

# **ECU: Sistemas electrónicos de inyección en motores de combustión Interna**

*Manzanares M., Llumà J., Domingo J., Alonso C., García J.*

**Grupo EEI (EcoEnginys Escola Industrial)**

**C/ Comte d'Urgell 187, 08036 Barcelona  
Escola Universitària de enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona,  
EUETIB, Universidad Politècnica de Catalunya, UPC**

[manolo.manzanares@upc.es](mailto:manolo.manzanares@upc.es)

## **Resumen**

En el presente curso académico, en la Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona, EUETIB, se va a començar una intensificació de estudis transversal para las especialidades de Ingeniería Técnica Mecánica, Química, Eléctrica y Electrónica con el objetivo de formar técnicos con actitudes de trabajo en grupo y con aptitudes transdisciplinarias. En este marco se proponen proyectos que involucran a estudiantes de las diferentes especialidades. El propósito de la presente comunicación es la descripción de cómo se ha realizado el diseño y desarrollo de una unidad electrónica para el control de inyección en motores de combustión interna.

## **1. INTRODUCCIÓN.**

Es de destacar los esfuerzos que se realizan actualmente en múltiples ámbitos, entre los que se encuentra el de la ingeniería, encaminados a realizar diseños que ofrezcan soluciones tecnológicas que permitan la protección del medio ambiente y fomenten un desarrollo sostenible.

El diseño y desarrollo de una unidad electrónica para el control de la inyección y el encendido de motores de combustión interna permite desarrollar un proyecto que persiga estos objetivos.

La justificación de esta afirmación radica en el enorme potencial que presenta la electrónica para las aplicaciones que requieran de un control preciso, como es el caso que nos ocupa, al intentar alcanzar los requerimientos de par y potencia necesarios del motor de combustión con el mínimo consumo de combustible.

También podremos conseguir mediante el control de la adecuada proporción de la mezcla aire/gasolina, tener gases de escape menos contaminantes.

Por otro lado, el desarrollo de un sistema electrónico que controle un motor de combustión interna con los fines señalados anteriormente, lleva aparejado, de forma natural, la necesidad de considerar por parte de los técnicos o estudiantes que lo realizan los siguientes aspectos, entre otros:

- Diseño del hardware electrónico y del software de monitorización y control.
- Estudio de las posibles estrategias de control electrónico.
- Estudio del funcionamiento del motor de combustión interna.
- Estudio de las curvas de par y potencia el motor a controlar, y en su defecto, su obtención.
- Estudio de los sistemas de inyección y encendido electrónicos actuales.
- Estudio y caracterización del inyector a utilizar.
- Estudio del proceso de combustión de la gasolina.

Lógicamente, la necesidad de conocer y elegir las variables de entrada al sistema de control, y el establecimiento de unos márgenes de actuación de las variables de salida, que permitan obtener los objetivos definidos sin penalizar al sistema, justifican los puntos de estudio señalados y hacen que el desarrollo de la unidad de control electrónico se englobe dentro de un proyecto docente multidisciplinar.

## **2. CONTROL DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.**

El motor a controlar en primera instancia es un motor prototipo de cuatro tiempos de gasolina, de 40 c.c. , diseñado y fabricado para un vehículo destinado a competir en una carrera de bajo consumo (Shell Eco-Marathon).

### **2.1. Caracterización del motor.**

En una primera aproximación, deberemos caracterizar al motor ya fabricado en términos de su respuesta mecánica externa, dado que a priori, el motor suministrado no ha sido sometido a ensayos que nos permitan cuantificar su respuesta.

Para ello deberemos obtener las características que nos ligan el par y la potencia del motor en función de las rpm para una determinada proporción de la mezcla aire/gasolina. El objeto de este estudio es intentar situar al motor mediante la unidad de control, en función del par y la potencia que se le solicite, en un punto de trabajo óptimo.

Para la realización de estas características se ha desarrollado una primera versión de un banco de potencia, implementado mediante un motor de continua al que el motor de combustión hace trabajar como generador. Mediante la variación controlada de la carga aplicada al generador efectuamos una variación del par resistente al que es sometido el motor de combustión.

### **2.2. Caracterización del inyector.**

La unidad de control electrónico actúa directamente sobre la dosificación de la gasolina mediante el inyector electromagnético, en consecuencia, es importante para efectuar un correcto diseño y para establecer los límites de los correspondientes parámetros a programar en la unidad, conocer en profundidad el comportamiento del inyector [1].

Desde un punto de vista eléctrico, el inyector presenta un valor óhmico de resistencia comprendido entre 2 y 16 Ohm, asociado en serie a un valor de inductancia que puede alcanzar un valor de 15 mH. Dicha inductancia es debida a la bobina que tiene la misión de que al circular corriente por ella, debe retirar la aguja del asiento situado a la salida del inyector, asiento que impide la salida del combustible sometido a presión hacia el conducto de admisión o hacia la cámara de combustión, en el caso de inyección directa.

Este modelo eléctrico del inyector fuerza, dado que la unidad de control es digital, a efectuar el diseño de la correspondiente etapa de potencia, que adapte las señales de control provenientes del microcontrolador a los niveles adecuados para gobernar al inyector.

La etapa de potencia se ha realizado en base a transistores MOSFET dada su facilidad de control y el margen de tensión y corriente que deben manejar.

La cantidad de carburante que se inyecta en la cámara de combustión depende del tiempo de apertura del inyector, de la presión y de la temperatura del combustible, entre otros parámetros [2].

La escasa información suministrada por los fabricantes de inyectores, en particular respecto a su respuesta dinámica, ha hecho necesaria la realización de un banco de ensayo, que en primera aproximación nos permite obtener una expresión que nos relaciona el caudal suministrado en función de los siguientes parámetros:

- Intervalo de tiempo de apertura del inyector.
- Variación de la tensión de alimentación proveniente de la batería (típicamente 12 V).
- Presión de la gasolina.
- Temperatura de la gasolina.

### **2.3. Control de la inyección.**

La unidad de control diseñada es un sistema basado en un control digital, en base a un microcontrolador que realizará el control simultáneo de la inyección y del avance del encendido [3].

La inyección se controla mediante la programación de un mapa de inyección, en forma de matriz, en la que cada elemento define de forma indirecta el tiempo de apertura del inyector (tiempo base) y a la que se accede a cada elemento por la posición del mando de gas expresada en % y las rpm a las que está funcionando el motor.

Dicho tiempo base es modulado, para obtener el tiempo final de inyección, a partir de sensores que nos proporcionan en tiempo real la información del estado de las variables que intervienen directamente en el cálculo del intervalo de tiempo más óptimo de apertura del inyector.

Entre estos factores que afectan al cálculo final del tiempo de inyección, y por tanto, a la masa de gasolina a inyectar, se encuentran el rendimiento volumétrico del motor y la densidad del aire del tubo de admisión, con objeto de conocer la masa de aire que ha entrado en el cilindro, y poder establecer una relación aire/combustible (AFR: Air Fuel Ratio) estequiométrica, que idealmente debería ser de 14.7/1.

Esta densidad del aire se calcula a través de la presión y la temperatura del aire en el conducto de admisión, valores que se obtienen a partir de la lectura del sensor de presión del conducto de admisión y del sensor de temperatura tipo NTC con encapsulado miniatura, con objeto de no entorpecer el flujo de aire hacia la cámara de combustión.

Finalmente se considerará la corrección a efectuar en el tiempo de inyección debido a la variación de la tensión de la batería, expresado en ms/V.

Factores como la presión y temperatura de la gasolina no se considerarán en este primer diseño, por lo que asumimos que el circuito neumático será capaz de mantener una presión constante.

La temperatura del motor es un parámetro importante a considerar, sobre todo en el arranque en frío y en el caso de que el motor, en condiciones de trabajo extremas, alcance temperaturas demasiado altas, por lo que se considera su valor en el cálculo del tiempo de inyección final.

#### **2.4. Control del avance del encendido.**

Debido a la velocidad limitada del frente de llama en la combustión, es necesario avanzar el instante de inicio de la combustión antes de que el pistón alcance el punto muerto superior, con objeto de que coincidan la combustión y la posición del cilindro en el p.m.s., obteniéndose así un mejor rendimiento.

La generación de la chispa en la bujía se basa en la interrupción de la corriente en el primario de un transformador de relación 100:1, conocido como *bobina del encendido*, que provoca unas sobretensiones de un valor de 10 a 45 kV, que permiten que se produzca el arco eléctrico en la bujía.

Para controlar la corriente que circula por el primario, a partir de la señal de control generada por el microcontrolador, se ha tenido que diseñar la correspondiente etapa de potencia, que adapte las señales de control provenientes del microcontrolador a los niveles adecuados de corriente necesarios.

Para ello, se han utilizado transistores IGBT fabricados específicamente para estas aplicaciones, que llevan incorporadas las protecciones necesarias para soportar las elevadas sobretensiones que se producen en el instante de generación de la chispa.

Las variables de control serán:

- El régimen de giro del motor, mediante un sensor inductivo situado en el cigüeñal.
- La llegada del pistón al p.m.s. al final del ciclo de compresión, mediante otro sensor inductivo situado en el árbol de levas, ya que el motor es de cuatro tiempos.
- La posición, en el caso de que se utilice, del estrangulador del colector de admisión (válvula de mariposa), que se sensorará, al igual que la posición del mando de gas, mediante un potenciómetro.
- Una señal de sincronismo procedente del cigüeñal, que se sitúe a 90 grados antes de la llegada del p.m.s.
- La temperatura del aire en el conducto de admisión.

Unos parámetros que podrá programar el usuario serán:

- *Offset*: valor que indica el desajuste de calaje del sensor del cigüeñal, respecto a los 90 grados en adelante del p.m.s., desajuste producido por la ubicación real, normalmente condicionada, de dicho sensor en el motor.
- *Rpm\_limite*: este parámetro permite establecer un valor límite de seguridad para el régimen de giro del motor; retrasando el encendido y provocando una disminución de las r.p.m.

El encendido se controla mediante la programación de un mapa de encendido similar al de inyección, en forma de matriz, en la que cada elemento define el retardo, expresado en grados, tomando como inicio los 90 grados antes del p.m.s., en que se producirá en el instante de generación de la chispa.

A los elementos de dicha tabla se accede por la posición del mando de gas expresada en % y las rpm a las que está funcionando el motor.

Para el cálculo del avance final se considerará el parámetro *Offset* definido anteriormente y la temperatura del aire.

El retardo en función de la temperatura del aire de admisión lo introduce el usuario en una tabla, en la que se indican los grados de giro del cigüeñal. La tabla consta de ocho elementos, mientras que las matrices de control del encendido y de la inyección constan de 64 elementos cada una.

### **3. HARDWARE DE LA UNIDAD DE CONTROL.**

En cuanto al hardware del sistema, los requerimientos no difieren mucho de los necesarios en los típicos sistemas de control y adquisición de datos, ni de los de las unidades de control comerciales [4] , siendo sus elementos básicos los siguientes:

- Bloque de entrada: su misión es la de acondicionar las señales de entrada al sistema de control, suministradas por los distintos sensores señalados anteriormente, y adecuarlas a los márgenes de entrada TTL del microcontrolador. Se toman en este bloque las medidas necesarias para aislar galvánicamente y proteger dichas entradas contra

sobretensiones y perturbaciones electromagnéticas externas tan típicas en esta aplicación.

- Microcontrolador: En él se implementarán los algoritmos de control descritos anteriormente. Dado que la unidad electrónica debe ser programada en tiempo real hasta poder obtener el control óptimo del motor, las matrices necesarias para el funcionamiento del sistema y todos los parámetros susceptibles de ser modificados por el usuario, se implementan en memoria tipo RAM.

El programa que implementa los algoritmos de control descritos se grabará en la memoria tipo FLASH-ROM del microcontrolador.

El microcontrolador elegido es el microchip PIC 18F452, que además de cumplir con los anteriores requerimientos, posee los suficientes canales de entrada y resolución en los convertidores A/D para la captura de las señales procedentes de los sensores.

- Bloque de salida: su misión es la de acondicionar las señales de salida del sistema a las requeridas para poder actuar sobre el inyector y sobre la bobina del sistema de encendido. También integrará los circuitos de protección necesarios para proteger las etapas de potencia contra sobrecargas y cortocircuitos accidentales.
- Bloque de comunicación: el microcontrolador seleccionado ya integra un módulo USART, y por tanto, sólo será necesario utilizar un circuito integrado MAX232A, que adaptará los niveles TTL de salida del microcontrolador a los niveles RS-232 del puerto serie del PC.

El diseño del cableado del sistema de alimentación y de control, la selección del tipo de caja que albergará al circuito y el diseño de las PCB del sistema, han requerido adoptar las medidas necesarias para evitar las perturbaciones debidas a interferencias electromagnéticas.

#### **4. SOFTWARE.**

La linealización de la respuesta de los sensores que lo requieran, se realiza por programa, dada la mayor flexibilidad que se presenta respecto a una linealización por hardware, cubriendo el caso de que se realicen cambios en los sensores utilizados inicialmente.

El microcontrolador también ejecutará los programas descritos anteriormente de control del encendido y de la inyección. Estos programas se han desarrollado en lenguaje ensamblador dado el elevado precio de los compiladores de lenguajes de alto nivel.

Por otro lado se desarrolla un programa en PC que implementa una interface gráfica que permitirá la monitorización y el cambio de los parámetros que lo requieran y que puedan ser modificables en tiempo real, facilitando la puesta a punto del sistema.

El programa se desarrolla en Delphi y se ha estudiado un protocolo para permitir la comunicación entre el sistema electrónico y el PC.

### **Conclusiones.**

El diseño y desarrollo de una unidad electrónica para el control de un motor de combustión interna es un proyecto que acentúa, dada su complejidad, la necesidad de la formación de técnicos que posean actitudes de trabajo en grupo y aptitudes transdisciplinarias, objetivos que no siempre son fáciles de conseguir y que requieren un esfuerzo de todos los elementos tanto materiales como humanos implicados.

El desarrollo de un vehículo prototipo diseñado y fabricado para competir en una carrera de bajo consumo (Shell Eco-Marathon) es una gran herramienta para facilitar estos objetivos, dada la conjunción que se produce en el mismo de las distintas ramas de la ingeniería, incluyendo las de planificación y control de proyectos.

### **Referencias.**

- [1] Bosch, "Injecteurs. Injection d'essence".
- [2] Bosch, "Caractéristiques techniques. Injecteur prototype pour Maratón Shell EV6 court – B 280 431 195/1"
- [3] P. Arques, "Moteurs Alternatifs à combustion interne", Ed. Masson, Collection Technologies de l'Université à l'Industrie, 1.987.
- [4] SODEMO, SYTEL, "Le calculateur EV8. Gestion moteur haute performance. Notice d'utilisation".