire a las necesidades específicas en esta fase de funcionamiento.

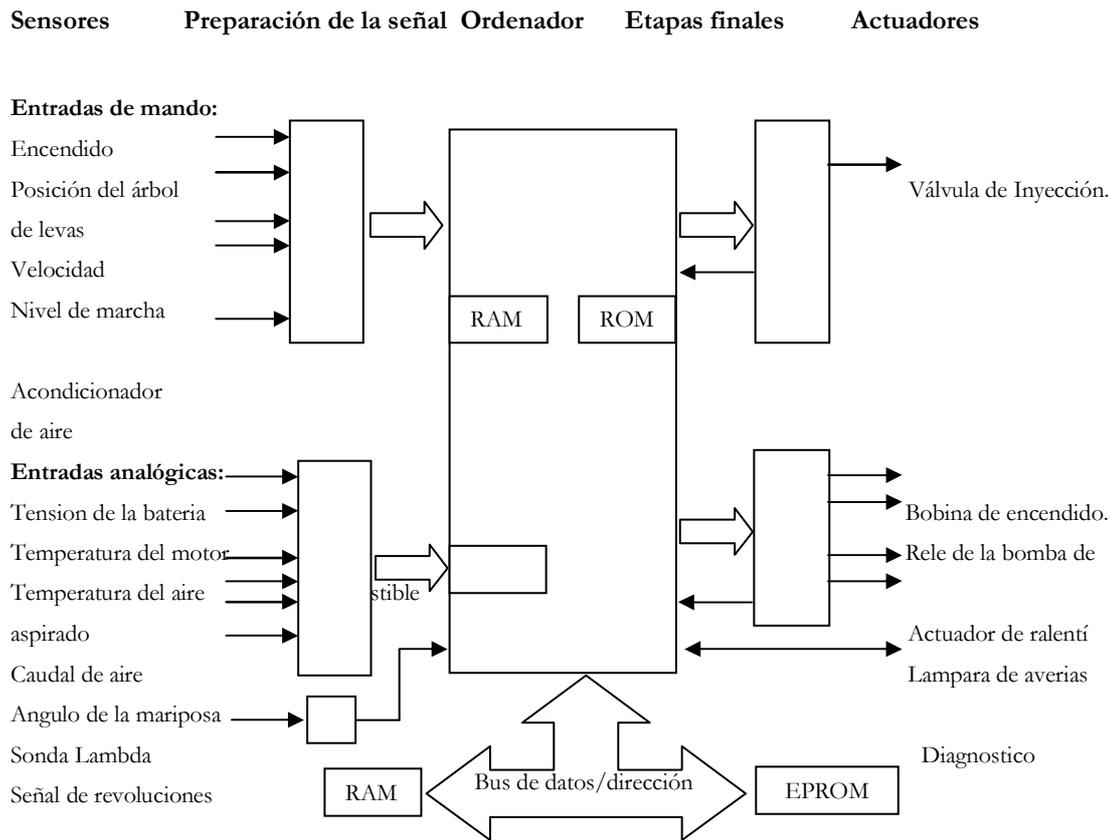


Figura 1.15: Diagrama de bloques del Sistema Mono-Motronic de Bosch.

Entrada de señales: Las señales de entrada son conducidas de distintas formas a la ECU; las señales analógicas como caudal de aire, temperatura del motor, posición de la mariposa, sonda lambda régimen de giro etc, son transmitidas en valores digitales por un convertidor Analógico/Digital en el microprocesador.

Procesamiento de Señales: El microprocesador en la ECU procesa las señales de entrada; este microprocesador necesita un programa para el procesamiento de señales, que esta almacenado en una memoria de valor fijo (EPROM); adicionalmente están almacenadas en la memoria las curvas características específicas del motor y los campos característicos para el control del motor.

Una memoria RAM de escritura-lectura es necesaria para almacenar valores de cálculo, valores de adaptación y posibles averías que surgen en el sistema global (diagnostico), la RAM precisa para su función una alimentación constante de corriente, al desconectar la batería del vehículo pierde esta memoria todos los datos existentes; en este caso la ECU tiene que determinar de nuevo los datos de adaptación tras la conexión de la batería. Para evitar este inconveniente se utilizó una memoria EPROM en lugar de una RAM.

Salida de Señales: El microprocesador activa las etapas finales que suministran suficiente potencia para la conexión directa de los elementos actuadores; estas etapas finales están protegidas contra cortocircuitos a tierra o a la tensión de la batería, así como la destrucción por sobrecarga eléctrica.

Función de Diagnostico: Se encarga de reconocer la avería aparecida en algunas etapas finales y desconecta si es necesario la salida defectuosa. En la memoria RAM se almacena el registro de la avería, el mismo que puede interrogarse en el taller mediante un comprobador a través del interfaz en serie. Otro circuito de protección corta la alimentación de la bomba de combustible, cuando el contacto de encendido esta dado pero el motor esta parado, por ejemplo en caso de accidente.

1.5.4 Sonda Lambda (Sensor de Oxigeno).

La función del sensor de oxígeno es informar a la computadora sobre la cantidad de oxígeno que transportan los gases de escape; el sensor se encuentra montado en el tubo de escape antes del catalizador. Con la señal del sensor de oxígeno, la ECU

establece el control del tiempo de inyección y con ello logra mantener la mezcla dentro del rango estequiométrico de 14.7 a 1. Cuando se acelera súbitamente o la mariposa de aceleración pasa por encima del 70 % de abertura, la ECU ignora la señal del sensor, lo mismo hace cuando aún el sensor no alcanza su temperatura de trabajo, en este último caso la ECU utiliza los valores preprogramados en su memoria.

1. Elemento de contacto.
2. Cuerpo cerámico de protección.
3. Cuerpo cerámico de la sonda.
4. Tubo protector.
5. Conexión eléctrica.
6. Anillo de sello.
7. Carcasa.
8. Sextavado de conexión.
9. Electrodo (negativo).
10. Electrodo (positivo).

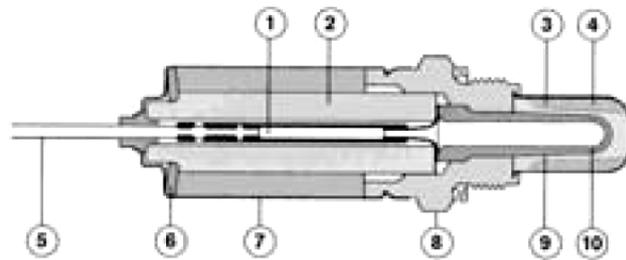


Figura 1.16: Sonda Lambda.

La sonda está construida por una cerámica especial porosa de Bióxido de Circonio y dos contactos de Platino, tiene uno de los lados en contacto con el aire ambiente, el otro lado se halla en contacto con los gases de escape. Si la mezcla es rica, existe una diferencia de concentración de oxígeno entre los dos lados de la cerámica y los iones de oxígeno se desplazan y crean una diferencia de potencial en los bornes de los electrodos de platino que están alimentados a 1 voltio. En este caso, la ECU debería empobrecer la mezcla mediante la disminución del tiempo de inyección. Así pues la ECU interpretará la señal para aumentar o disminuir el tiempo de apertura del inyector.

El tiempo de respuesta de la sonda de oxígeno es muy pequeño, de milisegundos a unos 600 °C o 800 °C que es su temperatura ideal de trabajo, pero el problema es que por debajo de 300 °C de temperatura su funcionamiento es más lento y defectuoso; para tratar de solucionar este problema se le incorpora un pequeño calefactor (resistencia térmica) que permite alcanzar la temperatura de funcionamiento en unos 20 o 30 segundos, pero hasta que se alcance la temperatura la señal debe ser ignorada, lo mismo que en máxima aceleración puesto que en esta última situación prima la entrega de potencia sobre la calidad de los gases de escape.

1.5.5 Catalizador.

El catalizador tiene como misión disminuir los elementos contaminantes contenidos en los gases de escape de un vehículo mediante la técnica de la catálisis. Se trata de un dispositivo instalado en el tubo de escape, cerca del motor, ya que ahí los gases mantienen una temperatura elevada. Esta energía calorífica pasa al catalizador y eleva su propia temperatura, circunstancia indispensable para que este dispositivo tenga un óptimo rendimiento, que se alcanza entre los 400 y 700 grados centígrados.

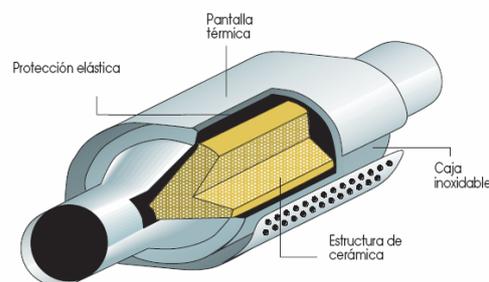


Figura 1.17: Catalizador.

Exteriormente el catalizador es un recipiente de acero inoxidable, frecuentemente provisto de una carcasa metálica antitérmica, igualmente inoxidable, que protege la parte inferior del vehículo de las altas temperaturas alcanzadas. En su interior contiene un soporte cerámico o monolito, de forma cilíndrica, con una estructura de múltiples celdillas en forma de panal, con una densidad de éstas de aproximadamente 450 celdillas por cada pulgada cuadrada. Su superficie se encuentra impregnada con una resina que contiene elementos nobles metálicos, tales como Platino y Paladio, que permiten la función de oxidación, y Rodio, que interviene en la reducción. Estos metales actúan como elementos activos catalizadores; es decir, inician y aceleran las reacciones químicas entre otras sustancias con las cuales entran en contacto, sin participar ellos mismos en estas reacciones. Los gases de escape contaminantes generados por el motor, al entrar en contacto con la superficie activa del catalizador son transformados parcialmente en elementos inocuos no contaminantes como son anhídrido carbónico, agua y nitrógeno.

1.5.6 Sensor de Temperatura del Motor.

Este sensor se encarga de captar la temperatura del motor y transmite a la ECU la información que le permite conocer la temperatura de funcionamiento del motor y así poder realizar las estrategias de arranque en frío, estabilización de ralentí etc. En los motores enfriados por agua, el sensor de temperatura se monta en el circuito de refrigeración y esta constituido por una resistencia con coeficiente negativo de temperatura NTC (Negative Temperature Coefficient) situado en el interior del cuerpo metálico. Su naturaleza eléctrica semiconductor se comporta de manera que su resistencia disminuye al incrementar la temperatura.

1. Conexión eléctrica.
2. Carcasa.
3. Resistencia NTC.

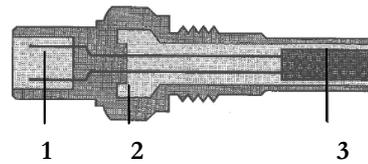


Figura 1.18: Sensor de temperatura.

1.6 Mezcla.

La dosificación o mezcla resulta de la relación existente entre el peso de la gasolina y el aire aspirado por el motor. El consumo de combustible está alrededor de 1 Kg. de gasolina por cada 14,7 Kg. de aire o dicho de otro modo será necesario disponer de 8.000 litros de aire para consumir 1 litro de gasolina.

Si el motor de un automóvil se mantuviera siempre a un régimen de giro constante y no fuera sometido a solicitudes diversas (arranque, aceleraciones, desaceleraciones, aumento y disminución de la resistencia a vencer etc.) una mezcla de aire como la indicada podría ser considerada óptima, sin embargo ocurre que el motor necesita variar con gran frecuencia la relación de dosificación aire-gasolina entre límites que van desde 12 : 1 hasta 18 : 1, según la variación que se produce en su régimen de giro, potencia.

Esta condición da origen a una complejidad a la hora de determinar la mezcla adecuada ante cada uno de los muchos casos posibles, de modo que la preparación aire-gasolina no presenta proporciones fijas, sino que estas varían de acuerdo con las condiciones propias del motor o del terreno por donde pisa el vehículo (bajadas, subidas etc.), por lo que durante el funcionamiento normal del motor se requiere realizar diferentes dosificaciones que pueden ser:

1.6.1 Mezcla Rica. Es cuando contiene excesiva cantidad de gasolina, la proporción aire-gasolina se mantiene entre 10.1 : 1 y 14.7 : 1.

1.6.2 Mezcla Pobre. Es cuando contiene excesiva cantidad de aire, la proporción aire-gasolina se mantiene entre 14.7 : 1 y 19.1 : 1.

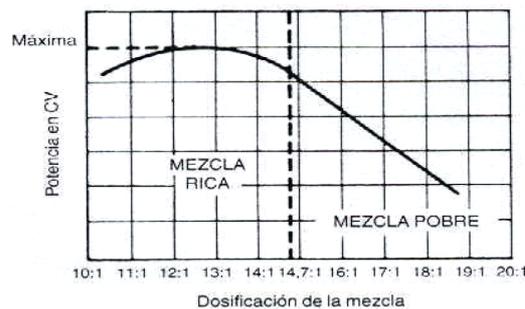


Figura 1.19: Curva de la mezcla vs Potencia.

Analizando la curva resultante vemos que el motor logra mayor potencia con mezclas ricas y alcance su cumbre con valores alrededor de 12,5 a 13,1, mientras las mezclas pobres disminuyen notablemente la potencia del motor.

1.7 Sistema de Encendido.

La misión del encendido es inflamar en el momento de encendido correcto la mezcla comprimida de aire/combustible, iniciando así la combustión; en el motor de gasolina se produce esto mediante una chispa eléctrica, es decir mediante una breve descarga de arco voltaico entre los electrodos de la bujía de encendido.

El complemento ideal para cualquier sistema de inyección electrónica, es un encendido con mando electrónico, que presenta sobre el convencional la ventaja

esencial de estar exento de desgastes, con lo que se mantiene el punto de encendido inalterable en el transcurso de tiempo de utilización del motor. El reglaje preciso de la ley de encendido es fundamental para obtener una correcta combustión de la mezcla, de manera que para una determinada carga y régimen de giro del motor, el avance de encendido preciso determina el consumo específico y el nivel de contaminantes de los gases de escape.

El sistema de encendido convencional presenta en muchos casos el problema de que la tensión de encendido que necesita la bujía no puede proporcionarla en medida suficiente este sistema de encendido, como ocurre por ejemplo en los regimenes de rotación del motor elevados, en los cuales, los platinos se abren y cierran con tal rapidez, que ni siquiera llega a alcanzarse el valor máximo de la corriente primaria, que se lograría con maniobras mas pausadas; la consecuencia inmediata es la aparición de fallos del encendido, debidos a una acentuada disminución de la tensión secundaria, dado que la bobina no puede acumular suficiente energía en el cortísimo tiempo que permanecen cerrados los contactos del ruptor en los altos regimenes.

La bobina de encendido de alta potencia solucionó en parte los problemas mencionados, con ella se elevo la corriente primaria hasta los 5 amperios, alcanzándose el limite de la corriente de corte del ruptor, a partir del cual, el deterioro de los contactos es de tal importancia, que la duración de los mismos se acorta hasta valores inapropiados para su utilización. La solución definitiva para este problema, fue la utilización de un transistor como interruptor, el cual permite el gobierno de corrientes mucho mas intensas que las admitidas por el ruptor, pudiendo

disponerse bobinas para corrientes primarias de más de 10 amperios; teniendo en cuenta además que la inductancia de estas bobinas es solamente la mitad de la correspondiente a las bobinas convencionales, se puede deducir que con ellas puede acumularse el doble de energía y eso independientemente del régimen de giro de motor.

Cuando el sistema de encendido tradicional por contactos (platinos) fue suplantado por un sistema de encendido electrónico, al no tener una señal pulsante de un contacto, se optó por tomar la señal del módulo de encendido, el cual cumple una función similar al de su antecesor, pero utilizando la electrónica. Esta forma de pulsos lo crea el módulo, para formar el campo magnético primario de la bobina de encendido, para luego interrumpirla, logrando con ello realizar un pulso en el mismo borne, de forma idéntica al anterior, este pulso es enviado al Tacómetro en el caso de medición de revoluciones para el tablero de instrumentos y también al Computador en el caso del Sistema de Inyección.

Las ventajas más importantes que presentan los sistemas de encendido electrónico son:

- La alta tensión disponible es de mayor valor que en el encendido clásico, debido a que la ausencia de contactos permite utilizar una corriente primaria más grande, cuya ruptura es igualmente más rápida, sin que existan pérdidas por arco eléctrico entre los contactos; ello supone una mayor facilidad en el arranque en frío, así como una mejora en el rendimiento del motor.

- La alta tensión en las bujías es mayor y más uniforme a cualquier régimen, resultando prácticamente constante para los altos regímenes, lo que determina un mayor rendimiento del motor en estas condiciones de funcionamiento.
- El número de chispas por minuto puede sobrepasar las 21.000, mientras que los fenómenos de los rebotes de los contactos del ruptor limitan este valor a 18.000 en el encendido clásico, con lo cual es posible la utilización del motor en regímenes más altos.
- No existe desgaste de fibra ni de contactos del ruptor, por lo que resulta innecesario el reajuste del ángulo de leva y la operación del calado de encendido, con lo cual los costos de mantenimiento son más reducidos.

La ECU controla por igual la función de inyección y del módulo electrónico de encendido, el cual a su vez controla la función de la bobina. También la ECU, de acuerdo a la constante información recibida de cada uno de los sensores que dispone el motor, es la que determina el grado de avance de encendido de acuerdo a la cartografía tridimensional que tiene grabada en su memoria.

El momento de encendido debe elegirse de tal forma que puedan cumplirse las siguientes exigencias:

- Potencia máxima del motor.
- Consumo reducido de combustible.

- Obtener gases de escape lo más limpios posibles.

Sin embargo estas exigencias en muchos de los casos no pueden cumplirse simultáneamente.

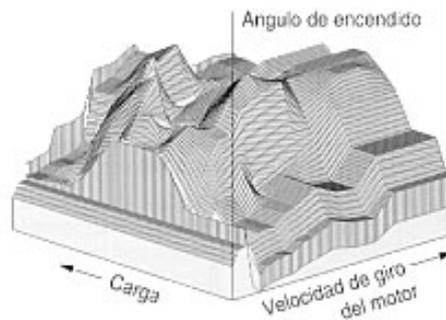


Figura 1.20: Cartografía tridimensional del ángulo de encendido.

Los sistemas electrónicos de encendido permiten obtener curvas características muy diversas (figura 1.20), gracias a la disposición de mapas tridimensionales gobernados por la ECU, en base a la cartografía memorizada en la ECU y tomando como señales mas importantes el régimen de giro y la carga, la ECU envía una señal al modulo de potencia que determina el avance de encendido y el tiempo de conducción del circuito primario de la Bobina.

Exigencias.

Para la inflamación de la mezcla por chispa eléctrica se requiere por cada encendido individual una energía aproximada de 2 mJ, siempre que la mezcla se encuentre dentro de los límites de la composición estequiométrica; las mezclas más ricas y más pobres requieren más de 3 mJ, esta energía constituye únicamente una fracción de la energía total encerrada dentro en la chispa de encendido. Si existe muy poca energía de encendido a disposición, no tiene lugar el encendido; la mezcla no

puede inflamarse y se producen fallos de combustión; por este motivo es necesario poner a disposición tanta energía de encendido que incluso bajo condiciones externas adversas, se inflame con seguridad la mezcla.

Formación de la chispa de encendido.

Una chispa solo puede saltar de un electrodo a otro, si actúa suficiente alta tensión; en el momento de encendido aumenta la tensión en los electrodos de la bujía de encendido, repentinamente desde cero hasta que se alcanza la tensión de salto de chispa (tensión de encendido).

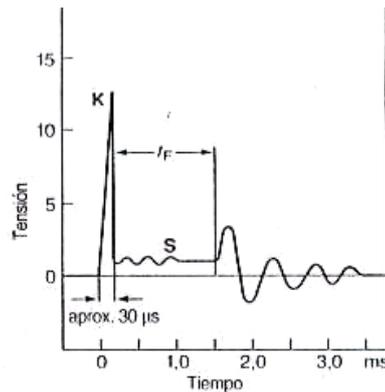


Figura 1.21: Desarrollo temporal de la tensión en la bujía de encendido.

K: Tensión de encendido.

S: Tensión de combustión.

t_F : Duración de la chispa.

En cuanto se ha encendido la chispa disminuye la tensión en la bujía de encendido hasta la tensión de combustión. Tras la interrupción de la chispa, la tensión disminuye amortiguadamente en forma de onda, se muestra en la figura 1.21.

La fuerte turbulencia de la mezcla deseable en si misma, puede conducir a que se apague la chispa y con ello una combustión incompleta; por este motivo la energía acumulada en la bobina de encendido debería ser suficiente para una o para varias chispas sucesivas.

Bobina de Encendido.

Tiene como misión controlar el tiempo de conducción llamado también ángulo dwell. La alta tensión requerida para el encendido de la chispa se transforma en los equipos de encendido por batería casi siempre con ayuda de una bobina de encendido; sin embargo el encendido por bobina tiene la función importante adicional de acumular energía de encendido.

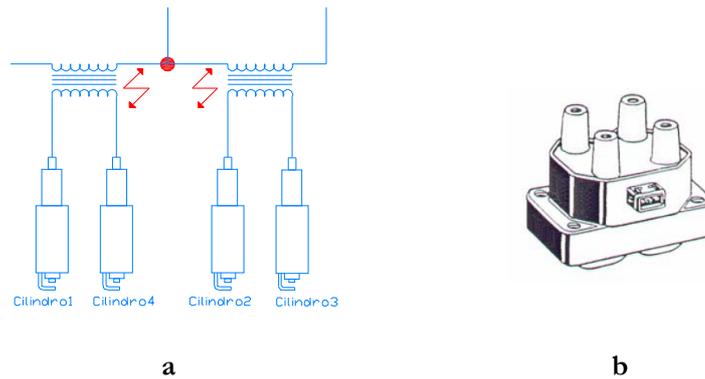
La bobina de encendido esta dimensionada de tal forma que la alta tensión disponible esta suficientemente por encima de la demanda de tensión de encendido máxima posible de la bujía de encendido, la alta tensión es de 10 a 15 Kilo voltios, con una energía acumulada en la bobina de 60 a 120 mJ.

Etapas Final de Encendido

En la etapa final de encendido se utiliza transistores de potencia para conectar y desconectar la corriente primaria a través de la bobina de encendido; además la etapa final de encendido tiene que limitar la tensión primaria como la corriente primaria; la limitación de la tensión primaria impide un aumento excesivo de la tensión secundaria ofrecida y con ello el deterioro de las piezas de alta tensión; la limitación de la corriente primaria restringe la energía del equipo de encendido a un valor preestablecido.

1.7.1 Encendido Electrónico Estático.

Este sistema suprime el distribuidor de alta tensión, que en muchos de los casos es origen de distorsiones en el encendido por diversas causas. La figura 1.22a, muestra la configuración de un encendido estático para motores de cuatro cilindros, que utiliza una bobina doble con cuatro salidas de alta tensión.



Figuras 1.22: a) Esquema del Encendido Electrónico Estático.

La disposición de los pistones en un motor de cuatro cilindros se realiza por parejas; de esta forma los pistones 1 y 4 se desplazan a la par y con un desfase de 180° con los pistones 2 y 3. Cada bobina doble se conecta a dos bujías; una bobina doble corresponde con los cilindros uno y cuatro, mientras que la otra bobina doble corresponde a los cilindros dos y tres. Cuando una bobina origina la alta tensión, la chispa salta en las dos bujías a la vez; una chispa se utiliza para inflamar la mezcla en el cilindro que se encuentra en compresión, mientras que la otra chispa salta en el otro cilindro al finalizar la carrera de escape y empezar la de admisión.

Este funcionamiento origina una chispa principal y otra secundaria; la chispa principal tiene un alto valor de tensión al tener que producirse el arco eléctrico

cuando la presión en la cámara de combustión es alta (compresión); la chispa secundaria tiene un valor de tensión menor porque necesita menos energía acumulada para que salte la chispa en una cámara de combustión con poca presión (escape). La chispa secundaria no produce combustión porque la mezcla que ha entrado al cilindro es reducida y su temperatura baja al no haberse realizado la compresión; esta situación se produce a la inversa cuando el cigüeñal gire 360°; entonces el cilindro que está en compresión pasará a estar en escape, y el cilindro que está en escape pasará a estar en compresión. La chispa principal y la secundaria se intercambiarán de cilindro.

En la otra pareja de cilindros la situación se repite. A los 360° de giro de cigüeñal se produce una chispa en cada bobina. Produciéndose un salto de chispa cada 180°, al estar desfasadas las dos bobinas media vuelta de giro del cigüeñal.

La figura 1.23 es la representación de la tensión alcanzada en los circuitos primario y secundario de la bobina en función del tiempo; analizando la gráfica de la tensión se puede comprobar como se está produciendo el salto de la chispa.

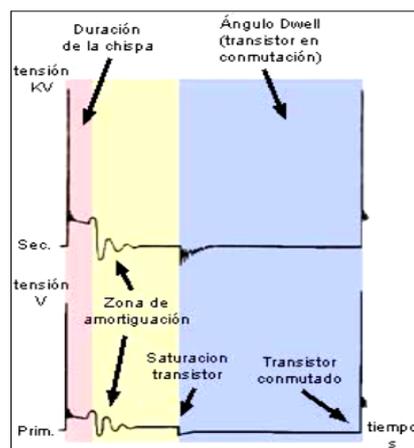


Figura 1.23: Representación grafica de la tensión.

El proceso se inicia cuando el transistor entra en conmutación y abre el circuito primario, se produce entonces un rápido aumento de la tensión en el circuito primario de la bobina que se representa por una línea vertical hacia arriba, la tensión continúa subiendo hasta que se inicia el salto de la chispa eléctrica en la bujía; el punto más alto de la línea representa la tensión de encendido.

Los principales factores que influyen en esta tensión son:

- La separación y estado de los electrodos de la bujía.
- La presión en la cámara de combustión.
- El estado de los cables de alta tensión.
- La dosificación de la mezcla aire y gasolina.

Este pico de tensión puede alcanzar valores de hasta 15.000 voltios; a partir de este momento, la energía almacenada en la bobina se emplea en el salto de la chispa, y por lo tanto desciende, en cuanto se produce el salto de la chispa, la tensión cae hasta alcanzar el valor de encendido, que decrece ligeramente mientras dura la chispa. En el circuito primario no aparecen oscilaciones al cortar completamente el transistor el circuito eléctrico.

Cuando la energía acumulada en la bobina no es suficiente para seguir haciendo saltar la chispa aparece la fase de amortiguación; la energía residual se disipa en forma de autoinducción en la bobina, creando oscilaciones tanto en el circuito primario como en el secundario, al finalizar la fase de amortiguación, el circuito primario permanece a 12 voltios, al estar alimentada la bobina a través del positivo

de contacto. Cuando el transistor se satura y cierra el circuito, la tensión desciende hasta 0 voltios, ya que la caída de tensión se produce en el primario de la bobina; la saturación del transistor produce unas oscilaciones en el secundario por el comienzo de carga de la bobina. Durante el periodo de saturación del transistor el primario de la bobina almacena energía en forma de campo magnético, esta energía es la que luego se utilizará en el siguiente salto de chispa, durante esta fase existe una pequeña caída de tensión en el transistor en torno a 0,7 voltios.

Capítulo 2

Sistemas de Control

Introducción

El área de la tecnología que se dedica al control de un proceso industrial de forma automática, es decir sin intervención humana, se llama Automatización de procesos y tiene dos aspectos diferenciados pero íntimamente ligados: el primero la necesidad de controlar el proceso, y el segundo la utilización de la tecnología adecuada, capaz de hacerlo real y operativo.

El término automatización empezó a hacerse popular en primer lugar en la industria automotriz. Las líneas de trabajo fueron acopladas a maquinas herramienta para crear grandes líneas de maquinaria que pudieran producir partes del motor, como por ejemplo el bloque, sin intervención de los operarios; por otra parte las líneas de transporte fueron acopladas a prensas estampadoras de alta velocidad con el objetivo de incrementar la productividad en la fabricación de la carrocería.

Hoy en día, conocer los fundamentos de los sistemas de control y de la automatización resulta muy útil por cuanto cualquier ingeniero, independiente de su titulación y de la tareas que tenga encomendadas en relación con su trabajo, es muy probable que acabe teniendo contacto con ellos, aun cuando únicamente los use sin profundizar en la teoría que los soporta ni en el conocimiento de los dispositivos físicos utilizados.

En este capítulo veremos la familia de controladores PID, que mostraron ser robustos en muchas aplicaciones y son los que mas se utilizan en la industria. La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, dado que limita el rango de plantas donde pueden controlar en forma satisfactoria (existe un grupo de plantas inestables que no pueden estabilizadas con ningún miembro de la familia PID). En este capítulo estudiaremos los enfoques tradicionales al diseño de controladores PID.

2.1 Definiciones y Conceptos.

2.1.1 Sistema: Se define como una combinación de componentes interconectados que forman un bloque coherente y cuya misión es cumplir un objetivo determinado

2.1.2 Sistema Estático: La información de salida depende del valor de las variables de entrada únicamente en el instante de tiempo considerado (actual), también se llaman sistemas sin memoria.

2.1.3 Sistema Dinámico: Se entiende aquel cuyas variables evolucionan con el tiempo, además puede definirse como un ente que recibe acciones externas o variables de entrada, y cuyas acciones externas son las denominadas variables de salida. Los sistemas dinámicos presentan la característica de que su salida depende de las entradas y/o de los valores de las salidas en instantes de tiempo distintos al actual (anteriores).

Las Variables de entrada del sistema se dividen en dos grupos, variables de control que se pueden manipular y perturbaciones sobre las que no es posible ningún tipo de control.

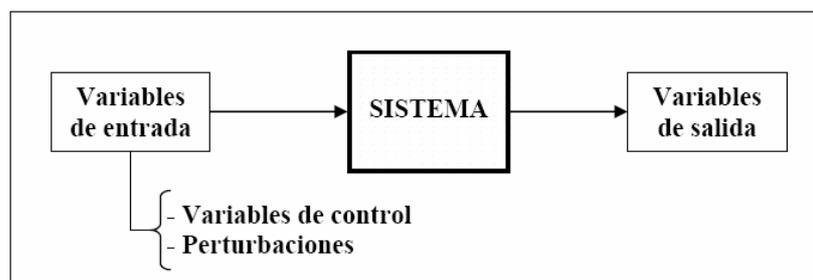


Figura 2.1: Esquema general de un sistema de control.

2.1.4 Sistema de Control: Consiste en un conjunto de elementos coordinados de tal manera que proporcionen la respuesta deseada en un determinado proceso o planta, entendiendo por ambos cualquier operación que se quiere controlar. Un sistema de control ideal debe ser capaz de cumplir sus objetivos cumpliendo los siguientes requisitos:

- Garantizar la estabilidad y, particularmente ser robusto frente a perturbaciones.
- Ser tan eficiente como sea posible.
- Ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real.

2.1.5 Estabilidad: Un sistema es estable cuando permanece en un punto de equilibrio.

2.1.6 Estabilidad Marginal: Es cuando el sistema tiene una oscilación sostenida.

2.1.7 Inestabilidad: Es cuando el sistema tiene una oscilación creciente o crece constantemente.

2.1.8 Modelado: Es el proceso mediante el cual un sistema se describe matemáticamente por una aplicación directa de leyes establecidas; la elaboración de un modelo resulta necesaria para poder llevar a cabo el análisis de un sistema de control, y el modelado de un sistema es posible realizarlo de dos formas, la forma analítica, y la forma experimental o gráfica.

2.1.8.1 Método Analítico: Es el proceso matemático utilizado para modelar un sistema con la obtención de una función transferencial que posee las características propias de dicho sistema, en la cual analizando sus diversos componentes es posible determinar las características de estabilidad, velocidad de respuesta, etc, del sistema, este método es muy eficaz para todo tipo de sistemas con funciones transferenciales de orden n .

2.1.8.2 Método Experimental: Este método es de gran ayuda en sistemas sencillos que no presentan gran complejidad y poseen un orden pequeño, consiste principalmente en ingresar valores al sistema y analizar su salida, dependiendo de la respuesta que presente el sistema se van variando los distintos valores según varios criterios y se elige la respuesta que resulte más ventajosa para el sistema.

2.2 Elementos del Sistema de Control.

El control puede:

- Estabilizar un sistema inestable o marginalmente estable.
- Desestabilizar un sistema estable.
- Mejorar la velocidad de respuesta.
- Reducir el efecto de las perturbaciones.
- Reducir el efecto de las incertidumbres.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control son los siguientes:

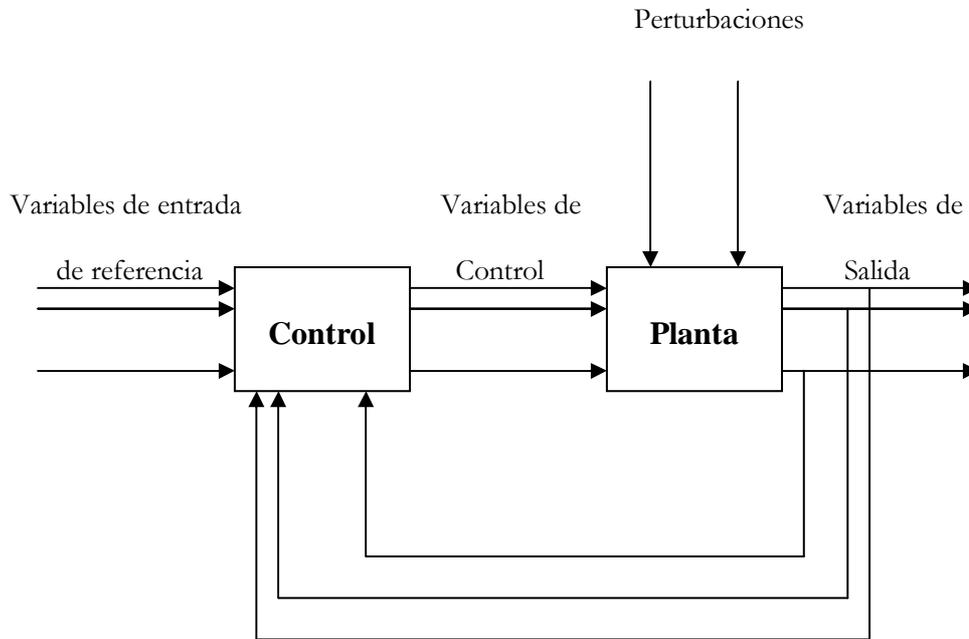


Figura 2.2: Diagrama de bloques de un Sistema de Control.

Planta: Es el Proceso o elemento a simular.

Entrada: Es la variable del sistema que es posible manejar; se le denomina también señal de consigna.

Salida: Es la variable del sistema que es necesario comandar.

Referencia: Es el valor al cual debe llegar la salida.

Sensores: Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.

Controlador: Utilizando los valores determinados por los sensores y la consigna impuesta, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en base a cierta estrategia.

Actuador: Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

Perturbación: Es un efecto que altera las condiciones de un proceso.

2.3 Variables Consideradas.

En un sistema de control, coexisten cuatro tipos de variables:

2.3.1 Variables de Entrada: Llamadas excitaciones o consignas del sistema, que expresan el comportamiento que se desea conseguir a la salida.

2.3.2 Variables de Control: Son las entradas que podemos manipular de forma arbitraria, sobre las cuales se aplican los valores de consigna, con el objeto de influir de alguna forma en el sistema de control.

2.3.3 Variables de Salida: Es la respuesta del sistema.

2.3.4 Perturbaciones: Son acciones incontroladas que pueden afectar al sistema en cualquier punto del mismo, y su efecto será generalmente una desviación sobre la respuesta deseada.

2.4 Objetivos del Control.

Hacer que la salida sea lo más próxima posible a una referencia, calculando una señal de entrada. Se debe cumplir esto independiente de:

- Perturbaciones de entrada.
- Perturbaciones de salida.
- Imprecisión en el conocimiento de la planta.

2.5 Estrategia de Control.

La estrategia de control hace referencia a la naturaleza y la dirección de los lazos existentes entre las variables medidas y/o controladas y las variables de control. Se distinguen dos tipos de estrategia en función de la información utilizada para calcular la acción de control del sistema, lazo abierto y lazo cerrado.

2.5.1 Sistemas de Control en Lazo Abierto.

Los sistemas de control en lazo abierto constituyen el tipo más sencillo y económico de los sistemas de control; en la figura 2.3 se muestra un sistema de este tipo representado en forma de diagrama de bloques.

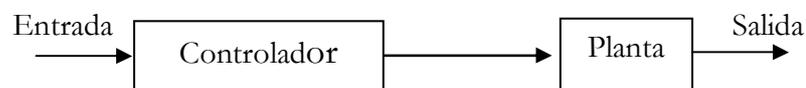


Figura 2.3: Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo abierto.

Se tiene una entrada de referencia que se aplica directamente a un controlador cuya misión es regular el proceso o planta para obtener a la salida la respuesta

deseada, en la mayoría de las situaciones, el comportamiento deseado es tal que la salida siga a la entrada, es decir idealmente, entrada y la salida deben coincidir.

En un sistema de control a lazo abierto, la salida puede cambiarse a cualquier valor deseado, modificando la señal de entrada (señal de consigna), pero si se producen variaciones en las condiciones externas o en los parámetros internos del sistema, se obtiene un cambio en la salida en forma desordenada que difiere del valor deseado o previsto. Es por ello que en un sistema de control en lazo abierto, es únicamente satisfactorio si tales variaciones pueden tolerarse, o si se diseñan los componentes del sistema de tal modo que puedan limitarse las variaciones de los parámetros y se tiene un gran control sobre las condiciones externas.

La acción de control se calcula conociendo la dinámica del sistema, las señales de consigna y estimando las perturbaciones; esta estrategia de control puede compensar los retrasos inherentes del sistema anticipándose a las necesidades del usuario, sin embargo, el lazo abierto es generalmente insuficiente, debido a los errores del modelo y a los errores en la estimación de las perturbaciones. Por ello, es común la asociación de lazo cerrado y lazo abierto, de modo que el lazo cerrado permite compensar los errores generados por el lazo abierto.

2.5.2 Sistemas de Control en Lazo Cerrado.

Los sistemas de control en lazo cerrado se denominan también sistemas realimentados; el control realimentado es un mecanismo básico mediante el cual los sistemas, ya sean mecánicos, eléctricos, biológicos o de otro tipo, mantienen su equilibrio.

Se pueden definir un sistema realimentado de control, como el uso de la diferencia entre dos señales, la cual se utiliza como entrada a un controlador diseñado para corregir la desviación entre la salida y la entrada.

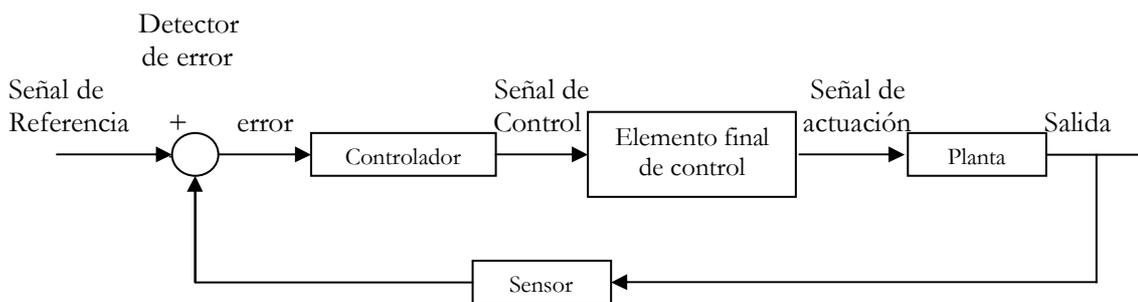


Figura 2.4: Diagrama de bloques de un sistema de control a lazo cerrado.

El detector de error compara la señal obtenida a través de la realimentación formada por un sensor y la entrada de referencia, cualquier diferencia entre estas dos señales constituye lo que se denomina una señal de error. El controlador recibe la señal de error y modifica la entrada a la planta objeto de control en tal sentido que la obliga a reducir el error original; el controlador realiza una y otra vez esta acción correctora hasta que el error $e(t)$ disminuya hasta un valor mínimo.

La acción de control se calcula en función del error medido entre la variable controlada y la consigna deseada; las perturbaciones, aunque sean desconocidas son

consideradas indirectamente mediante sus efectos sobre las variables de salida. Este tipo de estrategia de control puede aplicarse sea cual sea la variable controlada; la gran mayoría de los sistemas de control que se desarrollan en la actualidad son en lazo cerrado.

El control en lazo cerrado es necesario, además de conveniente en tres circunstancias concretas:

- Cuando existan perturbaciones (externas o internas) que actúan sobre la planta.
- Cuando no se conoce con exactitud el modelo matemático de la planta y por tanto no se puede determinar con exactitud cual es la ley de control más adecuada.
- Cuando la señal de entrada es cambiante con el tiempo y no se conoce su valor futuro.

Aunque el sistema de control en lazo cerrado puede proporcionar un control más preciso que uno en lazo abierto, tiene el inconveniente de que puede introducir inestabilidad en el sistema; hay que tener en cuenta que si el controlador produce una señal de control demasiado fuerte en su deseo de corregir el comportamiento de la planta, se puede exceder en la corrección del error y la salida puede sufrir oscilaciones que provoquen la inestabilidad del sistema.

En términos generales podemos decir que en el diseño de un sistema de control realimentado es indispensable encontrar un equilibrio entre dos factores, estabilidad

y precisión y a su vez lograr que el sistema responda con la mayor rapidez posible a la señal de entrada.

2.6 Control Directo e Indirecto.

2.6.1 Control Directo: Se controla directamente la variable que se desea corregir.

2.6.2 Control Indirecto: Se controla la variable que se desea, mediante la variación de otra que influye a la variable que se desea controlar, este tipo de control será el utilizado en el presente proyecto.

2.7 Tipos de Controladores.

El control es el elemento encargado de procesar la señal de error y generar una señal capaz de disminuir el valor de dicha señal de error, con el objetivo de lograr la máxima precisión posible del sistema de control. El procedimiento mediante el cual el controlador genera la señal de control se denomina acción de control.

Los controles típicos en sistemas de control en tiempo continuo son:

- Control Proporcional (P).
- Control Proporcional Derivativo (PD).
- Control Proporcional Integral (PI).
- Control Proporcional Integral Derivativo (PID).

2.7.1 Control Proporcional.

El control proporcional genera a la salida una señal de control que es proporcional a la señal de error.

$$m(t) = k_p \cdot e(t) \quad \Rightarrow \quad M(s) = k_p \cdot E(s) \quad (2.1)$$

Con lo cual la función de transferencia del control proporcional es:

$$G(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = k_p \quad (2.2)$$

donde: $e(t)$: Señal de error.

$m(t)$: Señal de control.

k_p : Ganancia proporcional.

Un control proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (offset).

Cuanto mayor es la ganancia del control proporcional mayor es la señal de control generada para un mismo valor de señal de error; desde otro punto de vista se puede decir que para una señal de control determinada, cuanto mayor es la ganancia del control proporcional menor es la señal de error actuante. En conclusión, el aumento de la ganancia del control proporcional permite reducir el error en estado estacionario.

Nótese la necesidad de tener una señal diferente de cero para obtener una señal de control diferente de cero; este hecho nos permite deducir una conclusión importante: “El control proporcional no permite eliminar un error en estado estacionario”.

En sistemas que poseen una diferencia entre el grado del denominador y el numerador de su función de transferencia mayor que dos (poseen por lo menos dos polos más que el número de ceros), que son la gran mayoría de los sistemas, el aumento de la ganancia del control proporcional lleva generalmente a un empeoramiento de la respuesta transitoria del sistema en lazo cerrado, debido a que produce:

- Aumento del sobreimpulso.
- Disminución del tiempo de pico.
- Aumento del tiempo de establecimiento.

Se puede llegar a la situación de llevar al sistema a la inestabilidad mediante un aumento excesivo de la ganancia del control proporcional.

2.7.2 Control Proporcional Derivativo.

Acción de Control Derivativa.

Genera una señal de control proporcional a la derivada de la señal de error.

$$m(t) = k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad \Rightarrow \quad M(s) = k_d \cdot s \cdot E(s) \quad (2.3)$$

De este modo el control derivativo, obteniendo la derivada de la señal de error conoce las características dinámicas de la misma (crecimiento o decrecimiento), produciendo una corrección antes de que la señal de error se haga excesiva, a este efecto se le denomina acción anticipativa. La acción de control derivativa añade sensibilidad al sistema y tiene un efecto de aumento de estabilidad relativa; sin

embargo el control derivativo no puede utilizarse en solitario porque es incapaz de responder a una señal de error constante.

$$e(t) = \text{constante} \quad \Rightarrow \quad m(t) = 0$$

En conclusión, con un control derivativo un sistema no alcanzaría nunca el estado estacionario y el control derivativo siempre debe utilizarse en combinación con otros controles por su influencia estabilizadora mediante la acción anticipativa.

Acción de Control Proporcional Derivativa.

Genera una señal resultante de la combinación de la acción proporcional y la acción derivativa conjuntamente.

$$m(t) = k_p \cdot e(t) + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Siendo $k_d = k_p \cdot T_d$.

$$m(t) = k_p \cdot e(t) + k_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

$$m(t) = k_p \left[e(t) + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.4)$$

donde T_d es el tiempo derivativo.

Al aplicar la transformada de Laplace en la Ecuación 2.4 queda:

$$M(s) = k_p \cdot (1 + T_d \cdot s) \cdot E(s)$$

y su función de transferencia resulta:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = k_p \cdot (1 + T_d \cdot s) \quad (2.5)$$

La estructura en diagrama en bloques es:

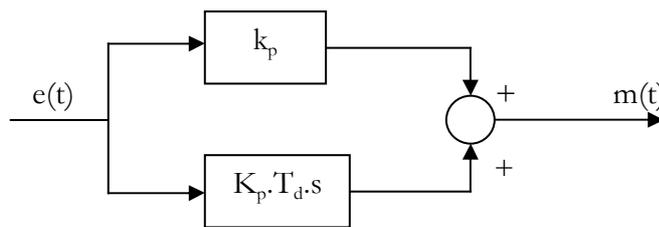


Figura 2.5: Diagrama de bloques del control Proporcional Derivativo.

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad. La acción de control derivativa nunca se utiliza por si sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. En este tipo de controlador, la parte proporcional P ayuda a incrementar la velocidad de respuesta, mientras que la parte derivativa D tiene su mayor efecto en los transitorios y hace más amortiguado y estable al sistema. Este tipo de control responde a la velocidad de variación del error actuante y puede producir una corrección significativa antes de que el error actuante se haga excesivo, esto significa que la acción derivativa se anticipa el error actuante, inicia una acción correctiva temprana y tiende a aumentar la estabilidad del sistema. El hecho de que la parte derivativa añada amortiguamiento al sistema nos permite el uso de valores de ganancia K_p más elevados, lo que produce a su vez un mejoramiento en la exactitud del estado de régimen.

Desventajas:

- Cuando la influencia del control proporcional derivativo es muy grande, el sistema de control tiende a ofrecer una respuesta excesivamente lenta.
- Amplifica señales de ruido.
- Puede producir saturación en el actuador.

2.7.3 Control Proporcional Integral.**Acción de Control Integral.**

Genera una señal de control proporcional a la integral de la señal de error:

$$m(t) = k_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \quad \Rightarrow \quad M(s) = \frac{k_i}{s} \cdot E(s) \quad (2.6)$$

La característica más importante es que la acción correctora se efectúa mediante la integral del error, ello permite decir que el control integral proporciona una señal de control en función de la propia historia de la señal de error, también permite una señal de control diferente de cero aunque la señal de error sea cero:

$$e(t) = 0 \quad \text{No implica que} \quad m(t) = 0$$

El control integral permite obtener error en estado estacionario nulo en un sistema de control mediante la introducción de un elemento integrador en la función de transferencia a lazo abierto.

Desventaja:

- La acción de control integral empeora de modo substancial la estabilidad relativa del sistema, aumentando el sobreimpulso de la respuesta transitoria,

pudiéndose obtener, inclusive un sistema inestable; por esta razón la acción integral en la practica suele acompañarse por otras acciones de control.

Acción de Control Proporcional Integral.

Genera una señal resultante de la combinación de la acción proporcional y la acción integral conjuntamente.

$$m(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt$$

Siendo $k_i = \frac{k_p}{T_i}$

$$m(t) = k_p \cdot e(t) + \frac{k_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt$$

$$m(t) = k_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \right] \quad (2.7)$$

donde T_i es el tiempo integral y es quien ajusta la acción integral.

Al aplicar la transformada de Laplace en la ecuación 2.7 queda:

$$M(s) = k_p \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right] \cdot E(s)$$

y su función de transferencia resulta:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = k_p \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right] \quad (2.8)$$

La estructura en diagrama de bloques es:

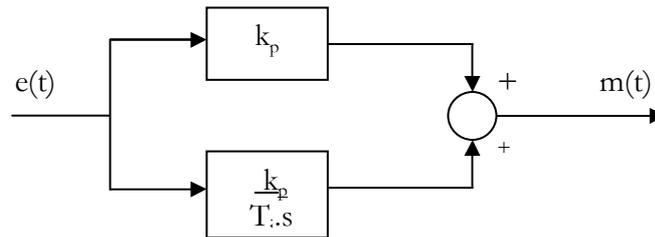


Figura 2.6: Diagrama de bloques del control Proporcional Integral.

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero, con la acción integral un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo, la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero.

El control proporcional integral combina las ventajas de la acción proporcional y de la acción integral; la acción integral elimina el error estacionario mientras que la acción proporcional reduce el riesgo de inestabilidad que implica la introducción de la acción integral.

Un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden, lo que puede demostrarse mediante un ensayo al escalón.

Desventaja:

- Puede llegar a causar problemas de inestabilidad.

2.7.4 Control Proporcional Integral Derivativo.

Genera una señal resultante de la combinación de la acción proporcional, la acción integral y la derivativa conjuntamente, esta combinación reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control.

La ecuación de un controlador con estas acciones combinadas se obtiene mediante:

$$m(t) = k_p \cdot e(t) + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + k_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt$$

$$m(t) = k_p \cdot e(t) + k_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + \frac{k_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt$$

$$m(t) = k_p \cdot \left[e(t) + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \right] \quad (2.9)$$

Al aplicar la transformada de Laplace en la ecuación 2.9 queda:

$$M(s) = k_p \cdot \left[1 + T_d \cdot s + \frac{1}{T_i \cdot s} \right] \cdot E(s)$$

y su función de transferencia resulta:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = k_p \cdot \left[1 + T_d \cdot s + \frac{1}{T_i \cdot s} \right] \quad (2.10)$$

La estructura en diagrama de bloques es:

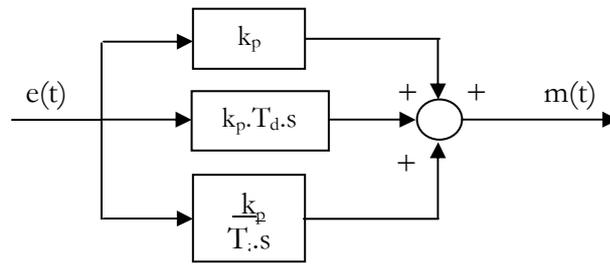


Figura 2.7: Diagrama de bloques del control Proporcional Integral Derivativo.

La acción de control proporcional integral derivativa permite eliminar el error en estado estacionario logrando una buena estabilidad relativa del sistema de control, la mejora de estabilidad relativa implica una respuesta transitoria con tiempos de adquisición y máximo sobreimpulso pequeños. Los efectos de cada uno de los controladores en un sistema de lazo cerrado están resumidos en la tabla que se presenta a continuación.

Controlador	Tiempo Crecimiento	Sobrepico	Tiempo Establecimiento	Error Estado Estable
K_p	Disminuye	Aumenta	Poco cambio	Disminuye
K_i	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Elimina
K_d	Poco cambio	Disminuye	Disminuye	Poco cambio

Nótese que estas correlaciones podrían no ser exactamente precisas, ya que el efecto de cada controlador será dependiente de los otros; por este motivo, la tabla mostrada solo debe ser utilizada como referencia para determinar los valores de K_i , K_p y K_d .

2.8 Propuesta de Control para el Sistema de Inyección Electrónica Monopunto.

2.8.1 Introducción de la Gasolina en el Cilindro.

Cuando se dispone de una determinada cantidad de gasolina pulverizada en el colector de admisión, las gotas pueden entrar directamente en el cilindro si encuentran la válvula de admisión abierta. En la práctica, la inyección suele finalizar antes de que comience a abrirse la válvula de admisión, con objeto de que las gotas tengan tiempo de vaporizarse y así se logre una mezcla mucho más homogénea entre el aire y el combustible. Sin embargo, otra parte de la gasolina se deposita en las paredes del colector y la válvula de admisión; lo cual se denomina “**Efecto de película de pared**”.

La masa de líquido depositado en la película es función de los siguientes parámetros:

- Temperatura de la gasolina.
- Densidad y Viscosidad de la gasolina.
- Velocidad, presión y temperatura del aire.
- Tiempo y fase del proceso de admisión.
- Superficie de vaporización.

Durante el funcionamiento en régimen estacionario del motor, la masa de líquido es constante, cuando la presión y la temperatura en el colector se ven alteradas, como sucede al variar la carga del motor o cuando todavía no se ha alcanzado la

temperatura de trabajo, el equilibrio se desplaza en un sentido u otro, modificando así el dosado de la mezcla que llega a los cilindros.

En caso de una aceleración, en que la mariposa se abre, aumenta la presión en el colector, desplazándose el equilibrio hacia la fase líquida; esto produce un empobrecimiento brusco de la mezcla, que deberá ser compensado aportando una cierta cantidad adicional de gasolina en el colector en el momento de la aceleración.

Por el contrario, al cerrarse la mariposa en las retenciones, la presión en el colector disminuye y el equilibrio se desplaza hacia la fase gaseosa, la mezcla a mas de ser excesivamente rica, no se quema bien, por lo que habrá que actuar empobreciendo la mezcla e incluso suprimiendo totalmente el combustible si no se quiere que la gasolina se quemara en el catalizador y que este quede destruido.

La gasolina líquida tiene dos formas de llegar hasta el cilindro. La primera de ellas es por paso a fase de vapor, el cual se une a la gasolina que tras la pulverización se había vaporizado directamente, la otra es por transporte o avance lento de la película.

2.8.1.1 Vaporización.

La vaporización de la gasolina se debe a la suma de dos fenómenos.

- **Evaporación o Vaporización Conductiva.** Cuando la gasolina choca con una superficie caliente, se comienzan a desprender las fracciones con un punto de ebullición mas bajo.

- **Vaporización Conectiva.** Se produce debido a la turbulencia del medio, principalmente sobre la película de gasolina líquida depositada en las paredes, la cantidad de gasolina vaporizada depende de los siguientes factores:
 - Temperatura de la gasolina.
 - Densidad y Viscosidad de la Gasolina.
 - Velocidad, presión y temperatura del aire.
 - Tiempo y fase del proceso de admisión.
 - Superficie de vaporización.

2.8.1.2 Transporte.

La película avanza muy lentamente hasta el cilindro, con una velocidad resultado de dos fuerzas: la de arrastre de la corriente de aire en la superficie del líquido y la de rozamiento con las paredes del colector de admisión y de la válvula.

2.8.2 Dinámica de la Gasolina.

Con independencia del sistema de formación de la mezcla, siempre se suceden unas fases desde que se aporta la gasolina a la corriente de aire en el colector de admisión, hasta que ésta entra en la cámara de combustión. En primer lugar se debe introducir el chorro de gasolina, bien sea por succión (carburación) o mediante presión (inyección). Este combustible se pulveriza en forma de minúsculas gotas, las cuales se pueden descomponer en dos fases, líquido y vapor, la fracción de vapor penetra en el interior del cilindro tan pronto como le es posible, al igual que las gotas arrastradas por la corriente de aire, mientras que la fracción líquida avanza

lentamente; no obstante parte de la fracción líquida vuelve a vaporizarse, de modo que mientras la válvula de admisión este abierta, penetrará en el cilindro gasolina tanto líquida como en fase de vapor, la figura 2.8 resume todos los estados y fenómenos de la gasolina que se suceden en el colector de admisión.

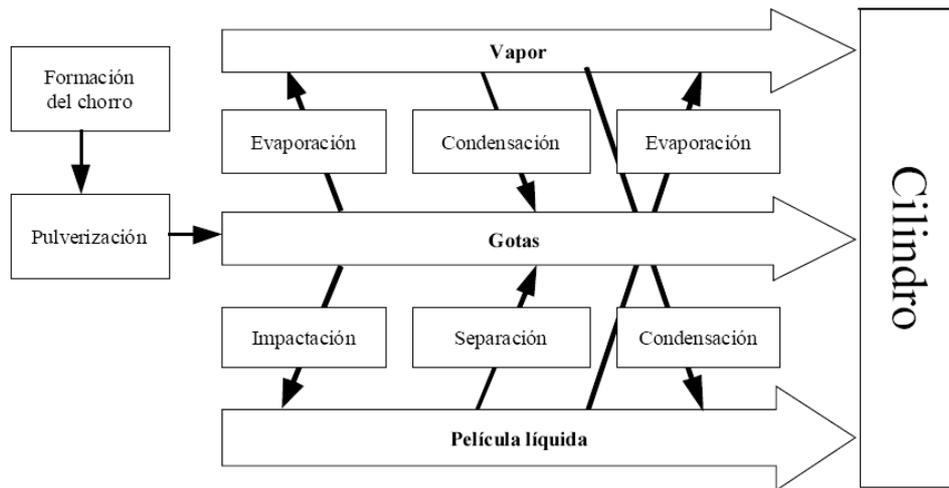


Figura 2.8: Evolución de las fases de la gasolina en el colector de admisión.

2.9 Variable de Control.

Para nuestro análisis del sistema de Inyección Electrónica, consideramos que el régimen de giro del motor actúa como variable principal para que la ECU calcule el tiempo de inyección y es en base a ella que fue desarrollado nuestro estudio para poder demostrar como debe comportarse el sistema frente a cambios del régimen de giro del motor.

Aunque sabemos que es imposible que la mayoría de las variables que intervienen en el Sistema de Inyección Electrónica se mantengan estáticas, necesitábamos llegar a controlar de alguna forma el sistema de Inyección Electrónica, lo que hicimos fue

llegar a encontrar una función de transferencia de primer orden, la cual con su simplicidad nos muestra claramente como se comporta el sistema.

Es decir las variables principales que intervienen en el sistema fueron consideradas como a continuación se describe:

- R.p.m. variables (será tomada como señal de referencia).
- Caudal de aire estático.
- Medición de la Sonda Lambda estática.
- Temperatura del motor estática.
- Temperatura del aire estática.

2.10 Modelado Matemático.

Modelo de la Gasolina.

El modelo comprende dos etapas:

- Inyección
- Evolución en el colector.

2.10.1 Inyección.

Se considera el Inyector, desde que le llega la señal de la ECU, cuya variable es el tiempo de inyección, hasta que se produce la inyección de una determinada cantidad de gasolina. Dado que el Inyector es un sistema mecánico, necesita un tiempo mínimo para vencer las inercias, el cual se denomina tiempo muerto, durante el cual no se produce aportación de gasolina.

$$m_{ci}(mg / ciclo) = k_{iny} \cdot (t_i - t_{0iny}) \quad (2.11)$$

El inyector utilizado por el automóvil Volkswagen es un Inyector Bosch, y la curva característica ha sido tomada del catalogo del fabricante, de la que se obtiene los dos parámetros:

$$k_{iny} = 2,5(mg / ms)$$

$$t_{0iny} = 0,6ms$$

Dado que se considera un proceso continuo, es necesario trabajar con el caudal en lugar de con la masa; para ello hay que multiplicar la cantidad inyectada en cada ciclo por el régimen de giro del motor. En un motor de 4 tiempos y cuatro cilindros se producen 2 inyecciones por vuelta, por lo que hay que multiplicar por 2 y con el cambio de unidades queda:

$$\dot{m}_{ci}(mg / ciclo) = m_{ci}(mg / ciclo) \cdot n(r.p.m.) \cdot 2$$

$$\dot{m}_{ci}(Kg / hora) = m_{ci}(mg / ciclo) \cdot n(r.p.m.) \cdot 2 \cdot 60 \cdot 10^{-6}$$

$$\dot{m}_{ci}(Kg / hora) = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot m_{ci}(mg / ciclo) \cdot n(r.p.m.) \quad (2.12)$$

Lo que se realizó anteriormente, es una analogía en cuanto a la aplicación de la primera derivada: Se puede deducir que la masa ocupa espacio y que el caudal circula a una cierta velocidad.

$$\frac{derivada(espacio)}{dt} = velocidad$$

$$\frac{derivada(masa)}{dt} = caudal$$

Reemplazando la ecuación 2.11 en la ecuación 2.12, resulta una ecuación que describe el funcionamiento del inyector, el cual suministra el caudal necesario para que cuando se abra la válvula de admisión pueda entrar la gasolina previamente presurizada en el cilindro.

$$\dot{m}_{ci} (Kg / hora) = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot [k_{iny} (t_i - t_0)] \cdot n (r.p.m.) \tag{2.13}$$

Del régimen de giro del motor dependen, tanto el caudal inyectado hacia el cilindro, como también la regulación del tiempo de inyección.

El modelo es representado por el siguiente diagrama de bloques.

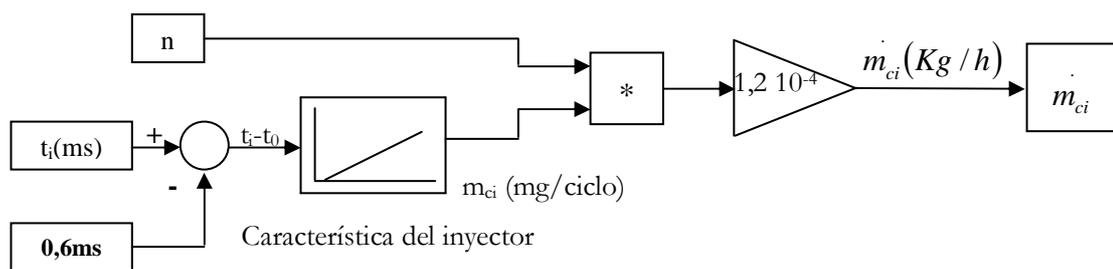


Figura 2.9: Modelo del Inyector

2.10.2 Evolución en el Colector.

Este modelo describe los cambios de fase que se suceden en el colector de admisión, esquematizados en la figura 2.8. Aquí se comentan las razones físicas de estos cambios de fase, utilizando como referencia la figura 2.10, la cual representa la zona de culata y el conducto de admisión, donde van alojados el inyector y la válvula.

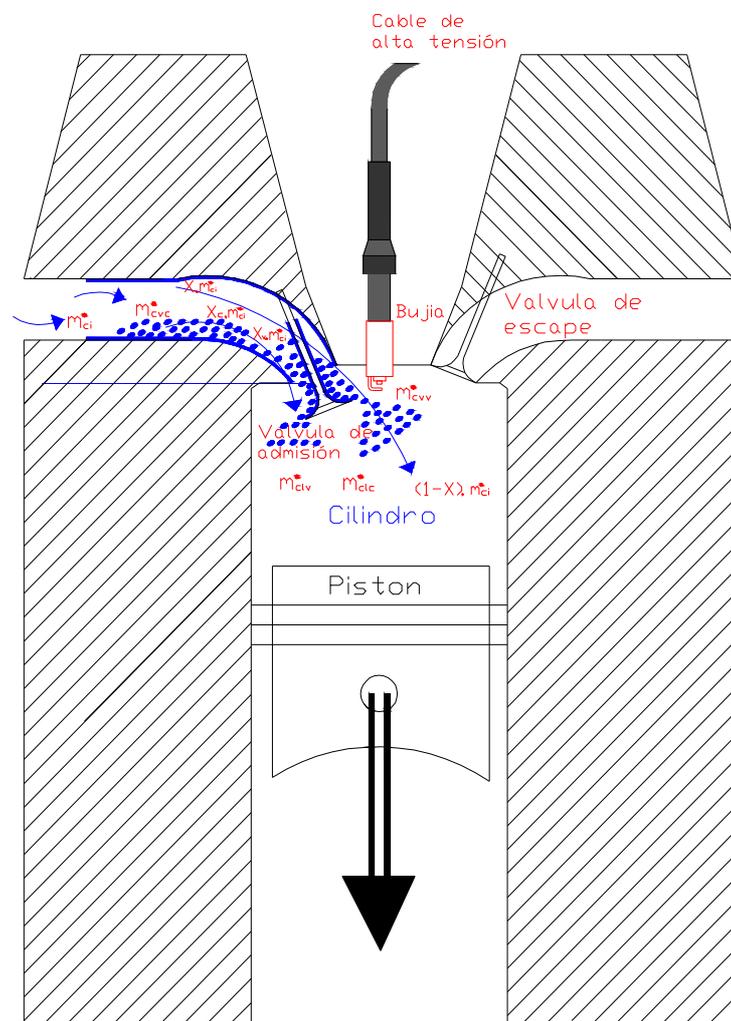


Figura 2.10: Evolución de la gasolina en el colector de admisión.

El caudal de gasolina suministrado por el inyector \dot{m}_{ci} , se divide en una fracción (1-X), que se vaporiza y entra directamente en el interior del cilindro, y el resto X queda depositado en forma de película líquida sobre las superficies, este deposito líquido se produce al impactar la gasolina inyectada en parte sobre el conducto de admisión (Xc), y en parte sobre la válvula (Xv), si esta se encuentra cerrada en el momento de la inyección, de esta forma se obtiene:

$$\dot{m}_{ci} = (1 - X)\dot{m}_{ci} + X\dot{m}_{ci} \quad (2.14)$$

dado que $X = Xc + Xv$ (2.15)

$$\dot{m}_{ci} = (1 - X)\dot{m}_{ci} + Xc\dot{m}_{ci} + Xv\dot{m}_{ci} \quad (2.16)$$

Según lo explicado en el apartado 2.8.1, la parte depositada en forma de líquido tiene dos formas de llegar al cilindro: por transporte lento del líquido, o por vaporización; así pues, la variación de masa en cada una de las películas líquidas (conducto y válvula) se puede expresar como diferencia de entre la cantidad que se deposita y la que sale, tal como se presenta en la figura 2.10.

$$\text{Conducto: } \frac{dm_{lc}}{dt} = Xc\dot{m}_{ci} - \left(\dot{m}_{cvc} + \dot{m}_{clc} \right) \quad (2.17)$$

$$\text{Válvula: } \frac{dm_{lv}}{dt} = Xv\dot{m}_{ci} - \left(\dot{m}_{cvv} + \dot{m}_{clv} \right)$$

Donde m_l es la cantidad de gasolina depositada en forma de líquido; \dot{m}_{cv} el caudal de gasolina que pasa a vapor, y \dot{m}_{cl} el caudal que pasa al interior del cilindro en forma del líquido.

De la suma de las dos ecuaciones anteriores se obtiene el caudal neto que pasa a estado líquido, tomando como positivo el caudal entrante.

$$\dot{m}_{cl} = \frac{dm_{lc} + dm_{lv}}{dt}$$

$$\dot{m}_{cl} = Xc.\dot{m}_{ci} + Xv.\dot{m}_{ci} - \left(\dot{m}_{cvc} + \dot{m}_{clc} + \dot{m}_{cvv} + \dot{m}_{clv} \right)$$

$$\dot{m}_{cl} = X.\dot{m}_{ci} - \left(\dot{m}_{cvc} + \dot{m}_{clc} + \dot{m}_{cvv} + \dot{m}_{clv} \right) \quad (2.18)$$

Dado que las paredes del colector de admisión siempre son bastante más frías que las de la válvula, se puede considerar que $Xc \gg Xv$. La cantidad de gasolina que abandona la película puede aproximarse por una fracción ($1/\tau_{fl}$) de la masa existente en la propia película.

$$\left(\dot{m}_{cvc} + \dot{m}_{clc} + \dot{m}_{cvv} + \dot{m}_{clv} \right) = \frac{1}{\tau_{cl}}.\dot{m}_{cl} \quad (2.19)$$

De esa forma la ecuación 2.18 se simplifica y se convierte en una ecuación de primer orden.

$$\dot{m}_{cl} = X.\dot{m}_{ci} - \frac{1}{\tau_{cl}}.\dot{m}_{cl} \quad (2.20)$$

Solo en régimen estacionario, esta variación será nula y por tanto, la masa del depósito líquido constante, el caudal total de gasolina que llega al cilindro (\dot{m}_c) equivale a la cantidad que llega en forma de vapor, más la aportada por la película líquida:

$$\dot{m}_c = (1 - X) \cdot \dot{m}_{ci} + \frac{1}{\tau_{cl}} \cdot \dot{m}_{cl} \quad (2.21)$$

Las dos ecuaciones anteriores 2.20 y 2.21 son la base para del modelo de la película de gasolina, que junto a la fracción de vapor, representan el modelo de la evolución de gasolina inyectada.

Si a estas dos ecuaciones se les aplica la transformada de Laplace se obtiene:

$$m_{cl}(s) = X \cdot m_{ci}(s) - \frac{1}{s \cdot \tau_{cl}} \cdot m_{cl}(s) \quad (2.22)$$

$$m_c(s) = (1 - X) \cdot m_{ci}(s) + \frac{1}{s \cdot \tau_{cl}} \cdot m_{cl}(s) \quad (2.23)$$

Si a la ecuación 2.22 se la resuelve queda:

$$m_{cl}(s) = X \cdot m_{ci}(s) - \frac{1}{s \cdot \tau_{cl}} \cdot m_{cl}(s)$$

$$m_{cl}(s) + \frac{1}{s \cdot \tau_{cl}} \cdot m_{cl}(s) = X \cdot m_{ci}(s)$$

$$m_{cl}(s) \left[1 + \frac{1}{s \cdot \tau_{cl}} \right] = X \cdot m_{ci}(s)$$

$$m_{cl}(s) = \frac{X \cdot m_{ci}(s)}{\left[1 + \frac{1}{s \cdot \tau_{cl}} \right]}$$

$$m_{cl}(s) = \frac{X \cdot \dot{m}_{ci}(s)}{\left[\frac{s \cdot \tau_{cl} + 1}{s \cdot \tau_{cl}} \right]}$$

$$m_{cl}(s) = \frac{X \cdot \dot{m}_{ci}(s) \cdot (s \cdot \tau_{cl})}{s \cdot \tau_{cl} + 1} \quad (2.24)$$

Reemplazando la ecuación 2.24 en la ecuación 2.23, resulta una función de Transferencia global:

$$m_c(s) = (1 - X) \cdot \dot{m}_{ci}(s) + \left[\frac{1}{s \cdot \tau_{cl}} \cdot \frac{X \cdot \dot{m}_{ci}(s) \cdot (s \cdot \tau_{cl})}{s \cdot \tau_{cl} + 1} \right]$$

Simplificando $s \cdot \tau_{cl}$ queda:

$$m_c(s) = (1 - X) \cdot \dot{m}_{ci}(s) + \left[\frac{X \cdot \dot{m}_{ci}(s)}{s \cdot \tau_{cl} + 1} \right]$$

$$m_c(s) = \dot{m}_{ci}(s) \cdot \left[(1 - X) + \frac{X}{s \cdot \tau_{cl} + 1} \right]$$

$$m_c(s) = \dot{m}_{ci}(s) \cdot \left\{ \frac{[(1 - X)(s \cdot \tau_{cl} + 1)] + X}{s \cdot \tau_{cl} + 1} \right\}$$

$$m_c(s) = \dot{m}_{ci}(s) \cdot \left\{ \frac{[(s \cdot \tau_{cl} - X \cdot s \cdot \tau_{cl} + 1 - X)] + X}{s \cdot \tau_{cl} + 1} \right\}$$

$$m_c(s) = \dot{m}_{ci}(s) \cdot \left(\frac{s \cdot \tau_{cl} - X \cdot s \cdot \tau_{cl} + 1 - X + X}{s \cdot \tau_{cl} + 1} \right)$$

$$\dot{m}_c(s) = \dot{m}_{ci}(s) \left(\frac{s \cdot \tau_{cl} - X \cdot s \cdot \tau_{cl} + 1}{s \cdot \tau_{cl} + 1} \right)$$

$$\frac{\dot{m}_c(s)}{\dot{m}_{ci}(s)} = \frac{s \cdot \tau_{cl} - X \cdot s \cdot \tau_{cl} + 1}{s \cdot \tau_{cl} + 1}$$

$$\frac{\dot{m}_c(s)}{\dot{m}_{ci}(s)} = \frac{[(s \cdot \tau_{cl})(1 - X)] + 1}{s \cdot \tau_{cl} + 1}$$

$$\frac{\dot{m}_c(s)}{\dot{m}_{ci}(s)} = \frac{1 + [(1 - X)(s \cdot \tau_{cl})]}{1 + s \cdot \tau_{cl}} \quad (2.25)$$

El valor de X y τ_{cl} fueron obtenidos en Internet, en una Tesis en la cual se realizaron distintas pruebas en un banco de ensayos, basándose en motor SEAT de 4 cilindros, 1.6 litros; en la cual se determinaron los coeficientes de la dinámica de la gasolina, obteniéndose los siguientes resultados:

$$\mathbf{X = 0.3}$$

$$\mathbf{\tau_{cl} = 0.08}$$

$$\frac{\dot{m}_c(s)}{\dot{m}_{ci}(s)} = \frac{1 + [(1 - 0,3)(0,08s)]}{1 + 0,08s}$$

$$\frac{\dot{m}_c(s)}{\dot{m}_{ci}(s)} = \frac{1 + (0,08s - 0,024s)}{1 + 0,08s}$$

Resultando la función de Transferencia global de la siguiente forma:

$$\frac{\dot{m}_c(s)}{\dot{m}_{ci}(s)} = \frac{1 + 0,056s}{1 + 0,08s} \quad (2.26)$$

En la figura 2.11 se muestra el modelo global en cual el inyector entrega el caudal de gasolina necesario para que de acuerdo a la dinámica de la gasolina expresada en la función de transferencia del sistema, sea introducido el combustible en el cilindro.

La variable manipulada es el valor del régimen de giro expresada en r.p.m. y es esta variable mediante la cual se desarrolló el control del sistema.

La función de transferencia encontrada no es la función de transferencia de todo el sistema, sino únicamente se limita a la dinámica de la gasolina, y la parte mecánica del sistema está basada en el modelo del inyector con sus respectivas características, siendo innecesario encontrar una función de transferencia global, ya que la unión de ambos modelos describe el comportamiento del sistema de inyección en forma efectiva.

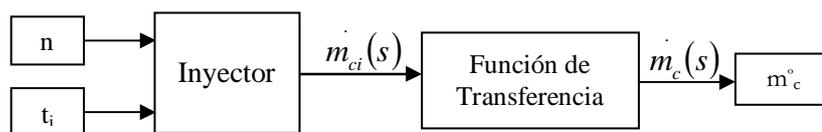


Figura 2.11: Modelo global del sistema.

La ECU, al recibir todos los valores de resistencia o de tensión medidos por los respectivos sensores del motor, envía al Inyector un tren de pulsos, el cual a su vez suministra la cantidad (caudal) correcta de Gasolina, regulado a través del Tiempo Inyección en milisegundos.

“La función principal del sistema es suministrar el caudal necesario que llega al cilindro mediante el cálculo de la variación del tiempo de inyección.”

En la figura 2.12 se muestra el diagrama de bloques, en el que la bomba de gasolina entrega el caudal constante hacia el inyector, este caudal será restado del caudal que entra en el cilindro, el resultado de esta operación es el error medido, mediante el cual se calcula el tiempo de inyección adecuado para ese valor de régimen de giro del motor.

La unión de diferentes subsistemas asociados nos da como resultado un modelo global del sistema de inyección de un motor a gasolina, el cual posee una configuración como la siguiente:

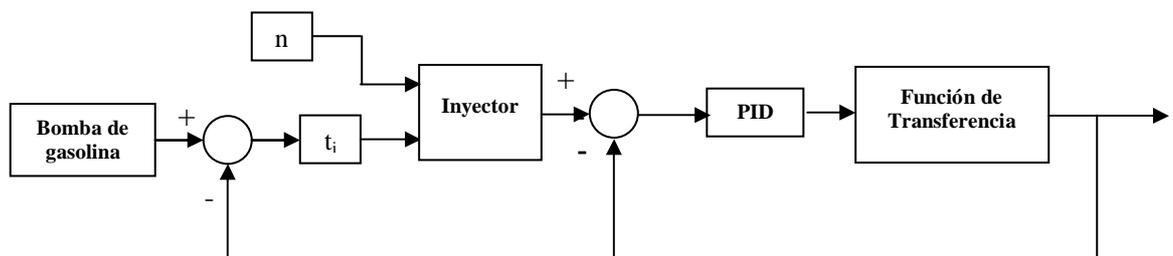


Figura 2.12: Modelo del sistema en lazo cerrado.

2.11 Análisis del Modelo del Sistema.

Antes de continuar con el análisis del modelo del sistema, cabe señalar que para el análisis de sistemas existen dos tipos de modelados:

- El Modelado analítico consiste en obtener los datos de la planta y sus componentes, así como su respuesta por medio de una función transferencial de orden n , la cual nos dará una idea de los cambios que se obtienen, así como los valores ideales para la calibración de los componentes del control.
- El Modelado gráfico o de simulación llamado también experimental, en el cual se obtienen las características de los distintos componentes del sistema, los cuales se van modelando y se obtiene la respuesta de forma gráfica, percibiendo el comportamiento del sistema de manera visual, sin embargo se limita solamente a sistemas sencillos y con una respuesta conocida, tales como nuestro sistema que es de primer orden.

En la práctica, por lo general se utiliza una combinación de ambos métodos.

Para estudiar nuestro sistema, se utilizó una combinación de ambos métodos.

La parte mecánica se analizó de modo gráfico o experimental, variando los datos de entrada, para obtener una respuesta que se acerca al comportamiento real de este subsistema.

Con el método analítico se obtuvo la parte dinámica del sistema, encontrando una función de transferencia que describe la dinámica del mismo.

En nuestro sistema cabe aclarar que, debido a la conformación del mismo estamos utilizando un método de control indirecto, es decir estamos controlando el caudal de

gasolina que ingresa en el cilindro mediante una relación entre el caudal y las rpm, las cuales usamos como set point.

2.11.1 Análisis de la Respuesta del Sistema.

La respuesta del sistema en la simulación, es la de la figura 2.13, en la cual se observa que es relativamente estable, mostrando un tiempo de establecimiento rápido.

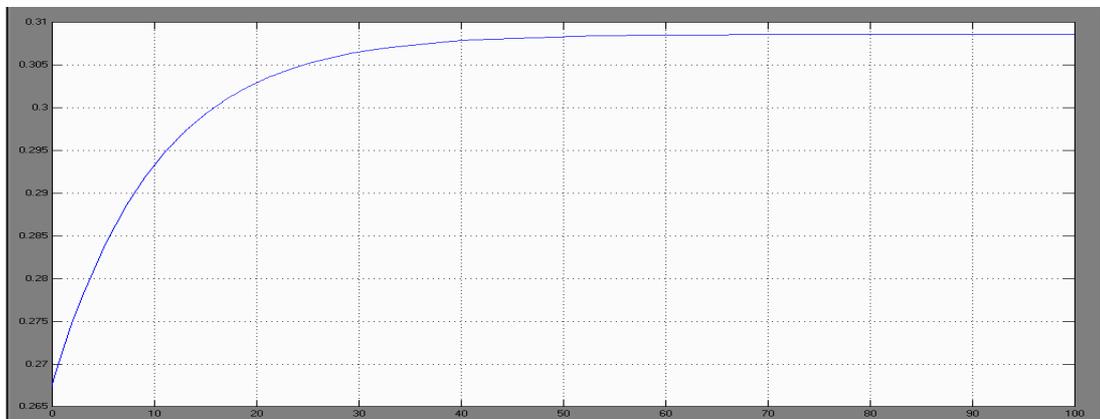


Figura 2.13: Simulación del sistema a 2200 RPM.

Con una entrada de, por ejemplo 2200 rpm; se puede observar gráficamente que el comportamiento del sistema nos indica que se trata de un sistema de primer orden.

2.11.2 Introducción del Controlador en el Sistema.

Para el control del sistema se utilizó un control PI, ya que es suficiente para sistemas donde la dinámica es esencialmente de primer orden.

Tal como se explicó en la teoría sobre el controlador PI, éste cambia la dinámica del sistema y aumenta el rechazo a perturbaciones.

Que la dinámica del sistema se altere puede ser una ventaja o desventaja, para lo cual el controlador debe ser calibrado a los valores adecuados para obtener la respuesta que se desea.

Con la incorporación del controlador PI sin calibrar, es decir con valores usados como punto de partida los cuales son: $P = 1$, $I = 1$, se obtuvo una respuesta como se muestra en la figura 2.14, para un valor de 2200 rpm:

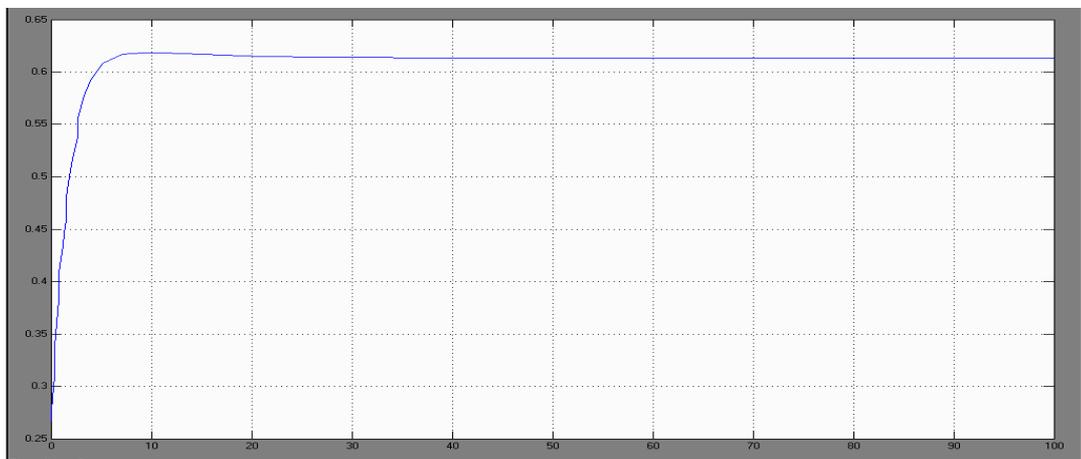


Figura 2.14: Simulación del sistema con Controlador PI sin calibrar.

Realizando un acercamiento en el eje Y, podemos observar claramente la respuesta con este valor de PI, así:

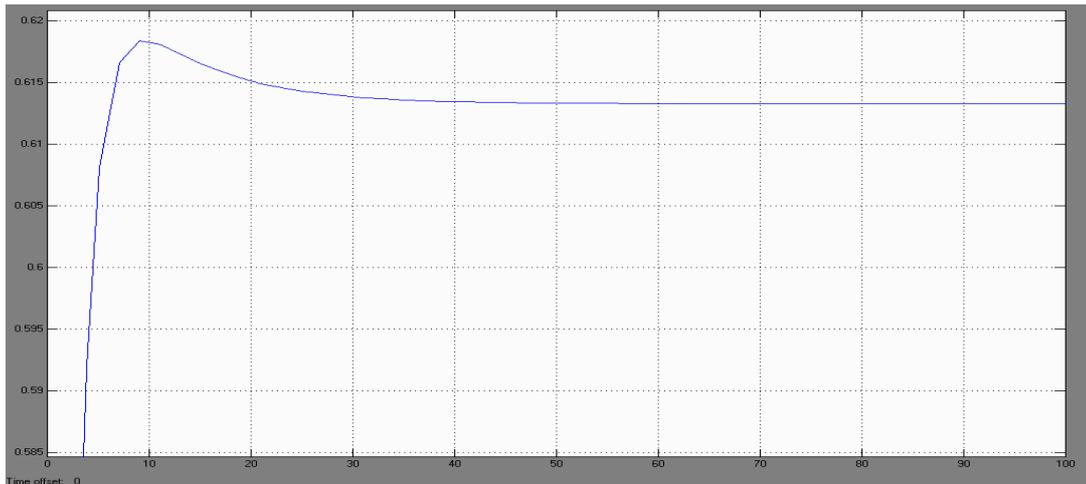


Figura 2.15: Acercamiento del sistema con Controlador PI sin calibrar.

Lo cual nos indica un punto de estabilización alrededor de los 60ms como se observa en el gráfico 2.15, sin embargo se nota el sobre-pico producto de la parte integral del controlador, el mismo que permanece dentro de un rango que no altera las propiedades del sistema.

Aún así la respuesta del sistema con el controlador PI sin calibrar, es bastante buena.

El control proporcional integral combina las ventajas de la acción proporcional y de la acción integral; la acción integral elimina el error estacionario mientras que la acción proporcional reduce el riesgo de inestabilidad que implica la introducción de la acción integral.

Aumentando la constante proporcional se observó que la respuesta se hacía más lenta, es decir, que el tiempo de establecimiento es mayor. Al aumentar la constante integral, la respuesta se hacía más rápida, siendo menor el tiempo de establecimiento, pero se producía un sobre-pico en la respuesta del sistema. Para calibrar el

controlador, las dos constantes tienen que variarse de modo que la respuesta se ajuste a nuestras necesidades, teniendo cuidado de no aumentar demasiado las constantes PI, para evitar producir oscilaciones que causen inestabilidad en el sistema.

Realizando las variaciones respectivas en los valores de P e I, para obtener la respuesta del sistema que más se acerque a los requerimientos, se observó la grafica siguiente:

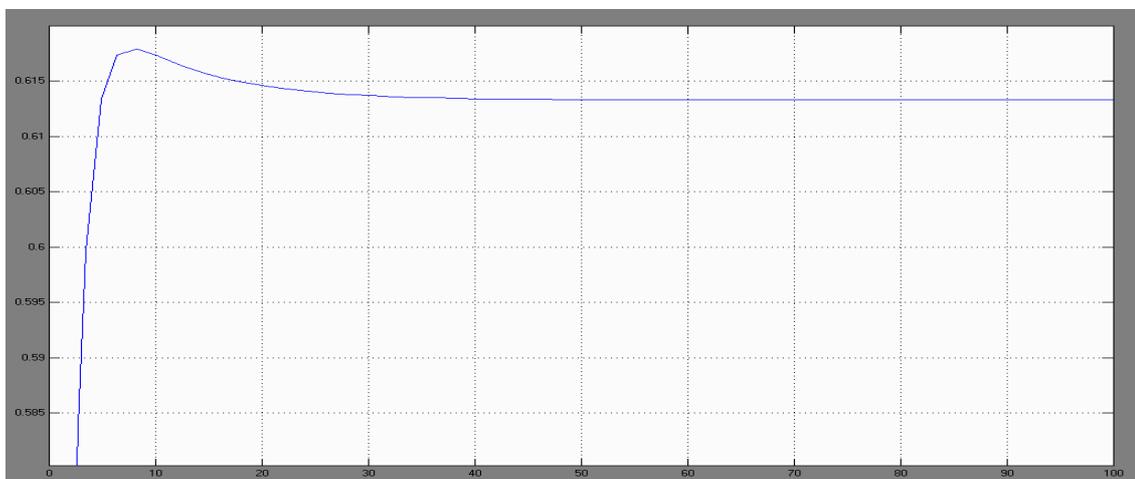


Figura 2.16: Simulación del sistema con Controlador PI calibrado.

En el gráfico podemos observar que el tiempo de establecimiento se redujo hasta alcanzar los 40ms, con lo que el sobre-pico aumentó un poco más que en la respuesta anteriormente obtenida, aunque permaneciendo dentro de un rango aceptable.

El sistema reacciona de mejor manera con un controlador ajustado en los siguientes valores:

$$P = 1$$

$$I = 1.3$$

Se observó que al introducir el término derivativo dentro del controlador, presenta problemas de inestabilidad, por lo que fue desechada su utilización dentro del controlador de sistema.

La introducción de los valores de corrección en el controlador PI, permite una mejora significativa en el control, sin complicar el modelo y sin necesidad de ajustes adicionales, ya que una vez determinada las ganancias tanto de P como de I, estas no deben variar.

Mediante el método de tanteo se sintonizó el controlador variando los valores de P e I, pero teniendo en cuenta el siguiente criterio:

Controlador	Tiempo Crecimiento	Sobrepico	Tiempo Establecimiento	Error Estado Estable
K_p	Disminuye	Aumenta	Poco cambio	Disminuye
K_i	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Elimina
K_d	Poco cambio	Disminuye	Disminuye	Poco cambio

2.11.3 Análisis del Sistema introduciendo una Perturbación.

Ahora, el mismo sistema será sometido a una perturbación externa, la cual fue simulada por un escalón, y se obtuvo una respuesta como a continuación se observa:

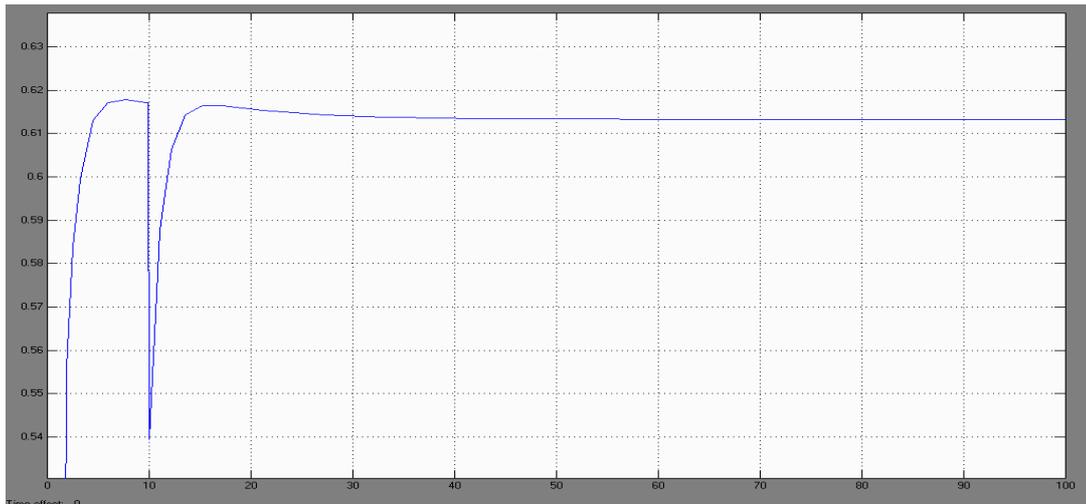


Figura 2.17: Simulación del sistema con Perturbación.

Al caudal de gasolina que entra en el cilindro, se le fue restado un valor de 0.2 equivalente a una perturbación, simulando una pérdida de presión en el colector de admisión y que podría ser tomada también como una falla en la mariposa del acelerador permitiendo un mayor ingreso de aire, empobreciendo la mezcla, obligando al sistema a un reajuste del caudal de inyección.

La figura 2.17 nos muestra claramente que el sistema compensa las pérdidas producidas y reacciona de forma rápida hasta regresar al valor deseado, con un tiempo de establecimiento cercano a 60ms.

El sistema no se probó con la suma de un valor de perturbación, debido a que por la forma del conducto de admisión no permite sumar otro tipo de caudal (diferente del aire) al que está ingresando al cilindro.

2.11.4 Análisis de Polos y Ceros.

A continuación procedemos con el análisis de los polos y ceros del sistema, pero para poder realizar el análisis necesario primero debemos conocer que son y que nos indica el análisis de los polos y ceros de un sistema.

2.11.4.1 Polos.

Los polos de un sistema nos indican si dicho sistema es estable o inestable, por estabilidad entenderemos el hecho de que un sistema, después de experimentar alguna perturbación tienda a un nuevo estado estacionario, pero si el sistema no tiende hacia ningún estado estacionario se dice que el sistema es inestable. Los polos son los valores de s para los cuales la función se hace infinita (o su inversa cero). Un sistema lineal es estable solamente si la parte real de todos los polos del sistema son menores que cero.

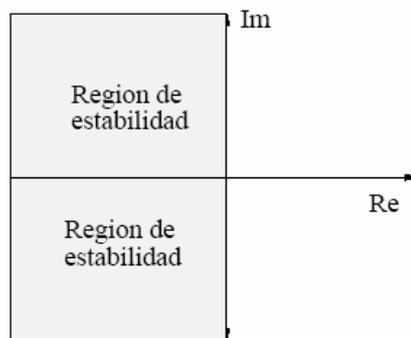


Figura 2.18: Región de Estabilidad.

El cálculo de los polos nos indica también la velocidad de respuesta dinámica del sistema, por ejemplo, si el polo se encuentra en una posición más alejada del eje imaginario, la respuesta dinámica del sistema es más lenta, y, por el contrario a

medida que el polo se acerca más al eje imaginario la respuesta dinámica resulta más rápida, esta tendencia se explica en la siguiente figura.

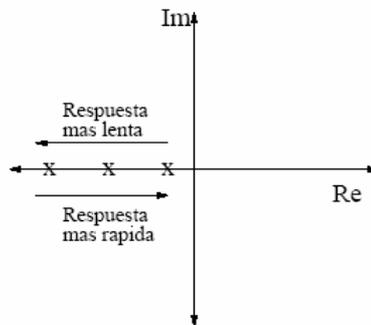


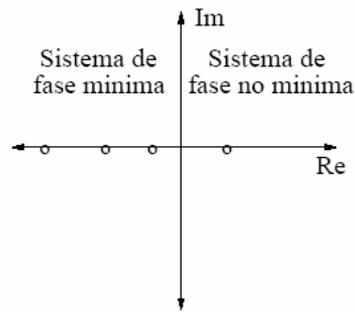
Figura 2.19: Respuesta de velocidad de un sistema lineal en relación con la ubicación de sus polos.

En el análisis realizado del sistema de inyección propuesto, no es necesario el cálculo de los polos, debido a que las características de estabilidad y velocidad de respuesta son fácilmente apreciables en la demostración.

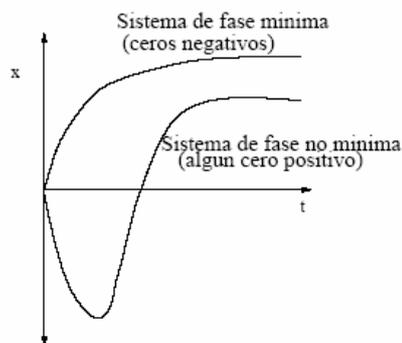
Y luego del análisis gráfico se concluye que el sistema es **ESTABLE**, por lo que sabemos que el valor de sus polos es negativo y cae en la región de estabilidad antes mencionada.

2.11.4.2 Ceros.

Los ceros de un sistema lineal son los valores de la variable para los cuales la función se anula, es decir que el análisis de los ceros nos indica si un sistema es de “fase mínima” o de “fase no mínima”.



Los sistemas de fase mínima poseen una característica de la respuesta especial en la que la pendiente de dicha respuesta jamás cambia de signo, es decir que si la parte real de todos los ceros de un sistema es negativa, la respuesta del sistema siempre llevará el mismo sentido y por el contrario, si al menos uno de los ceros del sistema posee una parte real positiva entonces la respuesta del sistema cambia en algún momento de signo, es por esta razón que a estos sistemas se los conoce como de respuesta inversa, es decir que el sentido inicial de la respuesta es el inverso del de la respuesta final.



De la misma manera es posible concluir que el presente sistema es de fase mínima porque en ningún momento se produce el cambio de signo de la pendiente de la respuesta, como se observa claramente en la demostración.

Capítulo 3

Controller Area Network (CAN)

Introducción

El protocolo CAN fue creado a mediados de 1980, inicialmente fue impulsado por el fabricante alemán Bosch para simplificar el cableado y disminuir los costos de cableado entre dispositivos dentro de automóviles Mercedes Benz; así una de las aplicaciones donde se utiliza mas ampliamente es en automoción, donde existe gran cantidad de electrónica asociada a los elementos instalados tanto en el motor como en el resto del vehículo (airbag, cinturones de seguridad, climatización, iluminación etc.), y es necesario el acceso distribuido, por lo que CAN proporciona una buena implementación para la comunicación entre estos elementos; se difundió posteriormente a otras áreas, por ejemplo control de plantas industriales, control de ascensores, control de sistemas de navegación, etc.

El sistema computarizado de los vehículos ha evolucionado desde una computadora que controla todo a un conjunto de computadoras, cada una con su propia área de responsabilidad; esto implica cambiar la forma en que una computadora se comunica con cada una de las otras para compartir información de los procesos que están controlando. La solución la ofrece CAN el protocolo que permite a los fabricantes implementar en forma rápida y eficiente la interoperabilidad de las computadoras.

En el pasado, los protocolos usados por los fabricantes de autos fueron exclusivos por marca; ello terminó en 1996 con la aplicación de la norma OBD-II en USA, la

cual obligó a los fabricantes a seleccionar entre 4 diferentes protocolos de Comunicación: J1859-PWM, J1850-VPW, ISO-9141 e ISO-14230. Aunque brindo muchas ventajas, el uso de 4 diferentes protocolos continúa ocasionado complicaciones en los procesos de inspección, mantenimiento y reparación de vehículos. El Protocolo CAN fue integrado a la normatividad OBD-II por el comité de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) y lo aceptaron como el Protocolo de Diagnóstico estandarizado para los Fabricantes de vehículos; adicionalmente, el Comité de Calidad del Aire (CARB) aceptó el Protocolo y lo promovió obligatorio para todos los vehículos. Los fabricantes de autos empezaron implementando CAN en el año 2003 y continuarán ampliándolo a todos sus vehículos, para una aplicación total a mas tardar al año 2008.

3.1 CAN (Controller Area Network).

CAN es un Protocolo de comunicación serial, el cual soporta eficientemente el control en tiempo real de sistemas distribuidos, con un muy alto nivel de seguridad; actualmente está siendo usado por automóviles de Volkswagen, Ford, General Motors, Mercedes Benz, Mazda etc. y será obligatorio para todos los autos a partir del 2008. CAN es un puerto de datos de alta velocidad que opera 50 veces más rápido que los protocolos usados en los vehículos actuales; esta velocidad, combinada con los nuevos parámetros definidos para CAN, da a los técnicos la habilidad de ver los datos más rápidamente y tener mayor acierto en el diagnóstico.

Entre sus fortalezas el bus CAN considera una arquitectura multimaestra capaz de proveer características de respuesta en tiempo real y tolerancia a fallas en la recepción de mensajes y mal funcionamiento de los nodos; además CAN está estructurado de acuerdo con el modelo OSI en una arquitectura de dos capas esto es, capa física y capa de enlace de datos. Tiene múltiples soluciones del software que se coloca encima de estas dos capas, bajo la forma de High Level Protocol o protocolo de alto nivel como suelen denominarse, las más importantes son las de CAN Application layer CAL/CaNopen desarrollada por CiA (CAN in Automación), DeviceNet desarrollada por Allen Bradley y soportada por la ODVA, SDS: Smart Distribución System desarrollado por Honeywell. La capa física y la de enlace, sin embargo no definen el tipo de acceso al medio, por lo que pueden encontrarse por ejemplo, sistemas que utilizan el estándar RS-485 modificado, y otros que utilizan circuitos específicamente diseñados.

Una de las características que distingue a CAN con respecto a otras normas, es su técnica de acceso al medio denominada como CSMA/CD+CR o "Carrier Sense, Multiple Access/Colission Detection + Collision Resolution" (Acceso múltiple con detección de portadora, detección de colisión más resolución de colisión); esto significa que, cada nodo de la red debe monitorear la inactividad en el bus, para poder intentar enviar un mensaje (Carrier Sense); una vez que este periodo de inactividad ocurre, cada nodo del bus tiene una igual oportunidad para transmitir un mensaje (Multiple Access); si dos nodos comienzan a transmitir al mismo tiempo, la red detecta la colisión y realiza una acción apropiada.

En un bus CAN los nodos transmiten la información espontáneamente con tramas de datos, bien sea por un proceso cíclico o activado ante eventos en el nodo; los mensajes pueden entrar en colisión en el bus, el de identificador de mayor prioridad sobrevivirá y los demás son retransmitidos lo antes posible. El protocolo CAN utiliza el método de arbitraje no destructivo, en el cual el mensaje que no se envió queda intacto, para luego del arbitraje ser enviado, incluso si fueron detectadas colisiones, sin que se produzca demoras o corrupción de datos para el mensaje de más alta prioridad.

El método de arbitraje no destructivo requiere:

- 1) Definir el estado lógico para el bit dominante y el bit recesivo.
- 2) El nodo que esta transmitiendo debe monitorear el estado del bus para ver si el estado lógico que esta intentando enviar aparece en el bus.

CAN define al “0” lógico como el bit dominante, y al “1” lógico como el bit recesivo.

El protocolo CAN trabaja según el principio “Multimaestro”, en el cual varias unidades de control equivalentes están unidas entre si mediante una estructura de bus lineal como se muestra en la figura 3.1, mientras que en estructuras anulares o en estrella, el fallo de una unidad, o de la unidad central conduce a un fallo total.

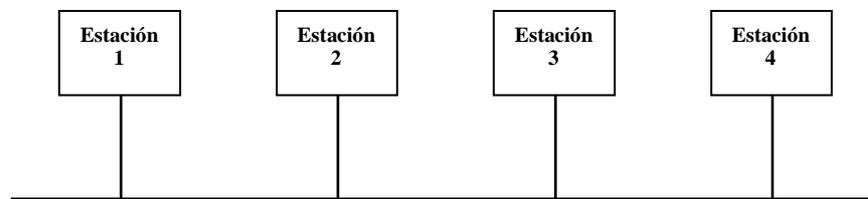


Figura 3.1: Estructura de Bus lineal.

Esta estructura presenta la ventaja de que cuando falla una unidad, el sistema continúa estando plenamente a disposición de las otras unidades. En comparación con otras disposiciones lógicas se reduce considerablemente la probabilidad de fallo total.

3.2 La Red CAN y el Modelo OSI.

El modelo OSI es la propuesta que hizo la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), para normalizar la interconexión de sistemas abiertos. Un sistema abierto se refiere a que es independiente de una arquitectura específica. Se compone el modelo, por tanto, de un conjunto de estándares ISO relativos a las comunicaciones de datos. El modelo en sí mismo no puede ser considerado una

arquitectura, ya que no especifica el protocolo que debe ser usado en cada capa, sino que suele hablarse de que es un modelo de referencia.

Este modelo está dividido en siete capas como se muestra en la Figura 3.2:

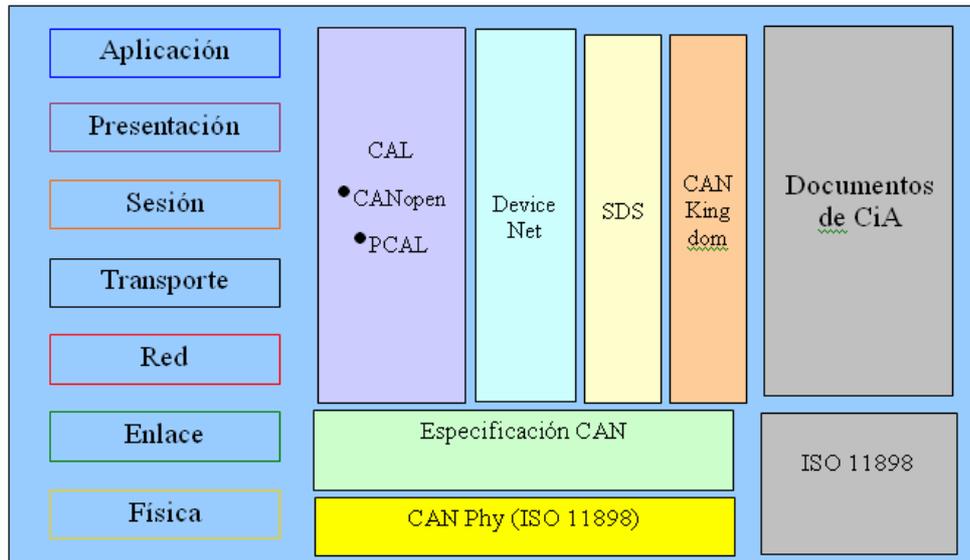


Figura 3.2: Estructura del Modelo OSI.

Distintas opciones están disponibles para la capa de aplicación como: CiA CAN Application Layer, CANOpen, SDS (Smart Distributed System), DeviceNet y CAN Kingdom.

Capa de Aplicación.	Es el último nivel de la capa, el que aloja el programa de red que interactúa con el usuario.
Capa de Presentación.	Maneja los datos de la aplicación y los acomoda en un formato que pueda ser transmitido en una red.
Capa de Sesión.	Establece conexiones lógicas entre puntos de la red.
Capa de Transporte.	Maneja la entrega entre un punto y otro de la red de los mensajes de una sesión.
Capa de Red.	Maneja destinos, rutas, congestión de rutas, alternativas de enrutamiento.
Capa de Enlace de datos.	Entrega los datos entre un nodo y otro en un enlace de red.
Capa Física.	Define la conexión física de red.

3.3. Conceptos del Bus CAN.

3.3.1 Capa Física.

La Capa Física es la que se encarga de las conexiones físicas de la computadora hacia la red, tanto en lo que se refiere al medio (cable conductor, fibra óptica o inalámbrico); características del medio (tipo de cable o calidad del mismo); tipo de conectores (normalizados o en su caso tipo de antena; etc.) como a la forma en la que se transmite la información (codificación de señal, niveles de tensión/corriente eléctrica, modulación, tasa binaria, etc.), velocidad de transmisión, si esta es uni o bidireccional (simplex, duplex o full-duplex).

El medio físico es una línea de bus de dos hilos (CANH y CANL) con un retorno común que es terminada en ambos extremos por resistencias que representan la impedancia característica de la línea. Los cables del bus pueden ser paralelos, trenzados y/o blindados, dependiendo de requerimientos de la capacidad electromagnética. La topología del bus es derivaciones de corta longitud, es decir los segmentos del cable para la conexión de los nodos del bus deben ser tan cortos como sea posible, especialmente en tasas altas de bit.

En la especificación original de CAN, la capa física no fue definida, permitiendo diferentes opciones para la elección del medio y niveles eléctricos de transmisión. Las características de las señales eléctricas en el bus fueron establecidas más tarde por el estándar ISO 11898.

La especificación CiA, complementó las definiciones respecto al medio físico y conectores. Los nodos conectados al bus interpretan dos niveles lógicos denominados:

- **Dominante:** la tensión diferencial (CAN High – CAN Low) es del orden de 2 V con CAN High = 3.5V y CAN Low = 1.5V (nominales).
- **Recesivo:** la tensión diferencial (CAN High – CAN Low) es del orden de 0V con CAN High = CAN Low = 2.5V (nominales).

En la figura 3.3 se muestra los valores de velocidad de transmisión en función de la longitud de red del bus, utilizando como medio conductor el par trenzado apantallado.

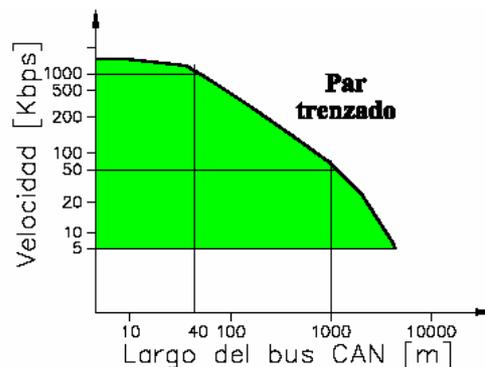


Figura 3.3: Velocidad de transmisión vs largo de red.

En la tabla 3.1 se muestra valores orientativos que varían dependiendo de la tolerancia de los osciladores de los nodos, impedancias y retardos en la línea etc. ISO 11898 especifica distancia máxima 1 kilómetro y permite usar puentes o repetidoras.

Longitud del bus	Cable del bus		Resistencia de terminación del bus	Máxima tasa de datos
	Resistencia	Cable		
0 - 40 m	70 m Ω /m	0.25 -0.34 mm ² AWG23, AWG22	124 Ω	1 Mbit/s
40 – 300m	<60 m Ω /m	0.34 -0.6 mm ² AWG22, AWG20	127 Ω	500 Kbit/s
300 – 600 m	<40 m Ω /m	0.5 -0.6 mm ² AWG23, AWG22	150 a 300 Ω	100 Kbit/s
600 – 1 Km.	<26 m Ω /m	0.75 -0.8 mm ² AWG18	150 a 300 Ω	50 Kbit/s

Tabla 3.1: Correlación entre la velocidad de transferencia, longitud del bus, material del bus e impedancia de la terminación.

La distancia máxima es definida por:

- Demora de los nodos y del bus.
- Diferencias entre el bit time quantum debidas a la diferencia entre los osciladores de los nodos.
- Caída de señal por resistencia de cable y nodos.

El número máximo de nodos no está limitado por la capa física y depende de las características de los transceptores, las especificaciones de buses de campo lo limitan a 32 o 64 en una red sin repetidores.

La capa física se encarga de transformar una trama de datos proveniente del nivel de enlace en una señal adecuada al medio físico utilizado en la transmisión. Esta

señal puede ser eléctrica (transmisión por cable), electromagnética (infrarrojo, de micro-ondas o radio etc.). Cuando actúa en modo recepción el trabajo es inverso; se encarga de transformar la señal transmitida en tramas de datos binarios que serán entregados al nivel de enlace.

3.3.2. Capa de Enlace.

Este nivel proporciona facilidades para la transmisión de bloques de datos entre dos estaciones de red; esto es, organiza los 1's y los 0's del nivel físico en formatos o grupos lógicos de información. A partir de cualquier medio de transmisión debe ser capaz de proporcionar una transmisión sin errores; debe crear y reconocer los límites de las tramas, así como resolver los problemas derivados del deterioro, pérdida o duplicidad de las tramas; también debe incluir algún mecanismo de regulación del tráfico que evite la saturación de un receptor que sea más lento que el emisor.

El acceso al medio por medio de técnicas de acceso múltiple y detección de colisión evolucionaron desde el método ALOHA inicial hasta su consagración como método de acceso al medio de las redes Ethernet, con técnica CSMA/CD. El método de acceso al medio utilizado en bus CAN añade una característica adicional: la resolución de colisión. En la técnica CSMA/CD utilizada en redes Ethernet ante colisión de varias tramas, todas se pierden, CAN resuelve la colisión con la supervivencia de una de las tramas que chocan en el bus; además la trama superviviente es aquella a la que se ha identificado como de mayor prioridad.

La resolución de colisión se basa en una topología eléctrica que aplica una función lógica AND, la cual se resuelve con la prioridad del nivel definido como bit de tipo dominante. Cada transmisor monitorea continuamente el valor presente en el bus, y se retira cuando ese valor no coincide con el valor que fue enviado; mientras hay coincidencia la transmisión continua, si existe algún problema, el mensaje con identificador de máxima prioridad sobrevive; los demás nodos reintentarán la transmisión lo antes posible.

Esta técnica aporta la combinación de dos factores muy deseados en aplicaciones industriales distribuidas: la posibilidad de fijar con determinismo la latencia en la transmisión de mensajes entre nodos y el funcionamiento en modo multimaestro sin necesidad de gestión del arbitraje, es decir control de acceso al medio, desde las capas de software de protocolo. Se ha de tener en cuenta que la especificación CAN de Bosch no establece cómo se ha de traducir cada nivel de bit (dominante o recesivo) a variable física. Cuando se utiliza par trenzado según ISO 11898 el nivel dominante es una tensión diferencial positiva en el bus, el nivel recesivo es ausencia de tensión, o cierto valor negativo.

La prioridad del mensaje se determina por el contenido del mismo, en CAN es un campo determinado, y el identificador de mensaje es el que determina la prioridad.

3.3.3. Implementación de CAN.

Existen dos implementaciones de hardware básicas, aunque la comunicación en ambas es idéntica y son compatibles entre sí; esto permite administrar el uso del bus

en función de las necesidades de cada nodo. Los dispositivos CAN están generalmente formados por dos bloques, uno de ellos es el controlador del protocolo propiamente dicho y el segundo es una memoria buffer separado en dos segmentos, uno de control y otro de datos a los que accede normalmente un microcontrolador; en el segmento de control el microcontrolador escribe comandos y lee registros de estado, y en el de datos obtiene el contenido del mensaje.

Un controlador, recibe de la unidad de mando los datos que han de ser transmitidos, los acondiciona y los envía al transceptor CAN; a su vez, recibe los datos del transceptor CAN, los acondiciona y los pasa al microprocesador de la unidad de control. El transceptor transforma los datos del controlador CAN y los pasa a los cables del CAN-BUS; asimismo, recibe los datos y los transforma para el controlador CAN. Dos resistencias como elementos finales del bus evitan que los datos sean devueltos en forma de eco de los extremos de los cables y que se falsifiquen estos. El valor óhmico de las resistencias, normalmente, es de 120 ohmios, pero también existen modelos en los que el valor nominal es de 66 ohmios.

Dos cables para la transmisión de datos funcionan de forma bidireccional y a través de ellos se realiza la transmisión de datos, se denominan CAN-High (señales de nivel lógico alto) y CAN LOW (señales de nivel lógico bajo).

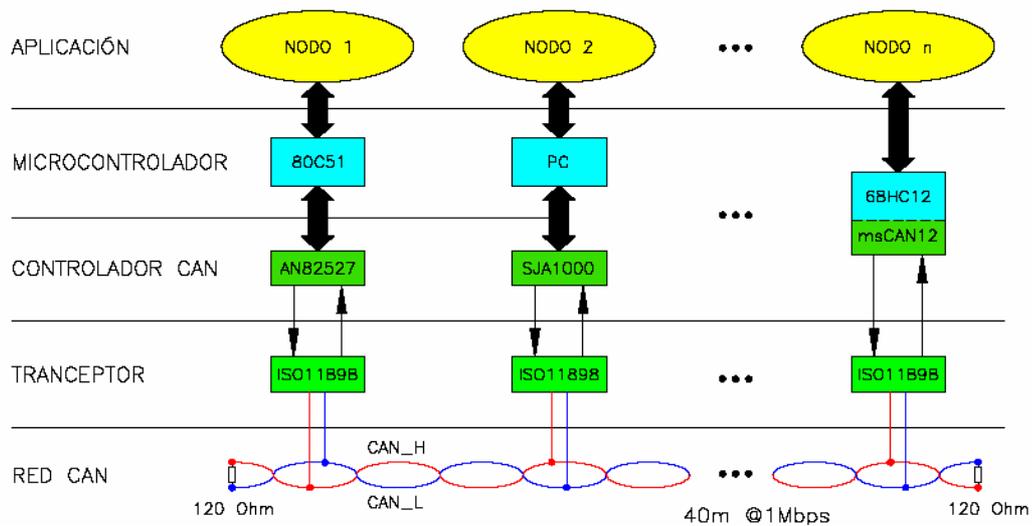


Figura 3.4: Estructura de una red CAN.

El tipo de buffer empleado da lugar a dos implementaciones diferentes:

- **Basic CAN:** El dispositivo suele tener un buffer doble de recepción y uno de transmisión así como registros de máscara que permiten filtrar identificadores en el rango de los 8 bits más significativos, tras lo cual se interrumpe al microcontrolador asociado, que debe dejar otras tareas para gestionar la llegada de cada mensaje.
- **Full CAN:** Tienen capacidad para gestionar varios objetos CAN y otras funciones adicionales como por ejemplo filtrado de mensajes, liberando la carga sobre el microcontrolador; los objetos CAN están compuestos por un identificador, la longitud de los datos y los datos en sí; los circuitos que soportan Full CAN intercambian la información con el microcontrolador a través de una RAM, además contiene dispositivos hardware adicionales que proporcionan un servidor que automáticamente recibe y transmite los

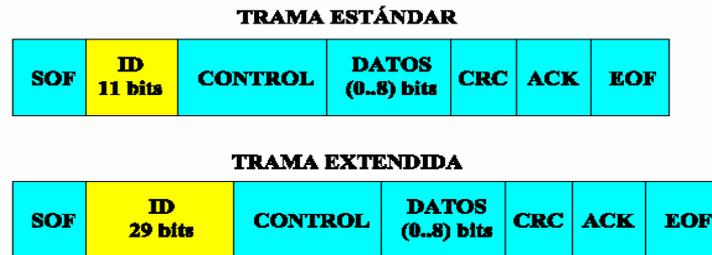
mensajes CAN, sin necesidad de interrumpir al microcontrolador asociado, reduciéndose la carga del mismo; está orientado a nodos encargados del manejo de señales con un alto nivel de exigencia en cuanto a frecuencia de actualización y/o seguridad.

3.3.4. Especificación CAN 2.0A y CAN 2.0B

En ISO/OSI están descritos las Capa 1 y Capa 2 en la norma internacional ISO 11519-2 para las aplicaciones de velocidad bajas e ISO 11898 para las aplicaciones de velocidad altas. La descripción de ISO/OSI sobre especificación de CAN 2.0A y 2.0B están mas orientada a los requisitos de fabricación de controladores CAN.

La diferencia entre CAN 2.0A y CAN 2.0B se localiza básicamente sobre todo en el formato del encabezado del mensaje del identificador. La especificación CAN 2.0A define sistemas CAN con un estándar de 11 bit del identificador (CAN estándar), CAN 2.0B especifica la trama extendida con 29 bit en el identificador (CAN Extendido)

El mensaje está dividido en siete campos diferentes mostrados en la Figura 3.5, cada uno de ellos con una función específica.



Estándar: Largo del Identificador es de 11 bits: 2048 Identificadores posibles.

Extendido: Largo del Identificador es de 29 bits: más de 536 millones de Identificadores posibles.

Figura 3.5: Campos del mensaje.

Los mensajes transmitidos desde cualquier nodo en una red CAN no contienen la dirección del nodo emisor ni la del nodo receptor; en vez de esto los mensajes contienen una etiqueta identificativa única en toda la red, que realiza esa función; esta etiqueta identificadora determina la prioridad del mensaje. El mensaje de mayor prioridad gana el acceso al bus, mientras que los mensajes de menor prioridad se retransmitirán automáticamente en los siguientes ciclos de bus; como consecuencia de esto, varios nodos pueden recibir y actuar simultáneamente sobre el mismo mensaje.

Esta estructura de los mensajes ofrece a la red una gran flexibilidad y posibilidad de expansión, ya que nuevos nodos pueden ser añadidos a la red sin la necesidad de hacer ningún cambio en el hardware ni en el software existente.

Las tramas de los mensajes son los elementos básicos de transmisión y van de un nodo emisor a uno o varios nodos receptores.

3.4 Mensajes y Tipos de Tramas.

CAN utiliza mensajes de estructura predefinida, tramas, para la gestión de la comunicación.

Durante este trabajo se hará referencia sobre todo a CAN Estándar, en todo caso las diferencias con CAN Extendido son mínimas, excepto la posibilidad de contar con un número mucho mayor de identificadores disponibles.

3.4.1 Trama de Datos.

Una trama de datos es generada por un nodo CAN cuando transmite información; puede incluir entre 0 y 8 bytes de información útil.

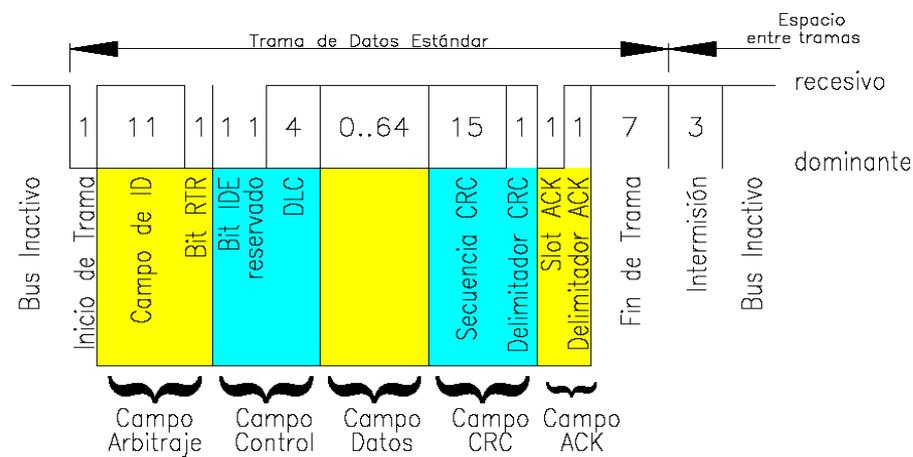


Figura 3.6: Estructura de la Trama de datos.

Una trama de datos está compuesta de siete campos de bits diferentes:

3.4.1.1 Inicio de Trama (SOF): El inicio de trama es un campo de un solo bit siempre dominante que indica el inicio de la transmisión; los nodos receptores se sincronizan con el flanco de bajada de este bit.

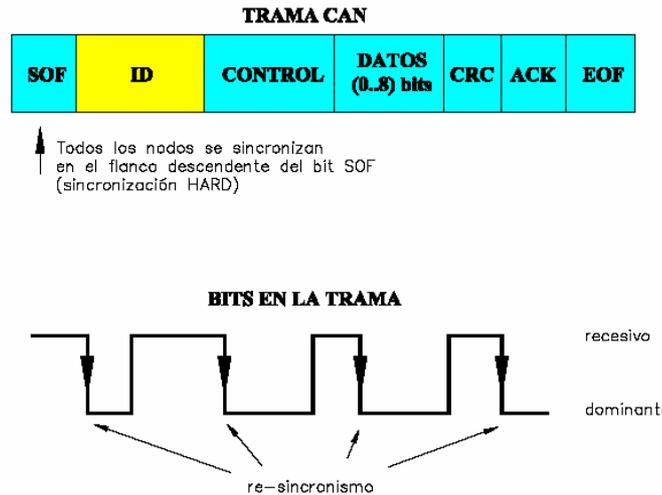


Figura 3.7: Inicio de Trama.

3.4.1.2 Campo de Arbitraje: El campo de arbitraje está formado por el identificador de mensaje (11 bits), más el bit RTR (Requerimiento de Transmisión Remota); en una trama de datos el bit RTR es dominante, mientras que en una trama remota es recesivo. Los bits de identificador se transmiten en orden de más a menos significativo.

La especificación de Bosch admite para CAN Standard los identificadores en el rango 0x000 a 0x7EF; en dicha especificación se indica que los 7 bits más significativos no han de ser todos recesivos, sin embargo muchos controladores admiten el rango 0x000 a 0x7FF, un mensaje de máxima prioridad utilizará, por tanto, el identificador 0x000.

CAN usa un bit inteligente arbitrario como método de resolución de colisiones; todos los receptores en la red de trabajo CAN sincronizan la transmisión desde el periodo dominante representado por un bit en la estructura de arranque. El ganador de un arbitraje entre dos nodos que transmiten simultáneamente es el numerado mas bajo identificado con el bit 11.

El Campo de Arbitro es utilizado para facilitar el Acceso de Comunicación; cuando un dispositivo transmite, los receptores también lo envían de regreso para asegurarse que es la misma información; CAN usa un único mecanismo arbitrario de bit inteligente no destructivo; esta cualidad específica permite la solución a los problemas de colisión (determinando un "ganador") sin la perdida de rendimiento o el reenvío de datos por la alta prioridad del nodo.

Un nodo transmisor monitorea constantemente el estado del bus durante la transmisión del campo Arbitraje, la detección de un bit dominante cuando el bit transmitido ha sido recesivo, hace que el nodo detenga la transmisión y pase a recepción de la trama; de esta forma no hay pérdida de información y no se destruye por colisión ninguna trama de datos o remota.

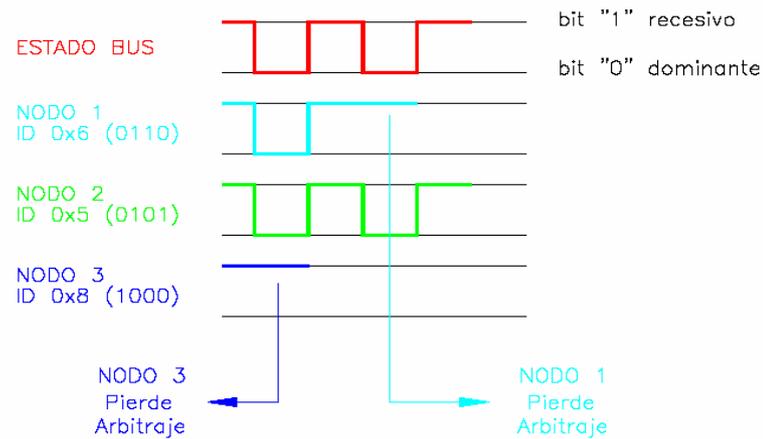


Figura 3.8: Arbitraje del bus CAN.

En un bus único un identificador de mensaje ha de ser asignado a un solo nodo concreto, es decir, se ha de evitar que dos nodos puedan iniciar la transmisión simultánea de mensajes con el mismo identificador y datos diferentes. Las tramas remotas con identificador concreto que puedan ser generadas por cualquier nodo han de coincidir en cuanto al campo longitud, definiendo un mensaje como el conjunto identificador, más la longitud de campo de datos, más la semántica de estos datos; el mensaje ha de ser único en el sistema y estar asignado a un nodo concreto; así, por ejemplo, si en un automóvil existe la variable "presión de aceite" esta variable ha de ser transmitida por un nodo concreto, con un identificador concreto, con longitud fija y consistente con la codificación de la información en el campo de datos.

3.4.1.3 Campo de Control: El campo de control está formado por dos bits reservados para uso futuro y cuatro bits adicionales que indican el número de bytes de datos; en realidad el primero de estos bits (IDE) se utiliza para indicar si la trama es de CAN Estándar (IDE dominante) o Extendido (IDE recesivo); el segundo bit

(RB0) es siempre recesivo; los cuatro bits de código de longitud (DLC) indican en binario el número de bytes de datos (0 a 8) en el mensaje.

El tamaño del Byte de 0 al 8 es ideal para dispositivos de bajo nivel con un pequeño conjunto de datos de entradas y salidas que pueden intercambiar frecuentemente; y a 8 Bytes, hay suficiente flexibilidad para dispositivos sencillos para enviar datos de diagnóstico, o para enviar velocidad de referencia y la indicación de aceleración a un variador de frecuencia por ejemplo.

3.4.1.4 Campo de Datos: Es un campo formado por 0 a 8 bytes de datos, es decir 0 a 64 bits en saltos de 8; cada byte se transmite con bit más significativo primero.

3.4.1.5 Campo CRC (Cyclic Redundancy Check): El campo CRC es una redundancia cíclica que verifica la palabra, la cual es usada por el controlador CAN para detectar los errores; esto se procesa desde el bit que viene antes que el. Un bit dominante en la ranura ACK, significa la última recepción antes de que el transmisor escuche la transmisión.

El transmisor genera un código de redundancia cíclica, el cual se produce cuando el transmisor divide en módulo 2 todos los bits precedentes del mensaje, por un polinomio denominado generador, el resto de esta división es el código CRC transmitido; los receptores comprueban este código verificando que el mensaje transmitido es el correcto. Tras el código CRC se incluye un bit recesivo que es delimitador de CRC.

3.4.1.6 Campo de Reconocimiento ACK (Acknowledge): Es un campo de dos bits que el transmisor pone como recesivos; el primero de estos bits se sobrescribe por un bit dominante de reconocimiento transmitido por los nodos que han recibido el mensaje correctamente. El bit de ACK queda así insertado entre dos bits dominantes de delimitación.

3.4.1.7 Fin de Trama (EOF): Este campo es el cierre la trama, consiste en 7 bits recesivos sucesivos.

En un bus CAN pueden convivir nodos CAN Estándar y CAN Extendido, para ello los nodos CAN Estándar han de ser del tipo CAN 2.0B Pasivo, estos nodos reaccionan ignorando tramas de CAN Extendido en lugar de señalarlas como erróneas. Los nodos que cumplen CAN 2.0B pueden funcionar en modo Estándar o Extendido indistintamente.

3.4.2 Trama de Interrogación Remota (Remote frame).

Puede ser utilizada por un nodo para solicitar la transmisión de una trama de datos con la información asociada a un identificador dado; el nodo que disponga de la información definida por el identificador la transmitirá en una trama de datos.

El formato es similar a la trama de datos pero con el bit RTR recesivo; por otra parte una trama remota no incluye nunca datos; el identificador es el del mensaje que se solicita, el campo longitud corresponde a la longitud de ese mensaje. La trama de

interrogación remota sólo se suele utilizar para detección de presencia de nodos o para puesta al día de información en un nodo recién incorporado a la red.

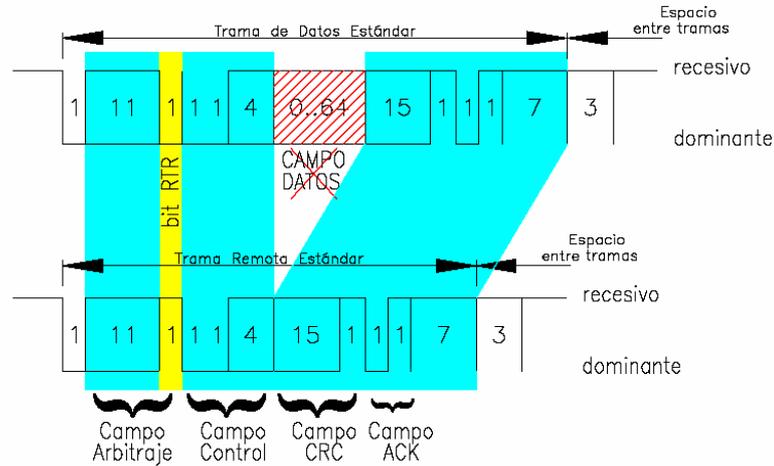


Figura 3.9: Trama de Interrogación Remota.

3.4.3 Tramas de Error.

Son usadas para señalar al resto de nodos la detección de un error, invalidando el mensaje erróneo. Las tramas de error son generadas por cualquier nodo que detecta un error, consisten en dos campos:

- El Delimitador de error consta de 8 bits recesivos consecutivos y permite a los nodos reiniciar la comunicación limpiamente tras el error.
- El Indicador de error ("Error Flag") es distinto según el estado de error del nodo que detecta el error y pueden ser: error activo y error Pasivo.

Si un nodo en estado de error "**Activo**" detecta un error en el bus, interrumpe la comunicación del mensaje en proceso generando un "Indicador de error activo", que consiste en una secuencia de 6 bits dominantes sucesivos, esta secuencia rompe la regla de relleno de bits y provocará la generación de tramas de error en otros nodos,

por tanto el indicador de error puede extenderse entre 6 y 12 bits dominantes sucesivos. Finalmente se espera el campo de delimitación de error formado por los 8 bits recesivos, entonces la comunicación se reinicia y el nodo que había sido interrumpido reintentará la transmisión del mensaje.

Si un nodo en estado de error "**Pasivo**" detecta un error, el nodo transmite un "Indicador de error pasivo", seguido de nuevo por el campo delimitador de error; el indicador de error de tipo pasivo consiste en 6 bits recesivos seguidos, y por tanto, la trama de error para un nodo pasivo es una secuencia de 14 bits recesivos, de aquí se deduce que la transmisión de una trama de error de tipo pasivo no afectará a ningún nodo en la red, excepto cuando el error es detectado por el propio nodo que está transmitiendo; en ese caso los demás nodos detectarán una violación de las reglas de relleno y transmitirán a su vez tramas de error.

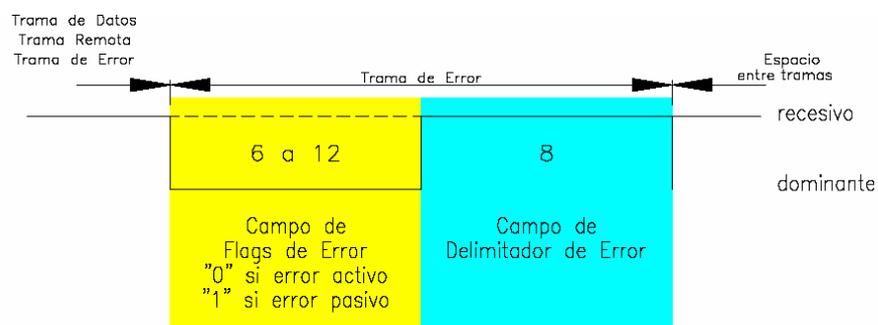


Figura 3.10: Trama de Error.

Tras señalar un error por medio de la trama de error apropiada cada nodo transmite bits recesivos hasta que recibe un bit también recesivo, luego transmite 7 bits recesivos consecutivos antes de finalizar el tratamiento de error.

3.4.4 Trama de Sobrecarga.

Permite que un nodo fuerce a los demás a alargar el tiempo entre transmisión de tramas sucesivas. Una trama de sobrecarga tiene el mismo formato que una trama de error activo, sin embargo la trama de sobrecarga sólo puede generarse durante el espacio entre tramas, de esta forma se diferencia de una trama de error, que sólo puede ser generada durante la transmisión de un mensaje.

La trama de sobrecarga consta de dos campos:

- El indicador de sobrecarga consta de 6 bits dominantes que pueden ser seguidos por los generados por otros nodos, dando lugar a un máximo de 12 bits dominantes.
- El delimitador es de 8 bits recesivos.

Una trama de sobrecarga puede ser generada por cualquier nodo que debido a sus condiciones internas no está en condición de iniciar la recepción de un nuevo mensaje, de esta forma retrasa el inicio de transmisión de un nuevo mensaje. Un nodo puede generar como máximo 2 tramas de sobrecarga consecutivas para retrasar un mensaje; otra razón para iniciar la transmisión de una trama de sobrecarga es la detección por cualquier nodo de un bit dominante en los 3 bits de "intermisión".

Por todo ello una trama de sobrecarga generada por un nodo dará normalmente lugar a la generación de tramas de sobrecarga por los demás nodos dando lugar, como se ha indicado, a un máximo de 12 bits dominantes de indicador de sobrecarga.

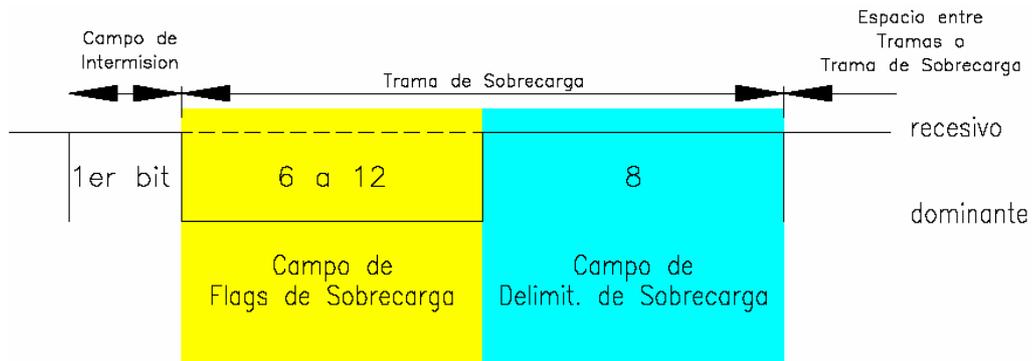


Figura 3.11: Trama de Sobrecarga.

3.4.5 Espaciado Inter-tramas.

Las tramas de datos y de interrogación remota, se separan entre sí por una secuencia predefinida que se denomina espaciado inter-trama o espaciado entre tramas.

El espacio entre tramas separa una trama de cualquier tipo de la siguiente trama de datos o interrogación remota; el espacio entre tramas consta de al menos 3 bits recesivos, esta secuencia de bits se denomina "intermisión"; una vez transcurrida esta secuencia un nodo en estado de error activo puede iniciar una nueva transmisión o el bus permanecerá en reposo, para un nodo en estado error pasivo la situación es diferente, deberá espera una secuencia adicional de 8 bits recesivos antes de poder iniciar una transmisión, de esta forma se asegura una ventaja en el inicio de la transmisión de los nodos en estado activo frente a los nodos en estado pasivo.

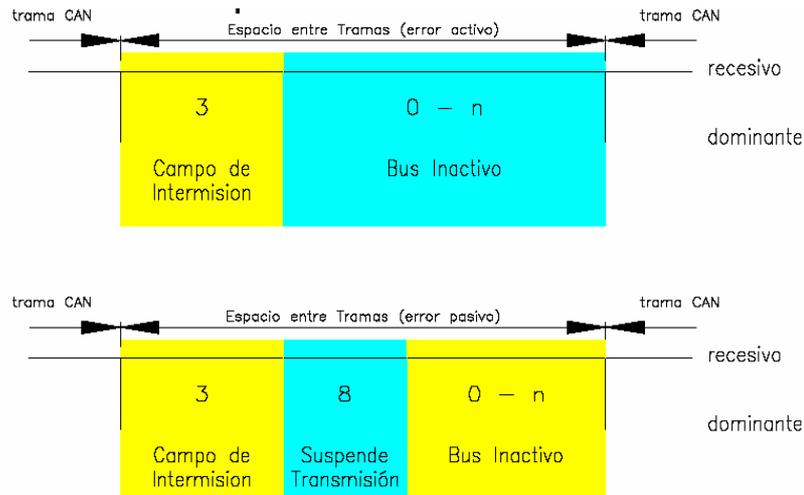


Figura 3.12: Espacio entre Tramas.

Bus en reposo: En los intervalos de inactividad se mantiene constantemente el nivel recesivo del bus.

3.5 Codificación.

Los segmentos de trama, comienzo de tramas, campo de arbitraje, campo de control, campo de datos, y secuencia CRC son codificados a través del método de stuffing.

Cada vez que un transmisor detecta 5 bits consecutivos de igual valor en el paquete de bits que será transmitido, este inserta automáticamente un bit complementario en el paquete de bits que realmente se está transmitiendo. Los bits de campos de la trama de datos o de la trama remota (delimitador, CRC, ACK, y fin de trama) son de forma fija y no son codificados a través del método de stuffing de bits.

El paquete de bits en un mensaje está codificado de acuerdo al método de no retorno a cero, esto significa que durante el total de tiempo de bit el nivel de bit ya era dominante o recesivo.

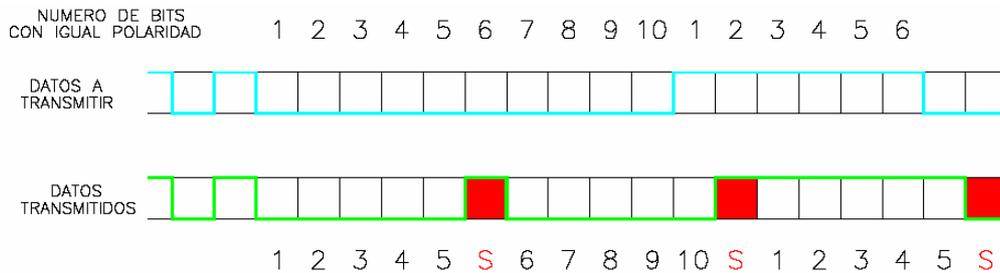


Figura 3.13: Codificación.

3.6 Tipos de Errores Detectados.

3.6.1 CRC.

Cada mensaje contiene un campo de 15 bits destinado al CRC y todo nodo que detecte un CRC en el mensaje que sea diferente del CRC que él ha calculado para el mensaje, generará una señal de error.

3.6.2 ACK (Acknowledge Error).

Es un error de reconocimiento, en el que todos los nodos del bus que reciben correctamente un mensaje, envían a su vez un mensaje de acknowledge en el Slot de Acknowledge.

Slot de Acknowledge: Se trata de un campo con el cual un nodo confirma que ha recibido correctamente el mensaje.

3.6.3 Error de Forma.

Se produce si se detecta un bit dominante en cualquiera de los siguientes campos:

- Delimitador de CRC.
- Delimitador de ACK.
- Fin de trama.

Si un controlador detecta un valor inválido en uno de estos niveles se genera el mensaje de error.

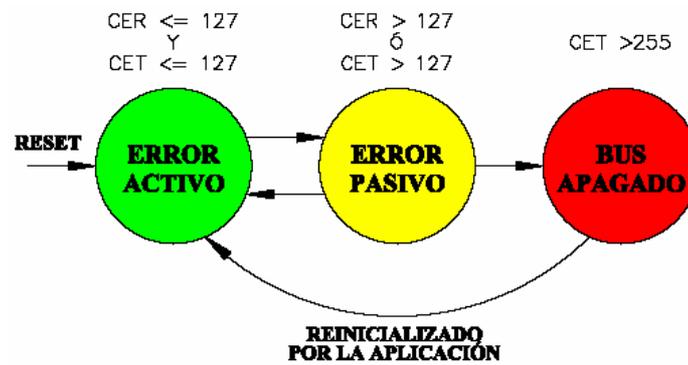
3.6.4 Error de Bit.

Un nodo que transmite simultáneamente monitorea el bus, cualquier bit que se reciba con polaridad inversa a la que ha transmitido se considera un error de bit, excepto cuando se recibe durante el campo de arbitraje o en el bit de reconocimiento, además no se considera error de bit la detección de bit dominante por un nodo en estado de error pasivo que transmite un señalizador pasivo de error.

3.7 Limitación de Fallas.

Durante las comunicaciones CAN, los nodos actualizan sus contadores de errores de transmisión y recepción mediante normas complejas establecidas en la norma CAN; los contadores se incrementan por detección de errores o se decrementan por transmisiones o recepciones exitosas.

Con respecto al límite de fallas una unidad puede estar en uno de estos tres estados:



CER: Contador de error de recepción.

CET: Contador de error de transmisión.

Figura 3.14: Tipos de Fallas.

3.7.1 Error Activo.

Es el estado normal de un nodo; el nodo puede recibir y transmitir mensajes, además puede enviar tramas de error activas (bits dominantes), lo que le permite destruir mensajes detectados con algún error.

3.7.2 Error Pasivo.

Si alguno de los contadores pasa el valor de 127, el nodo pasa a modo pasivo; en este modo las tramas de error emitidas son pasivas (bits recesivos), no pudiendo destruir mensajes detectados con algún error.

3.7.3 Bus Apagado.

Si el contador de error de transmisión llega a 256, todas las actividades CAN del nodo se detienen, además de liberar el bus (estado recesivo); la única forma de sacar al nodo de este estado es mediante la reinicialización del controlador CAN por la CPU de la aplicación.

3.8 División del Tiempo del Bit.

El Quantum de tiempo es una unidad fija de tiempo que deriva del periodo del oscilador. Existe un programa pre-escalar, con valores integrales y rangos que van al menos desde el 1 al 32.

Comenzando con el quantum de tiempo mínimo, el quantum de tiempo puede tener una longitud de:

$$\text{Quantum de tiempo} = m * \text{Quantum de tiempo mínimo}$$

Siendo m el valor del pre-escalar.

El número total de Quantums de tiempo, en un bit de tiempo puede programarse de 8 a 25.

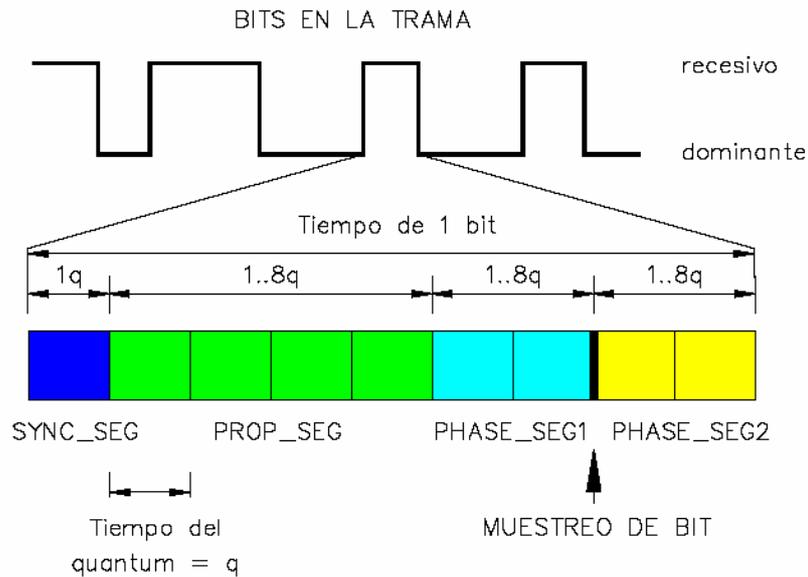


Figura 3.15: División del tiempo del Bit.

Sync Seg: Tiene una duración de 1 quantum; si hay una transición en el bit, se espera que sea en este segmento.

Prop Seg: Es utilizado para compensar los tiempos de propagación y los retardos de los dispositivos electrónicos en la red. Su duración se puede programar entre 1 y 8 quantums.

Phase Seg1: Se utiliza para compensar los errores de fase de los flancos. Su tiempo puede ser de 1 a 8 quantums y se puede estirar en cada re-sincronización. Al finalizar el segmento se muestrea el estado del bit.

Phase Seg2: También se utiliza para compensar los errores de fase de los flancos. Su tiempo puede variar entre 1 y 8 quantums, pero no debe ser menor al tiempo de "Procesamiento de Información". Phase Seg2 se puede achicar en cada re-sincronización.

Procesamiento De Información: Es el tiempo necesario para calcular el próximo nivel de bit a partir del punto de muestreo; es menor o igual a 2 quantums.

R_{ju}: Es el ancho de salto para re-sincronización, es el tiempo máximo en quantums que puede ser estirado Phase Seg1 o acortado Phase Seg2. Puede programarse entre 1 y min (4, Phase Seg2).

Error De Fase: Es el tiempo en quantums del flanco detectado respecto a Sync Seg:

- **e = 0:** Si el flanco cae dentro de Sync Seg.
- **e > 0:** Si el flanco cae después de Sync Seg y antes del punto de muestreo.
- **e < 0:** Si el flanco cae después del punto de muestreo del bit anterior.

Simplificación de Segmentos del Bit:

Muchos controladores CAN, para simplificar la programación, combinan los segmentos Prop Seg y Phase Seg1 en un único segmento llamado T Seg1. En este caso, el segmento Phase Seg2 es llamado T Seg2.

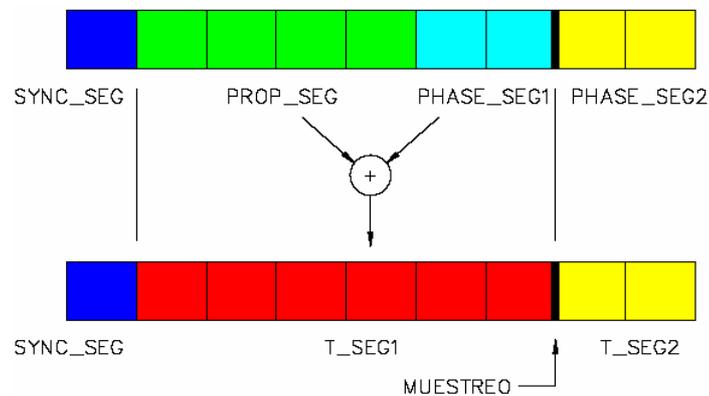


Figura 3.16: Simplificación de segmentos del bit.

3.9 Ubicación del punto de Muestreo.

- Programar el punto de muestreo permite ajustar las características de la red a nuestras necesidades.
- Un punto de muestreo temprano permite aumentar la cantidad de quantums en Phase Seg2 y así subir el tiempo de Rjw a su máximo de 4. Un Rjw de 4 da la máxima capacidad para extender o acortar el tiempo de bit, haciendo la red más robusta a cambios en la frecuencia del cristal permitiendo usar cristales más baratos tales como resonadores cerámicos.
- Un punto de muestreo tardío implica más tiempo en el segmento de propagación Prop Seg, lo que permite un máximo en el largo de la red.

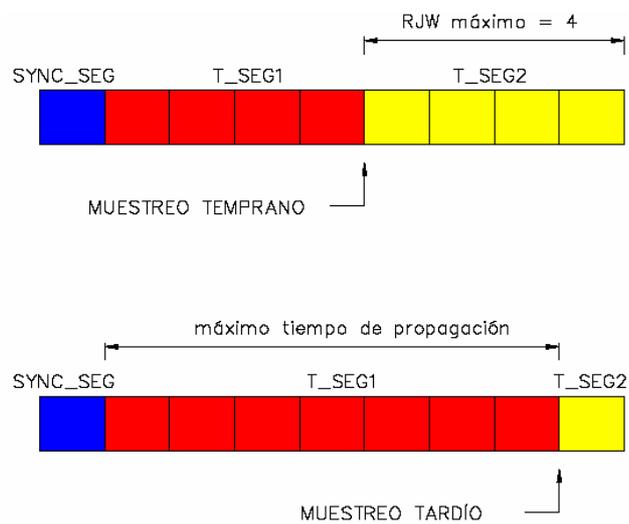


Figura 3.17: Punto de muestreo.

3.10 Propuesta de un Modelo General para la Red CAN de un Sistema Controlado.

El objetivo de este capítulo, fue realizar un modelo de la Red tipo CAN para la interconexión de los elementos del Sistema Controlado, en este caso los bloques que se muestran en la figura 3.18, se tomaron como referencia para luego ir separándolos dentro de dos conjuntos principales como son la Red CAN de alta velocidad y la Red de baja velocidad, los distintos bloques fueron separados de acuerdo a la prioridad que tengan dentro del sistema controlado.

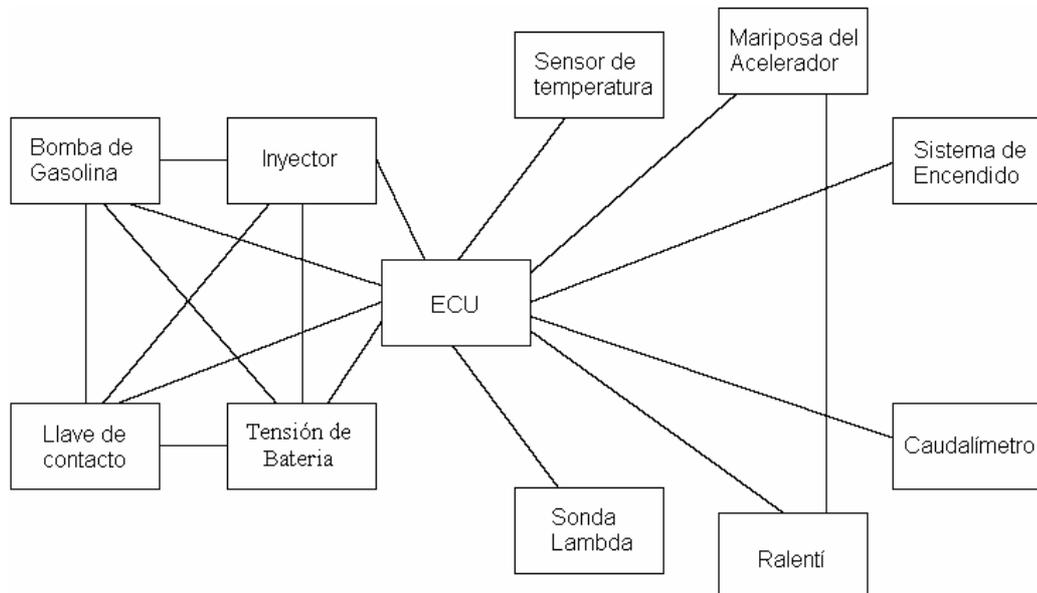


Figura 3.18: Modelo de referencia de un Sistema Controlado.

3.10.1 Estandarización.

Para la Red CAN de alta velocidad, las velocidades de transmisión típicas están entre 125kbit/s y 1 Mbit/s, como se muestra en la figura 3.19, las velocidades deben ser tan altas para poder garantizar el comportamiento de tiempo real exigido.

El sistema CAN esta previsto en la ISO como estándar para la aplicación en el vehículo para series de datos superiores a 125 kbit/s y es este valor el que limita entre la red de alta velocidad y la de baja velocidad.

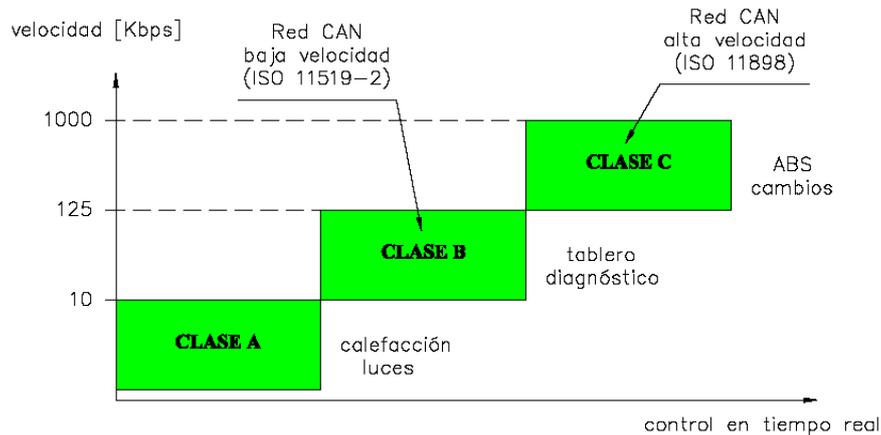


Figura 3.19: Límite de la red de baja y alta Velocidad.

3.10.2 Modelo de la Red CAN de Alta y Baja Velocidad.

En la figura 3.20, se muestra un modelo en el cual están separados en bloques los distintos dispositivos para el sistema de red CAN aplicado en el sistema de inyección de un motor a gasolina de un vehículo.

Lo que realizó este apartado es la separación de los distintos módulos del sistema, para luego distribuirlos de acuerdo a su grado de jerarquía dentro del sistema de inyección, siendo para nosotros los elementos más importantes:

- Inyector.
- Caudalímetro.
- Sistema de Encendido.

- Bomba de Gasolina.
- Sonda Lambda.
- Sensor de Temperatura.
- Mariposa del acelerador etc.

Los cuales debe ir situados en la Red CAN de alta velocidad y deben ser capaces de responder en tiempo real estricto, ya que una pequeña demora podría causar que, por ejemplo, el sistema de inyección del vehículo, no actué de forma adecuada causando pérdida de potencia o una combustión inadecuada de la mezcla dentro del cilindro, causando mayor consumo de combustible.

Mientras que elementos como:

- Llave de contacto.
- Tensión de la Batería.
- Motor al Ralentí.

Deben situarse en la red CAN de baja velocidad ya que su importancia no requiere que actúen de forma precisa en el control de un dispositivo específico, es decir que si existe una pequeña demora en, por ejemplo, el sistema de encendido del vehículo, no se lo notaría siquiera ya que este tipo de sistemas no requieren de una respuesta inmediata crítica como lo son los sistemas “vitales”, como el sistema de inyección del vehículo, muy importante para el óptimo desempeño del mismo.

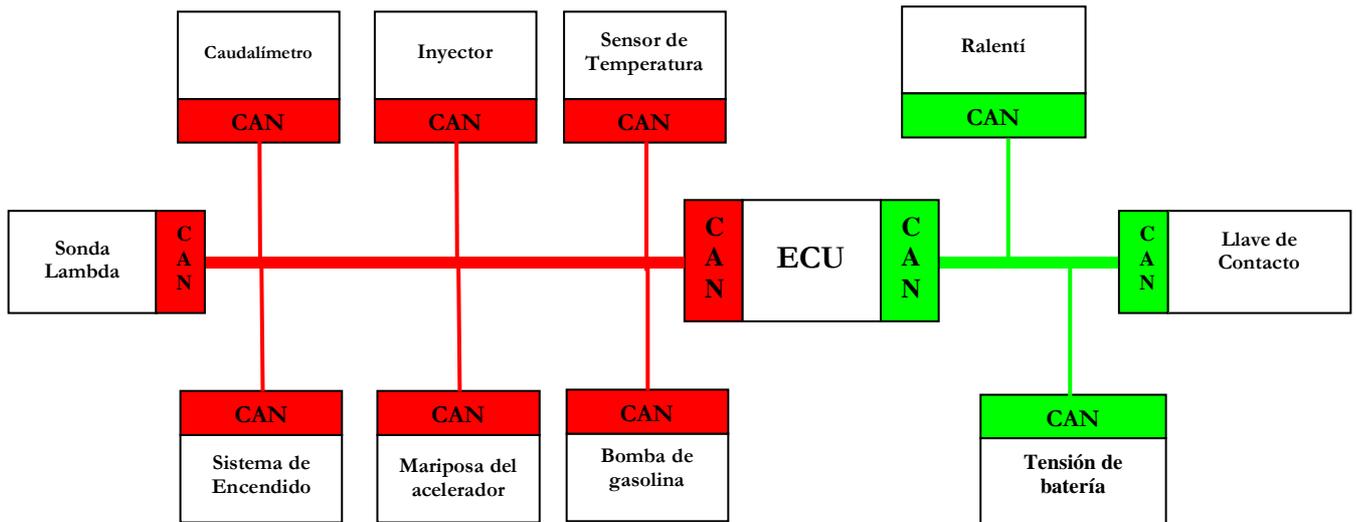


Figura 3.20: Diagrama de bloques de dispositivos de alta y baja velocidad.

3.11 Productos Existentes.

El estado del estándar alcanzado por CAN lo convierte en una tecnología habitual en la industria, y numerosas firmas fabrican y distribuyen productos compatibles con este protocolo de comunicaciones.

El campo de aplicación de CAN ha trascendido el ámbito de la industria de automoción para la cual fue originalmente concebido, pasando a ser habitual en aplicaciones como:

- Control de sistemas de ascensores.
- Equipos médico – sanitarios.
- Industria aeroespacial y sistemas de navegación.

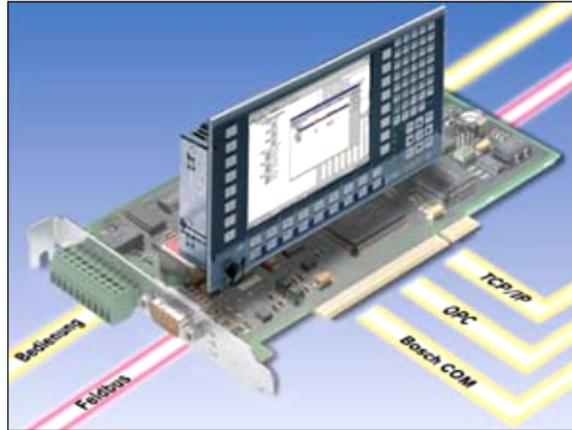
- Control de procesos industriales en general.
- Sistemas de control climático.
- Domótica.

Entre los productos existentes tenemos:

- Controladores CAN, que gestionan las comunicaciones a través de este protocolo. Se subdividen a su vez en:
 - Módulos CAN integrados en el mismo chip del microcontrolador.
 - Existen versiones CAN con los microcontroladores más populares del mercado como:
 - Atmel.
 - Fujitsu.
 - Microchip**.
 - Philips.
 - Motorola.
 - Nec.
 - Siemens.
 - Mitsubishi, etc.
- Controladores CAN independientes que permiten a microcontroladores no incluidos en la anterior categoría comunicarse a través del CAN.
- Tarjetas de conexión con PCs.

- Software y herramientas diversas de monitorización de sistemas CAN, útiles tanto en la fase de diseño y simulación, como en la de prueba.

WIN CAN



Asignar Bus esclavos a Buses maestros en sistemas de buses de campo complejo es a menudo una tarea difícil, por este motivo la División Tecnológica de Automatización de Bosch desarrolló el WinCan, una nueva herramienta de configuración de Windows para el Bus Can. Con la herramienta de configuración WinCAN, se puede configurar de forma sencilla el bus maestro del control Bosch para sus CAN asignados usando Windows. El software de la herramienta soporta archivos EDS (hoja electrónica de datos), con lo cual los esclavos, conectados a un Bus maestro a través de un CAN abierto, pueden ser revisados. La herramienta de configuración crea, ordena y proporciona una rápida visión de los esclavos conectados en un sistema de Bus Can abierto. Gracias a la disponibilidad de datos, se puede utilizar el WinCan para la diagnosis individual de esclavos.

Conclusiones Generales.

Después de realizar el análisis de Sistema de Inyección Electrónica de un motor a gasolina, se puede concluir que el desarrollo de controladores PID, frente a los distintos sistemas de aplicación tanto industrial, como automotriz (como es el caso nuestro en que se aplicó en el área automotriz), etc; presentan una gran ventaja debido a que se obtienen resultados que muestran una gran mejoría, tanto en la respuesta del sistema frente a perturbaciones, como también en la disminución del tiempo de establecimiento del sistema controlado.

Se ha observado que el modelo del sistema de inyección, tanto para la representación de la evolución de la gasolina en el colector de admisión, como para el modelo del inyector, funciona con un grado de precisión aceptable para la resolución del problema de control propuesto, cumpliendo de esta manera con los objetivos que fueron planteados por nosotros en la defensa de nuestro tema de Monografía.

CAN es un Standard de comunicaciones especialmente apto para aplicaciones de control de sistemas en tiempo real, y que necesitan ser autotransportadas o autónomas de un sistema estático, que por sus múltiples ventajas ha trascendido el sector de automoción para el cual fue originalmente desarrollado, extendiéndose su uso a muchas otras aplicaciones, tales como la industria aeronáutica, industria espacial, y cualquier sistema embarcado con control autónomo en general.

En el presente capítulo se ha descrito una arquitectura distribuida para el sistema de control que puede ser utilizada dentro de una red automotriz, utilizando el protocolo de comunicación CAN, así como una descripción de las técnicas de análisis y de asignación de prioridades de una forma teórica, aplicadas en un sistema distribuido que puede ser representable mediante un modelo de referencia como el propuesto por nosotros para el desarrollo del presente proyecto.

Anexos

Anexo A: Abreviaturas.

ECU	Unidad Electrónica de control (Electronic Control Unit).
ROM	Memoria sólo de lectura (Read Only Memory).
RAM	Memoria de acceso directo (Random Access Memory).
EPROM	Memoria ROM borrable y programable (Erasable Programmable ROM).
NTC	Coefficiente de Temperatura negativo (Negative Temperature Coefficient).
mJ	mili Joules.
m_{ci}	Masa de combustible inyectado (mg/ciclo).
K_{iny}	Ganancia del inyector (mg/ms).
t_i	Tiempo de inyección (ms).
t_{0iny}	Tiempo muerto del inyector (ms).
m_{ci}	Caudal de combustible inyectado (mg/ciclo).
n	Régimen de giro (rpm).
$t_{i_{max}}$	Tiempo máximo de inyección (ms).
m_{ci}^{max}	Caudal máximo de combustible inyectado (Kg/ciclo).
X	Fracción de combustible inyectado que se deposita como líquido.
Xc	Fracción de combustible inyectado que se deposita en conducto de admisión.
Xv	Fracción de combustible inyectado que se deposita en válvula de admisión.
m_{lc}	Masa de combustible depositado como líquido en el conducto de admisión.
m_{lv}	Masa de combustible depositado como líquido en la válvula de admisión.
m_{cvc}	Caudal de combustible vaporizado desde el conducto de admisión (kg/h).
m_{clc}	Caudal de combustible que se deposita en el conducto de admisión (kg/h).
m_{cvc}	Caudal de combustible que se vaporiza desde el conducto de admisión (kg/h).
m_{clv}	Caudal de combustible que se deposita en el válvula de admisión (kg/h).
m_{cl}	Caudal de combustible que se deposita como líquido (kg/h).
$1/\tau_{cl}$	Fracción de combustible que abandona la película.
m_c	Caudal de combustible que entra en el cilindro (kg/h).
CAN	Área de Red Controlada (Controller Area Network).
CiA	CAN in Automation.
ODVA	Open DeviceNet Association.
CSMA/CD+CR	Acceso múltiple con detección de portadora, detección de colisión más resolución de colisión (Carrier Sense, Multiple Access/Colission Detection+Collision Resolution).
OSI	Interconexión de Sistemas Abiertos (Open Systems Interconnection).
ISO	Organización Internacional para la Estandarización (International Standardization Organization).
SOF	Inicio de Trama (Start of frame).
CRC	Prueba de redundancia cíclica (Cyclic Redundancy Check).
ACK	Campo de Reconocimiento (Acknowledge Error).
EOF	Fin de Trama (End of Frame).

Anexo B: Características del Vehículo.



VOLKSWAGEN



Marca	Volkswagen
Modelo	Golf 1.8 lts. GL
Años de fabricación	1995 - 1996
Cilindraje	1800 c.c.
Número de cilindros	4
Tipo de motor	Motor de 4 tiempos
Combustible	Gasolina
Sistema de Inyección	Mono-motronic
Características del Sistema de Inyección	Monopunto
Potencia	90 Caballos de Vapor
ECU	
Marca	Bosch
Referencia de venta	0 261 200 714
Inyector	
Marca	Bosch
Ganancia del inyector	2,5 (mg/ms)
Tiempo muerto del inyector	0,6 ms
Ubicación	Se encuentra en el cuerpo superior de la unidad de inyección.
Resistencia	20 ± 5 °C
En el colector	De 1.2 a 1.6 ohmios.
Estanqueidad	Máximo 2 gotas por minuto.
Bomba de gasolina	
Marca	Bosch
Ubicación	Sumergida en el interior del depósito.
Tensión nominal	12 Voltios.
Presión nominal en el circuito	1.2 bar
Presión residual durante 5 minutos	0.5 bar mínimo.
Caudal bajo tensión. Bajo 9 voltios. Bajo 10 voltios. Bajo 11 voltios. Bajo 12 voltios.	De 365 a 385 cm ³ De 465 a 485 cm ³ De 540 a 560 cm ³ De 615 a 635 cm ³
Filtro de Gasolina	
Substitución	Cada 20 Km.
Regulación de ralentí	
Ubicación	En la unidad central de inyección.
Velocidad de régimen de ralentí	Entre 750 y 1000 r.p.m.
Contenido de Monóxido de Carbono	Entre 0.2 y 1.2 %
Potenciómetro de la mariposa	
Ubicación	En la base de la unidad de inyección.
Punto de Encendido	
Marca de la bobina de encendido	Bosch.
Resistencia a 20 °C Arrollamiento primario. Arrollamiento secundario.	De 0.5 a 0.7 Ohmios. De 3000 a 4000 Ohmios.

Bibliografía:

- “Inyección de Gasolina: Sistemas Monopunto”, Castro Vicente Miguel, Editorial Ceac.19, Barcelona 2002.
- “Técnicas del Automóvil: Inyección de Gasolina y dispositivos anticontaminación”, J. M. Alonso, Madrid 1998.
- “Manual del Automóvil: El Motor de Gasolina”, Editorial Cultural, Edición 2002.
- “Sistema de Control del Motor Motronic”, Instrucción Técnica de la Bosch, Tercera Edición, 1999.
- “Manual de Lab View”, National Instruments, 2002.
- “Sistemas de Control”, Gene H. Hostetter, University of California.1998.
- “Controladores PID”, Virginia Mazzone, Universidad Nacional de Quilmes, Marzo 2002.
- “Modelos Matemáticos de Sistemas Dinámicos”, Virginia Mazzone, Universidad Nacional de Quilmes, Marzo 2002.
- <http://iaci.unq.edu.ar/caut1>.
- “Calculating CAN Response Times”, Tindell K, University of York, England 1995.
- “Tutorial: Fieldbus review”, Mc Farlane Andy, Sensor Review, Vol 17, Num 3, 1997.
- “Redes Locales en entornos Industriales: Buses de Campo”, Sirgo J.A., Universidad de Oviedo, 1997.
- Quezada J., “Bus CAN: Estado de Buses Industriales y Aplicaciones” Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales”, 1999.
- www.fieldbus.org, Fieldbus Organization.
- www.can.bosch.com, Página de la Bosch dedicada a CAN.
- www.Kvaser.se. KingDom CAN Applications.
- www.cd.systems.com.
- www.intrepidcs.com.
- www.casadomo.com.

Resumen del Proyecto

Control del Sistema de Inyección de un Motor a Gasolina

En el proyecto que presentamos, hacemos la demostración de un sistema de control mediante el uso de un controlador PID aplicado en un sistema de inyección de un motor a gasolina.

La parte principal de este proyecto es la simulación del controlador y su funcionamiento, el comportamiento del controlador PID está incluido en los siguientes capítulos.

Dentro del proyecto incluimos también un breve análisis de las redes de comunicación industriales para sistemas embarcados, conocida como CAN (Controller Area Network), y su amplia aplicación en la industria automotriz así como su principio de funcionamiento y características principales.

Abstract of the Project

Engine's Fuel Injection Control System

In the present project, we made a demonstration of a control system using a PID controller applied to an Electronic Fuel Injection system of a vehicle.

The main part of this project is the simulation of the controller and how it works; even the behavior of the PID controller is included in the following chapters.

This project contains an Industrial Communication Networks chapter; where we made an analysis of the CAN (Controller Area Network) network used in mobile and independent systems, and how can apply it in the actual automotive industries, this chapter includes how it works and it's main characteristics.