

Sistema de Control de Inyectores de Motor Dual Diesel-GNC

Gustavo Boregio⁽¹⁾, María Luz Caballero⁽²⁾, Juan Muzzio⁽³⁾, Nicolás Rossetti⁽⁴⁾,
Luis Iaciancio⁽⁵⁾ y Norberto M. Lerendegui⁽⁶⁾

^{(1),(2),(3),(4),(6)} *Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Buenos Aires*
Av. Eduardo Madero 399. (C1106ACD) Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
e-mail: ⁽¹⁾gboregio@gmail.com, ⁽²⁾luzcaballero@gmail.com, ⁽³⁾jmuzzio@gmail.com,
⁽⁴⁾nico_rossetti@yahoo.com.ar, ⁽⁶⁾nlerende@itba.edu.ar

⁽⁵⁾ *MARDIESEL S.R.L.*
Calle 100 (Salta) N°4420 - Villa Ballester - Pcia. Buenos Aires, Argentina –
e-mail: luis_iaciancio@yahoo.com.ar.

RESUMEN

En la Argentina el transporte de pasajeros utiliza diesel como combustible primario. El diesel es un combustible de bajo costo al igual que el Gas Natural Comprimido (GNC), de amplia difusión en el parque de automóviles particulares, pero genera mayor contaminación que este último. La empresa argentina Mardiesel S.R.L. desarrolló un inyector de GNC que permite adaptar los motores diesel para el uso combinado de ambos combustibles, conformando un sistema dual diesel-GNC.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un Sistema Microprocesado de Control (SMC) de inyección de GNC para la operación dual en un motor de 6 cilindros utilizando este inyector. El SMC toma la información de un sensor de efecto Hall ubicado en una caja distribuidora accionada por el árbol de levas, y genera las señales para la activación de cada inyector de GNC de acuerdo con el ángulo de avance de los pistones. Dadas las condiciones de trabajo del sistema final se tomaron en cuenta objetivos adicionales de diseño, como robustez, simplicidad de montaje y operación, y escalabilidad.

Adicionalmente, con el objetivo de evaluar el desempeño del SMC, se diseñó un Módulo Integrado de Prueba y Medición (MIPM), que simula las señales de entrada y mide la frecuencia y la duración de las señales de salida del SMC.

El prototipo industrial del SMC fue probado exhaustivamente, cumpliendo con los requerimientos establecidos. Las pruebas incluyeron la medición del tiempo real de inyección (error máximo: 10%), la secuencia correcta de generación de señales (ningún error reportado desde 1 rpm hasta 3600 rpm) y el algoritmo de validación de las señales de entrada (ningún falso positivo detectado). El MIPM también fue evaluado, obteniéndose errores máximos de 0,7% en la medición de rpm del motor y 1% en la temporización de las señales simuladas del distribuidor.

Palabras Claves: Diesel, GNC, Gas, Motor, Control.

1. INTRODUCCIÓN

En la República Argentina, el transporte público usa diesel como combustible primario. El combustible diesel tiene menor costo que la nafta pero genera una mayor contaminación, y por esa razón se están investigando otras alternativas. Por otro lado, el transporte particular utiliza Gas Natural Concentrado (GNC) como opción barata y de bajo impacto ambiental. Sin embargo, esta alternativa no es confiable para su uso en el transporte público debido a que, a causa del uso hogareño del gas natural, durante su eventual escasez invernal pondría en peligro la continuidad del servicio.

En este marco, la empresa argentina MARDIESEL SRL desarrolló un inyector de GNC [1] que permite adaptar motores diesel convencionales para el uso combinado de ambos combustibles, conformando un sistema dual diesel-GNC [2]. Este sistema, destinado al transporte público, permitiría el uso simultáneo de ambos combustibles, con mínima contribución de diesel, reduciendo la contaminación pero manteniendo los costos controlados mediante el empleo de GNC. En caso de ser necesario, cuando escasee GNC por ejemplo, el motor podría funcionar únicamente con diesel.

De este modo, el motor tendría dos modos de operación: diesel y diesel+GNC, y la selección del modo se haría mediante una llave en el tablero del vehículo. En el primer modo, el motor del vehículo opera tal cual como fue concebido inicialmente: la acción sobre el acelerador determina el tiempo de apertura de los inyectores diesel. En el modo combinado diesel+GNC el tiempo de apertura de estos inyectores se mantiene fijo y a un valor bajo, independientemente del recorrido del acelerador, que sí controlará la cantidad de gas inyectado a través de los inyectores de GNC desarrollados. De acuerdo con la firma MARDIESEL, la cantidad de combustible diesel utilizado será un 15% de la requerida para operar el motor a plena carga para el régimen de revoluciones considerado. Para implementar la operación combinada diesel+GNC se requiere una unidad de control que permita la activación temporizada de los inyectores de GNC, proveyendo además versatilidad, robustez, facilidad de montaje y simplicidad de operación.

En este trabajo se presenta el diseño y la implementación de un Sistema Microprocesado de Control (SMC) de inyección de GNC para la operación dual en un motor diesel de 6 cilindros utilizando el inyector MARDIESEL. El SMC toma la información de un sensor de efecto Hall ubicado en una caja distribuidora accionada por el árbol de levas, y genera las señales para la activación de tres inyectores de GNC de acuerdo con el ángulo de avance de los pistones. La duración de la activación depende de una tensión de corriente continua provista por un potenciómetro accionado por el acelerador. Adicionalmente, también se presenta el diseño y la implementación de un Módulo Integrado de Prueba y Medición (MIPM) utilizado para evaluar el desempeño del SMC. El MIPM simula las señales del vehículo que son entradas del SMC, y mide la frecuencia y la duración de las señales de salida generadas por el SMC.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SMC Y DEL MIPM

La Figura 1 muestra el esquema funcional general del motor dual diesel+GNC y del SMC, indicándose la secuencia de encendido habitualmente usada en motores de 6 cilindros [3]

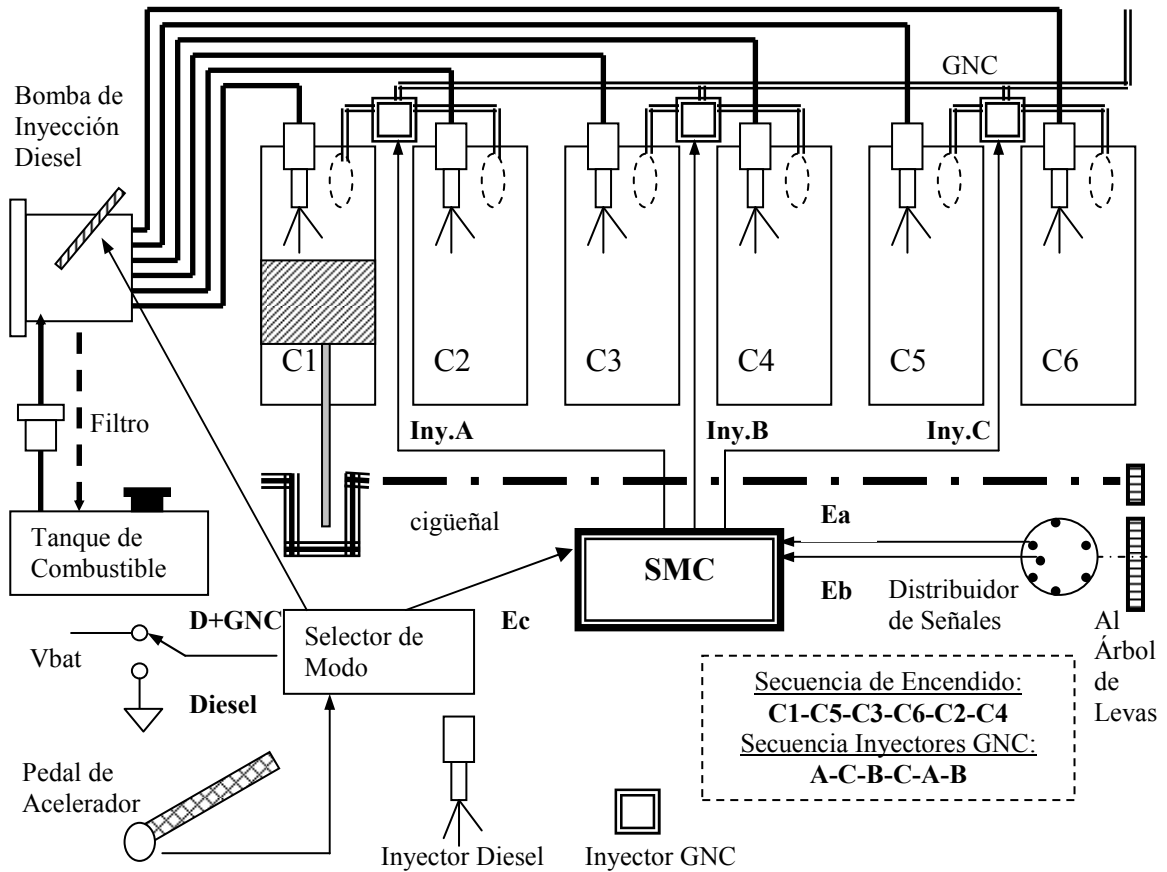


Figura 1: Esquema funcional general del motor dual diesel+GNC y del SMC

Las especificaciones propuestas para el Sistema Microprocesado de Control son las siguientes:

- Dos Entradas Digitales (provistas por los dos sensores de efecto Hall del distribuidor):
 - E_a: Un pulso por cilindro, de ancho entre 2 y 10ms, frecuencia entre 30Hz y 180Hz, error $\pm 10\%$ en la duración del pulso.
 - E_b: Un pulso por vuelta del árbol de levas, de ancho entre 2 y 10ms, frecuencia entre 5Hz y 30Hz, error $\pm 10\%$ en la duración del pulso (corresponde a una velocidad del cigüeñal de 600rpm a 3600rpm)

La frecuencia de la señal E_a es 6 veces la de E_b debido a que hay 6 cilindros. El distribuidor y el árbol de levas giran a la mitad de la velocidad del diferencial.
- Una Entrada Analógica (provista por el selector de modo):
 - E_c: Señal con amplitud entre 0-5V proveniente de un potenciómetro vinculado al acelerador, que controla linealmente el ancho de pulso de todas las salidas dentro del rango 1 y 15ms.

- Nueve salidas digitales :

Fi: 6 salidas de secuencia de activación de inyectores, numeradas del #1 a #6, en donde el número indica el orden en la secuencia de encendido (error $\pm 10\%$ en el ancho de pulso). Se utilizan LEDs para visualizar el funcionamiento.

A,B,C: 3 salidas de accionamiento de los inyectores rotulados A, B, C en concordancia con las salidas Fi anteriores, de acuerdo con el siguiente esquema [ver Figura 1]:

$$A= F1 \text{ ó } F5, B= F3 \text{ ó } F6, C= F2 \text{ ó } F4$$

Por razones mecánicas, el retardo máximo admisible entre la recepción del pulso de entrada y la emisión del pulso de salida de inyección es de 200us. Las salidas Fi, A, B y C deben tener un ancho variable entre 1 y 15ms, respondiendo linealmente a la entrada E_c , con una resolución de 0,2ms. Por ningún motivo debe haber falsos positivos en las salidas.

La operación del SMC se resume en las siguientes acciones:

- Las entradas correspondientes a cada cilindro (entradas E_a) disparan las salidas correspondientes (fases #1 a #6, e inyector A, B ó C), con un retardo máximo de 200us, y produciendo un pulso de duración linealmente proporcional al valor de tensión de la entrada E_c (cuya resolución es de 0,02V).
- El pulso de la entrada E_b sincroniza el funcionamiento, indicando que el pulso siguiente en la entrada E_a corresponde al cilindro #1.
- En la entrada E_b se admiten sólo aquellas frecuencias comprendidas entre 5 y 30Hz, que corresponden a regímenes de cigüeñal de motor de 600 y 3600rpm respectivamente.

Las especificaciones del Módulo Integrado de Prueba y Medición (MIPM) son las siguientes:

- El MIPM genera (simula) las señales E_a , E_b y E_c de entrada al SMC
- La salida de pulsos E_b del MIPM puede presentar 255 frecuencias distintas entre 5 y 30Hz, realizándose la selección mediante un potenciómetro (en la salida E_a habrá pulsos de frecuencia 30 a 180 Hz)
- Un potenciómetro simula la entrada E_c , duración del pulso de salida.
- El MIPM Mide la frecuencia en rpm, con resolución de 10 rpm, y la duración del pulso de salida en ms, con resolución de 0,1ms, presentando los resultados en displays.

3. DISEÑO DEL SISTEMA MICROPROCESADO DE CONTROL (SMC)

3.1. Características funcionales del SMC

Las señales en la entrada E_a (secuencia de 6 pulsos) disparan las salidas correspondientes (salidas F1 a F6), con un retardo máximo de 200us, produciendo un pulso de duración linealmente proporcional al valor de tensión de la entrada E_c . El pulso de la entrada E_b sincroniza el funcionamiento, indicando que el primer pulso siguiente de la señal E_a corresponde al cilindro #1.

Es lógico tratar de evitar detecciones erróneas en las entradas (falsos positivos), ya que darían lugar a activaciones incorrectas en los inyectores. Un desbalance en la cantidad de GNC inyectado en los cilindros durante un ciclo debido a la inyección doble en alguno de los cilindros a causa de un falso positivo, producirá un mayor gasto de combustible del motor y cargas desbalanceadas en el cigüeñal, que reducirán la eficiencia del motor y podrán dar lugar a daños asociados a fatiga. Por lo tanto, los errores deben ajustarse por defecto, siendo deseable que eventuales errores en la captura de señales, que se extienden hacia las señales de salida, no se propaguen en el tiempo por más de un ciclo de la señal de sincronismo.

Por otra parte, durante períodos de alta velocidad del motor en los que además se requiere alta aceleración, podría producirse un solapamiento de las inyecciones en dos cilindros que comparten un mismo inyector, debido al patrón de encendido de los cilindros y la forma en que se comparten los inyectores. La secuencia de encendido en los cilindros es C1(Iny.A), C5(Iny.C), C3(Iny.B), C6(Iny.C), C2(Iny.A) y C4(Iny.B). Cuando la frecuencia de la señal E_a llega a 133,3Hz, el intervalo entre activaciones adyacentes es de 7,5ms, por lo que los inyectores A y C experimentarán activaciones cada 15ms. En estas circunstancias, si se requiere aceleración máxima del motor (tiempo de inyección de 15ms), se producirá una superposición entre los pulsos de accionamiento correspondientes a estos inyectores. El sistema de control deberá respetar esta situación y lograr que el tiempo combinado de inyección se acerque lo más posible al ideal (suma de tiempos de inyección).

Por lo expuesto anteriormente, además del sistema básico de control que coordina la activación de las salidas según lo indicado por las señales de entrada E_a , E_b y E_c , se implementaron tres subsistemas que aseguran:

- Evitar la captación de falsos positivos en las señales de entrada (*Subsistema de validación de las señales E_a y E_b*)
- Un tiempo máximo de 200us de reacción entre una captura de un pulso de la señal E_a y la activación del cilindro y el inyector correspondiente (*Subsistema de manejo del tiempo de reacción entre la captura de una entrada y la generación de una salida*)
- Que el tiempo combinado de inyección, cuando ocurra superposición de la inyección para dos cilindros, se acerque lo más posible al ideal de la suma entre los tiempos correspondientes a ambos cilindros (*Subsistema de manejo de la superposición de pulsos en los inyectores*).

Para asegurar que entre una entrada y su correspondiente salida no se produzca un retardo mayor al permitido, la actualización de las señales se ejecuta sincrónicamente cada 200us. Se denominó Ciclo de Control al período de 200us que incluye el tiempo de espera hasta una rutina de actualización de las salidas y la rutina inmediatamente posterior.

Para poder actualizar las señales, es necesario que las entradas hayan sido validadas y que se haya procesado la señal analógica que contiene la información sobre el tiempo de inyección. Las validaciones no pueden durar más de 200us, y debido a la naturaleza del sistema es

prioritaria la captura correcta de las señales E_a y E_b , para mantener el sincronismo en la inyección. Se establecieron 4 tareas diferenciadas (ver Figura 2), cada una asociada a un orden temporal de ocurrencia:

- Captura de las entradas E_a y E_b
- Validación de las entradas E_a y E_b
- Lectura de la entrada analógica E_c
- Actualización de las salidas

Este orden está basado en la prioridad asociada a la importancia del cumplimiento inmediato de la tarea dentro de un ciclo del sistema de control.

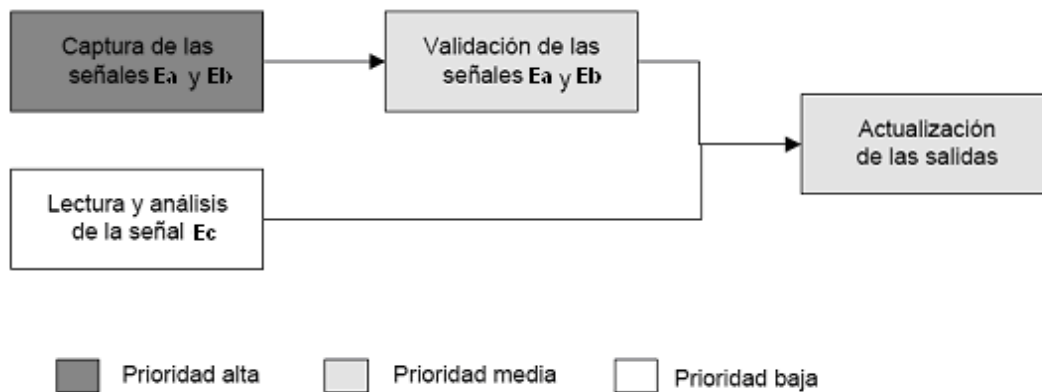


Figura 2: Tareas establecidas para el SMC, con sus dependencias y prioridades

Como se puede observar en el diagrama de la Figura 2, la captura de las señales E_a y E_b presenta la mayor prioridad debido a que su impacto excede la correcta ejecución de un ciclo de control. Si una de las señales no es capturada, la desincronización causada se propaga durante un período entero de la señal E_b . La prioridad de la validación de señales es de carácter temporal, suponiendo que la misma se ejecuta correctamente en todos los casos. Es decir, si la misma no se ejecuta de manera inmediata, el tiempo en la transmisión de la información para la inyección en un cilindro superará los 200us, y la inyección correspondiente ocurrirá en el ciclo de control siguiente a los 400us. Sin embargo, a diferencia de lo que sucede en el caso de las señales E_a y E_b no hay desincronización sino sólo retraso. Para comprender la naturaleza de este análisis es necesario recordar que los períodos de las señales involucradas en el control son mucho mayores que la duración de un ciclo del sistema de control.

La lectura de la señal analógica no es requerida para cada uno de los ciclos de control, sino en cada período de la señal E_b . Una falla en la lectura de esta señal dentro de un ciclo particular no representará un daño apreciable, ya que la señal E_c varía con la acción humana sobre el acelerador y la respuesta de velocidad del motor, cuyos tiempos característicos son mucho mayores que los tiempos del resto del sistema.

3.2. Diseño del Software del SMC

El sistema de control se basó en un microcontrolador Motorola 68HC908 utilizando la metodología disponible [4] [5]. El control implementado presenta una gran cantidad de estados similares, tanto para cada cilindro como para cada una de las señales de entrada (encendido para cada uno de los cilindros, validación de una señal de entrada mientras el sistema se encuentra en el ciclo correspondiente a cada uno de los cilindros, etc.). Si se usara una máquina de estados finitos en la que los estados se definen en función de los valores de las salidas o las entradas, se tendría una gran cantidad de estados similares. Esto es en principio inapropiado, ya que generaría tanto código redundante como un problema de escalabilidad. Por lo tanto se decidió implementar un autómata de pila con la estructura mostrada en el diagrama de la Figura 3.

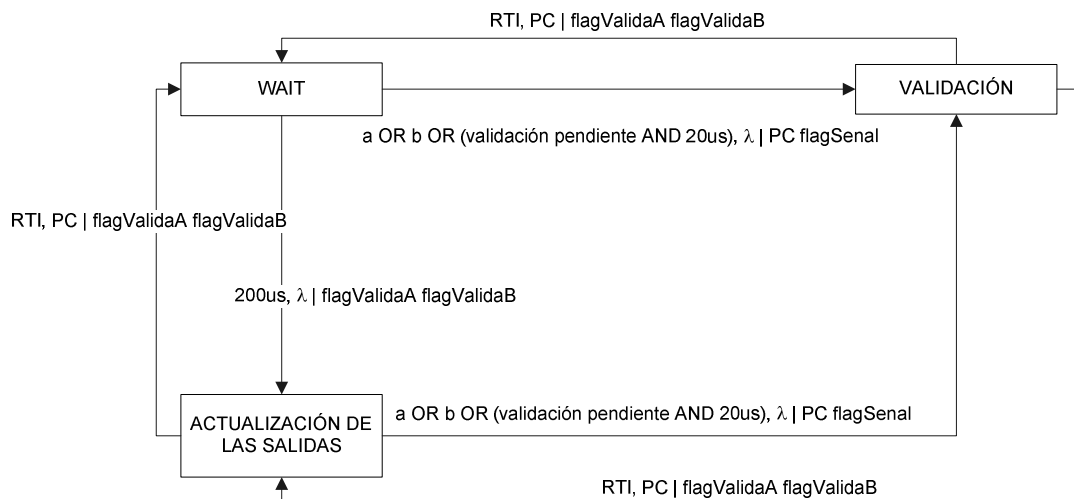


Figura 3: Autómata de pila mediante el cual se ejecuta el control

Los estados se definen con relación a la operatoria que ocurre dentro del sistema de control, mientras que la información acerca del estado anterior se transmite a través del valor de variables guardadas en locaciones de memoria. Además, dado que las señales de salida deben actualizarse con menos de 200us de retardo, es necesario el uso de interrupciones sincrónicas.

3.3. Diseño del hardware electrónico y del contenedor

El hardware electrónico del SMC está constituido por una placa que consta de tres partes separadas:

- El microcontrolador 68HC908GP32, con su circuito correspondiente.
- El circuito correspondiente a la interfaz para la visualización de las señales (LEDs).
- Las entradas y salidas.

Para aislar la placa del sistema de control del ruido externo y la suciedad, y para acoplarla mecánicamente al motor, se la colocó en una caja estanca de aluminio que utiliza como sello

un aro de silicona. La caja contiene la placa del sistema de control y una fuente de alimentación. Las dimensiones de la caja fueron establecidas en 150x150x70mm de acuerdo a las medidas de las placas de control y de la fuente de alimentación.

Al ser de aluminio, la caja tiene un mayor peso, pero resulta más económica que las alternativas de plástico con la misma resistencia al calor, necesaria debido a las altas temperaturas del motor. La Figura 4 muestra una vista frontal de la caja, con los agujeros maquinados para la colocación de los conectores. La Figura 5 muestra el interior de la caja con la plaqueta electrónica de control conectada.



Figura 4: Caja contenedora del SMC

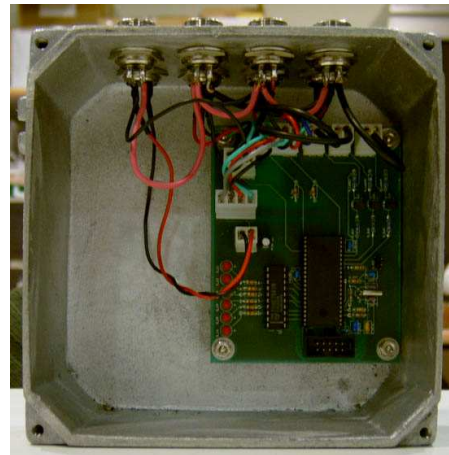


Figura 5: Caja contenedora del SMC conteniendo la placa de control

4. DISEÑO DEL MÓDULO INTEGRADO DE PRUEBA Y MEDICIÓN (MIPM)

4.1. Características generales del MIPM

El MIPM fue diseñado para poder comprobar el correcto funcionamiento del SMC sin tener que conectarlo a un motor. EL MIPM genera las señales simuladas E_a , E_b y E_c , que se introducen en el SMC por las mismas entradas usadas cuando se trabaja con el motor en la aplicación real. Además, el MIPM monitorea la salida del inyector B (por ser aquella en la que no ocurre la superposición de pulsos a velocidades del motor y tiempos de inyección permitidos) y la entrada de frecuencia E_a , generándose una lectura de tiempo de inyección y otra de frecuencia del árbol de levas. Se diseñó una interfaz hombre-máquina para el MIPM que permite una prueba manual simple y precisa del SMC. Por simplicidad y compatibilidad de hardware, en el MIPM se usó el mismo microcontrolador que para el sistema de control. A diferencia del SMC que está diseñado para funcionar dentro del motor sin intervención humana, el MIPM debe ser operado por una persona.

La interfaz humano-sistema del MIPM tiene las siguientes características:

- Velocidad del árbol de levas: Se utiliza un potenciómetro para generar una señal analógica 0-5V que entra al microcontrolador del MIPM y establece la frecuencia de la señal aplicada

a la entrada E_b (posibilidad de generar 255 frecuencias distribuidas entre 5 y 30Hz, resolución de 0,1Hz). Rango árbol de levas: 300-1800rpm.

- Tiempo de inyección: Un potenciómetro simula la entrada E_c , que regula el tiempo de inyección. La señal generada en este potenciómetro, entre 0 y 5V, se conecta directamente al SMC como entrada, sin ningún acondicionamiento previo.
- Visualización: Se incluyen dos grupos de displays de LEDs de alta intensidad luminosa para la medición de la Frecuencia del Árbol de Levas en rpm (resolución: 10 rpm), y del Tiempo de Inyección en ms (resolución: 0,1ms).

El diseño del MIPM se dividió en dos módulos:

- Generación de señales para la simulación y prueba
- Captura de las señales muestreadas y generación de las salidas visuales

El distribuidor mecánico, que produce las señales reales E_a y E_b , es un disco metálico con dos hileras de perforaciones circulares a lo largo de dos circunferencias internas concéntricas, una con una sola perforación (para la señal E_b), y otra con seis, para la señal E_a . Este disco genera las señales por efecto Hall a partir de un juego de imanes, como se puede ver en la Figura 6.

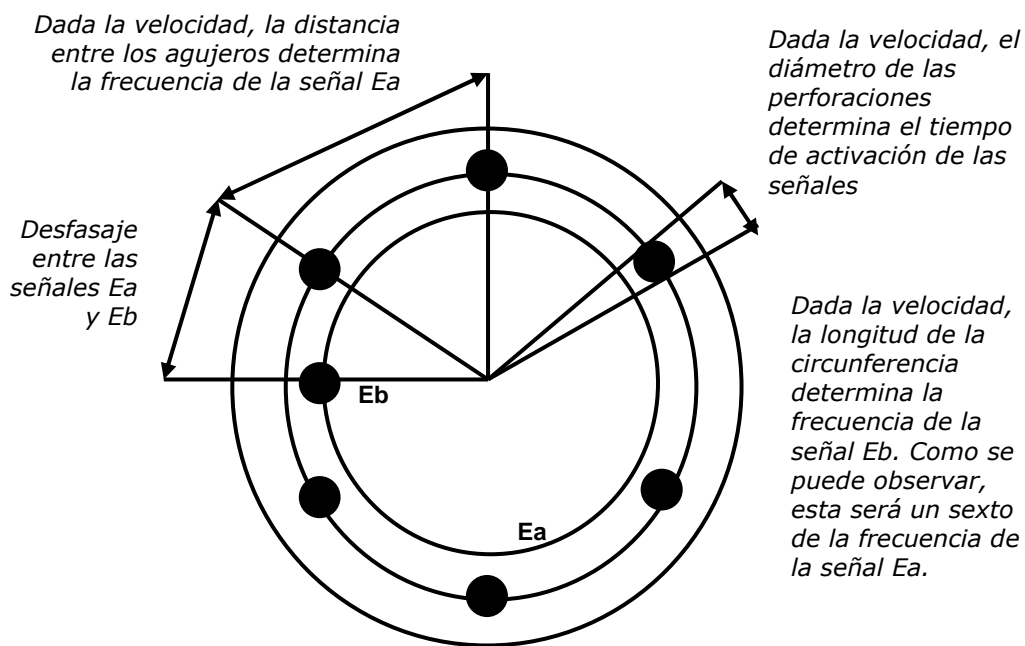


Figura 6: Esquema del distribuidor

Debido a la configuración geométrica del distribuidor, el ciclo de trabajo (Duty Cycle) de ambas señales depende de sus frecuencias, es decir, el tiempo en que el sensor Hall recibirá la señal debida a una cualquiera de las perforaciones depende de la velocidad de giro del distribuidor y del tiempo en que el imán está situado frente a uno de los agujeros. De la misma manera, sus frecuencias están apareadas. La frecuencia de la señal E_a es seis veces la frecuencia de la señal E_b , y el desfase está dado por la distancia entre la perforación correspondiente a la

señal E_b y las correspondientes a los pulsos anterior y posterior de la señal E_a . Por lo tanto, para la generación de las señales simuladas, simplemente hace falta indicar una de estas variables, y de allí es posible derivar matemáticamente todas las demás.

Para la captura de las señales medidas hacen falta dos canales de temporización del microcontrolador configurados en "input capture". Las dos mediciones son directas ya que para medir el ancho de pulso simplemente se necesita contabilizar el tiempo transcurrido entre el flanco ascendente y el descendente de la señal que se envía a alguno de los inyectores, y para medir la frecuencia simplemente es necesario contar la cantidad de flancos de la señal que ingresa al MIPM en un tiempo determinado y mostrarla en forma de frecuencia del árbol de levas. Estas dos capturas se ejecutan asincrónicamente, a medida que se reciben las entradas correspondientes, y conviven simultáneamente con una rutina de actualización de las salidas.

La Figura 7 muestra la implementación de un autómata de pila destinado a esta operación.

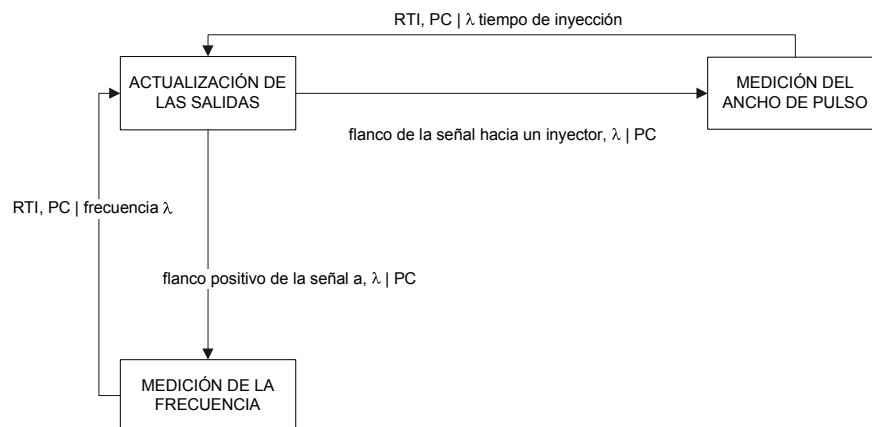


Figura 7: Autómata de pila destinado a la captura de las señales medidas y generación de las salidas visuales en el MIPM

4.2. Diseño del Hardware electrónico y del contenedor

El hardware electrónico del sistema de prueba está constituido por una placa que consta de tres partes:

- El microcontrolador 68HC908GP32, con su circuito correspondiente.
- Una interfaz hombre-sistema que incluye los circuitos correspondientes a la visualización de las salidas y la generación de entradas.
- Las entradas y salidas

La Figura 8 muestra vistas del MIPM. El contenedor consiste en una caja plástica adecuadamente mecanizada para la inserción de los conectores, los potenciómetros y los displays de LEDs.



Figura 8: Vista del contenedor del sistema de prueba. Se observa la interfaz con el usuario e instrucciones básicas de conexión.

5. CONCLUSIONES

El prototipo industrial del SMC fue probado exhaustivamente, cumpliendo con los requerimientos y premisas establecidos. Las pruebas incluyeron la medición del tiempo real de inyección (error máximo: 10%), la secuencia correcta de generación de señales (ningún error reportado desde 1 rpm hasta 3600 rpm) y el algoritmo de validación de las señales de entrada (ningún falso positivo detectado). El retardo en la generación de una salida hacia los inyectores después de la captura de un flanco descendente de la entrada E_a permaneció por debajo de los 200us requeridos, y el subsistema de validación de las señales de entrada E_a y E_b diferenció correctamente las señales válidas e inválidas, garantizando la inexistencia de falsos positivos en las salidas, premisa de las especificaciones.

El MIPM también fue evaluado, obteniéndose errores máximos de 0,7% en la medición de velocidad del motor y 1% en la temporización de las señales simuladas del distribuidor.

El SMC está diseñado para aceptar modificaciones que amplíen sus prestaciones, como ser cambiar la cantidad de cilindros de motor y aumentar la flexibilidad en la configuración de los tiempos de inyección.

6. REFERENCIAS

- [1] Mardiesel S.R.L., *Inyector de combustible gaseoso apto para motores de combustion interna vehiculares e industriales - Patente en Trámite Nro 050103982*, Instituto Nacional de la Propiedad Industrial, (2005)
- [2] A.P. Carlucci, A. de Risi, D. Laforgia and F. Naccarato, Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual-fuel diesel–natural gas engine, *Energy* (en prensa) (2007)
- [3] K. Hoag, *Vehicular Engine Design*, Springer-Verlag, Austria, 2006
- [4] P. Spasov, *Microcontroller Technology: the 68HC11*, Prentice Hall, USA, 2001
- [5] T. Denton, *Automobile Electrical and Electronic Systems*, Elsevier Butterworth-Heinemann, USA, 2004