

## **Sistemas digitales de control para ensayos de motores de combustión interna**

Juan F. Giró<sup>(1,2)</sup>, José E. Stuardi<sup>(1)</sup> y Julio C. Massa<sup>(1,3)</sup>

<sup>(1)</sup> *Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba  
Casilla de Correo 916, (5000) Córdoba, Argentina. e-mail: juanfgyro@gmail.com*

<sup>(2)</sup> *Departamento de Ingeniería de Sistemas de Información, Facultad Regional Córdoba,  
Universidad Tecnológica Nacional, Maestro M. Lopez esq. Cruz Roja Argentina,  
Ciudad Universitaria, C.P. (X5016ZAA) Córdoba, Argentina, www.frc.utn.edu.ar*

<sup>(3)</sup> *Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto,  
Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto, Argentina, jmassa@efn.uncor.edu*

### **RESUMEN**

En este trabajo se presentan resultados de experiencias realizadas al desarrollar sistemas de control para ensayos de motores de combustión interna. Un requisito esencial para ensayar motores de combustión interna es poder alcanzar rápidamente la estabilidad del conjunto motor-freno en diversas condiciones de marcha, mantenerlas ininterrumpidamente durante intervalos de variada duración y pasar con gran agilidad de una condición de operación a otra. Esto permite la operación automática del motor en condiciones preestablecidas de velocidad y torque para comprobar sus prestaciones, incluyendo mediciones de torque, consumo y composición de gases de escape. El sistema de control tiene la misión de alcanzar y mantener las condiciones de velocidad y torque deseadas, operando sobre los dos parámetros básicos que son la alimentación de combustible al motor y la capacidad de frenado del dinamómetro. Para cumplir estas exigencias se recurrió a un sistema de control conmutado que se apoya en unidades de lógica proporcional, integral y derivativa (PID), que son las encargadas de hacer los correspondientes ajustes sobre los parámetros de control a partir de la determinación de errores en la velocidad y carga del motor. La implementación de este tipo de sistemas a través de un Módulo Digital sobre PC demostró ser una opción muy ventajosa por su bajo costo, buena performance y alta confiabilidad, presentándose como una alternativa a unidades electrónicas convencionales. Como contrapartida, debe señalarse que en todos los casos el ajuste de estas unidades de control exigió experiencia y un proceso bastante laborioso. Se describen los criterios de diseño empleados en estas unidades.

**Palabras Claves:** ensayos de motores, controladores PID, sistemas digitales de control.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un requisito esencial para ensayar motores de combustión interna es poder alcanzar rápidamente la estabilidad del conjunto motor-freno (Figura 1) en diversas condiciones de marcha, mantenerlas ininterrumpidamente durante intervalos de variada duración y pasar con gran agilidad de una condición de operación a otra. Esto permite la operación automática del motor en una secuencia de condiciones preestablecidas de velocidad y carga, que responden a las exigencias de normas específicas de ensayo [1] y que prevén la medición de numerosos parámetros entre los que se incluyen temperaturas, presiones, torque, consumo y composición de gases de escape.

Para alcanzar rápidamente la estabilidad requerida del conjunto motor-freno en las condiciones de velocidad y torque prefijadas es necesario un sistema de control apropiado, que opere sobre dos parámetros básicos que son la alimentación de combustible al motor y la capacidad de frenado del dinamómetro. Tradicionalmente este problema ha sido resuelto con unidades de lógica proporcional, integral y derivativa (PID) que hacen los correspondientes ajustes a partir de los errores en la velocidad y carga del motor.

En la historia de los ensayos dinamométricos de motores de combustión interna se distinguen cuatro generaciones: 1) operación manual de los ensayos, 2) conducción automática a través de controladores electromecánicos, 3) uso de unidades electrónicas independientes microcontroladas y 4) sistemas integrados de ensayos y evaluación de motores. En el desarrollo de estos últimos tiene marcada influencia el computador personal (PC), que a través de una interfaz gráfica de alta resolución se ha convertido en el eje de los modernos sistemas de ensayo.



Figura 1 Vista de un motor en ensayo, transmisión cardánica (protegida), freno dinamométrico, circuitos auxiliares de refrigeración, conductos de aire y escape

En efecto, al incorporarse la PC al equipamiento de ensayos surgió naturalmente la inquietud de implementar un módulo digital de control para aprovechar la nueva capacidad de procesamiento disponible. Se procuró así reemplazar los tradicionales equipos electrónicos analógicos destinados a esta finalidad. De esta manera se obtuvo una substancial reducción en el costo de la instalación sin pérdida de confiabilidad, ya que se eliminó un elemento complejo que requiere además de una atención muy especializada. Como contrapartida, éste traslado de la lógica de control electrónico hacia el software informático planteó la necesidad de superar numerosas dificultades vinculadas esencialmente con los márgenes de estabilidad requeridos.

Resulta importante destacar que se trata de sistemas de tiempo real que operan en forma continua a lo largo de varios días, cumpliendo tres funciones básicas: a) adquirir datos, b) controlar la marcha del motor y c) verificar en todo momento las condiciones de seguridad de las pruebas. Las características distintivas de estas aplicaciones de control son la presencia de inercias mecánicas importantes, elevadas aceleraciones y requerimientos de gran estabilidad con escaso margen de error. Como ejemplo, puede señalarse que es habitual una tolerancia máxima en el error de velocidad de  $\pm 5$  rpm, que a una velocidad de rotación de 5.000 rpm representa un error del 0,1 %.

En este documento se presentan propuestas referidas al diseño e implementación de unidades de control sobre computadoras personales, que surgieron como resultado de numerosas experiencias realizadas en los últimos veinte años en más de cincuenta instalaciones de diverso tipo, tanto con dinamómetros eléctricos (Fucol o de corrientes parásitas) como también con frenos hidráulicos. Para la solución del problema se acudió a los conceptos teóricos, los que inspiraron soluciones y condujeron a resultados que obligaron a su vez a volver a los primeros para su interpretación, desarrollándose un ciclo de ajustes sucesivos teórico-empíricos que permitió alcanzar una unidad de control capaz de cubrir las exigencias que plantean este tipo de ensayos.

## 2. PLANTEO DEL PROBLEMA

Los dos componentes principales del sistema son el motor y el freno dinamométrico, vinculados entre sí mediante un eje de transmisión cardánica como se muestra en la Figura 1. En la Figura 2 se presenta un esquema de este conjunto y en la Figura 3 se muestran las curvas características del motor y del freno en diferentes condiciones de operación, donde las intersecciones de estas curvas representan algunas de las infinitas condiciones de equilibrio del sistema.

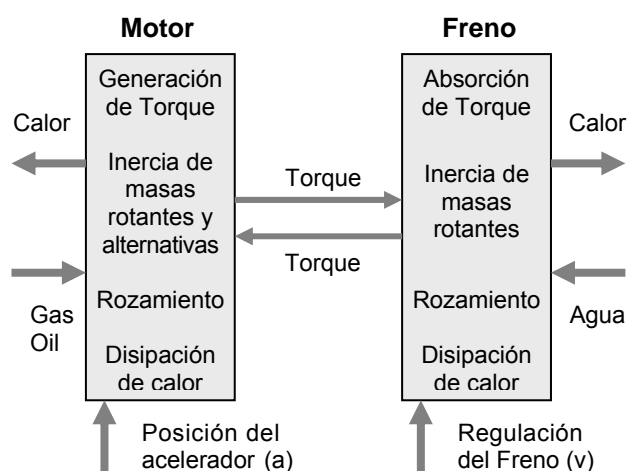


Figura 2 Conjunto motor-freno

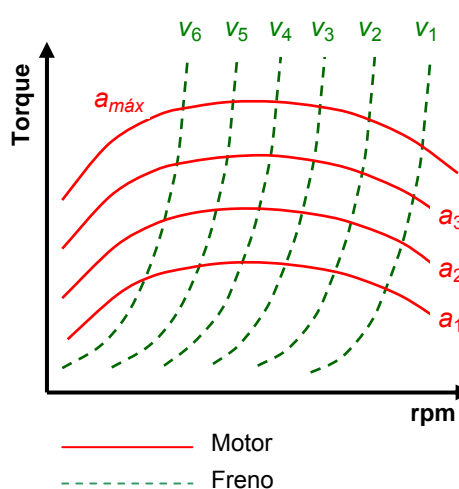


Figura 3 Condiciones de equilibrio

El objetivo de la unidad de control es posibilitar la operación de este sistema en cualquier condición de velocidad-torque y trasladarlo rápidamente de una de estas condiciones a otra en la región de operación del motor y del dinamómetro

El conjunto motor-freno encuentra su equilibrio a diferentes velocidades cuando en un régimen estacionario el torque entregado por el motor iguala al torque absorbido por el freno y los rozamientos, experimentando procesos de aceleración y desaceleración hasta que se alcanza el mencionado equilibrio. Este comportamiento puede ser adecuadamente representado por ecuaciones diferenciales de equilibrio dinámico que incluyen momentos de inercia ( $I$ ), amortiguamientos ( $C$ ), rozamientos ( $F_S$ ), elasticidad del sistema y cargas en el motor ( $T_M$ ) y en el freno ( $T_F$ ). En el caso más simple, considerando una transmisión cardánica rígida, el equilibrio dinámico es representado por la ecuación (1):

$$(I_M + I_F + I_T) \frac{d\omega}{dt} + (C_M + C_F) \omega = T_M + T_F + F_S \quad (1)$$

Para medir la velocidad  $\omega$  se dispone de una rueda dentada (normalmente de 60 dientes) fija al eje del conjunto y un sensor magnético que genera un pulso al paso de cada diente. La velocidad del motor se calcula a partir de la cantidad de pulsos obtenidos en un intervalo de tiempo, cuando las velocidades son moderadas o altas, y a partir del intervalo de tiempo entre cierta cantidad de pulsos, cuando las velocidades son bajas. Los algoritmos empleados para esta tarea incluyen el filtrado de ruido y otras perturbaciones, y son relativamente complejos, ya que la resolución requerida en la medición de la velocidad es del orden de 1 rpm.

Para medir el torque  $T_F$  se utiliza una celda de carga, normalmente de tipo axial en tracción, que está montada sobre una vertical a cierta distancia del eje del freno. El brazo de fijación de la celda es solidario al estator del freno, el que a su vez es basculante para permitir la medición del torque reactivo, es decir el torque de frenado. Los requisitos son aquí un amplificador de celda de carga que asegure linealidad en todo el rango de mediciones y un conversor análogo-digital razonablemente rápido con una resolución de 12 bits.

Obsérvese que, con la solución propuesta, el valor medido corresponde al torque absorbido por el freno  $T_F$  y no al torque entregado por el motor  $T_M$ , los que sólo son iguales (despreciando rozamientos) cuando el conjunto motor-freno se encuentra en funcionamiento estacionario. Sin embargo, éstos son diferentes en los regímenes transitorios de aceleración y desaceleración, que son precisamente las condiciones más críticas para la intervención del sistema de control. La necesidad e importancia de distinguir entre el torque del motor y del freno fue puntualizada por Hori [2] pero es inadvertida en la mayor parte de la literatura especializada. De la Ecuación (1) que corresponde al caso de una transmisión cardánica muy rígida se deduce que:

$$T_M = (I_M + I_F + I_T) \frac{d\omega}{dt} + (C_M + C_F) \omega - T_F - F_S \quad (2)$$

lo que indica que el torque  $T_M$  entregado por el motor debe ser determinado a partir de las lecturas de los valores del torque medidos en la celda de carga  $T_F$ , las fuerzas de rozamiento, la velocidad y la aceleración del sistema. Los valores de las inercias ( $I$ ) son normalmente provistas por los fabricantes de los equipos y los coeficientes de fricción ( $C$ ) y rozamiento ( $F_S$ ) son característicos del sistema dinámico y deben ser evaluados experimentalmente.

La determinación de la aceleración involucra un proceso de derivación numérica empleando valores de la velocidad, medidos en los pasos anteriores. Para ello se utilizó la derivada de una ecuación cúbica ajustada por mínimos cuadrados, que brindó buenos resultados.

En resumen, se dispone de la velocidad del conjunto  $\omega$  y el torque del motor  $T_M$ , que definen las condiciones de operación del sistema (variables del proceso  $VP$ ) que deben ser mantenidas iguales a valores prefijados representados por  $\omega_0$  y  $T_0$ .

Para la acción de control se dispone a su vez de dos variables ( $VC$ ) que son la posición del acelerador (o bomba inyectora) del motor ( $a$ ) y la regulación de frenado del dinamómetro ( $v$ ), por lo que se trata de un sistema MIMO (Multi Input – Multi Output). En el caso de frenos de corrientes parásitas, la regulación del freno se realiza mediante una tensión y en el caso de los frenos hidráulicos por la posición de una válvula reguladora del caudal de agua. Las familias de curvas representadas en la Figura 3 ilustran el comportamiento del motor con ciertas posiciones del acelerador ( $a_1, a_2, a_3 \dots$ ) y del dinamómetro con varias posiciones de regulación de frenado ( $v_1, v_2, v_3 \dots$ ).

### 3. CONDICIONES DE OPERACIÓN

Según el tipo de ensayo y la norma utilizada, se establecen diferentes condiciones de operación del motor, pero todas ellas quedan inscriptas en cinco operaciones características que se toman como referencia para la definición de las unidades de control. Las cinco condiciones de operación básicas del ensayo de motores están representadas en la Figura 4 y son las siguientes:

- 1) *Variación de la velocidad sin carga*: se suministra el torque necesario para mantener el motor en movimiento a la velocidad prefijada, venciendo las fuerzas de rozamiento del conjunto. El freno permanece descargado y sólo se trabaja con la posición del acelerador ( $VC = a$ ) según los errores observados en la variable de proceso ( $VP = \omega$ ).
- 2) *Variación de la velocidad a carga máxima*: se lleva el acelerador a su condición de apertura máxima ( $a_{máx}$ ) y se frena el motor a las velocidades deseadas, siendo esencial aquí asegurar la estabilidad en la marcha del motor, ya que normalmente en estas condiciones se mide potencia, consumo y nivel de emisiones. En este caso la carga del freno ( $VC = v$ ) es corregida según los errores de velocidad ( $VP = \omega$ ) registrados.

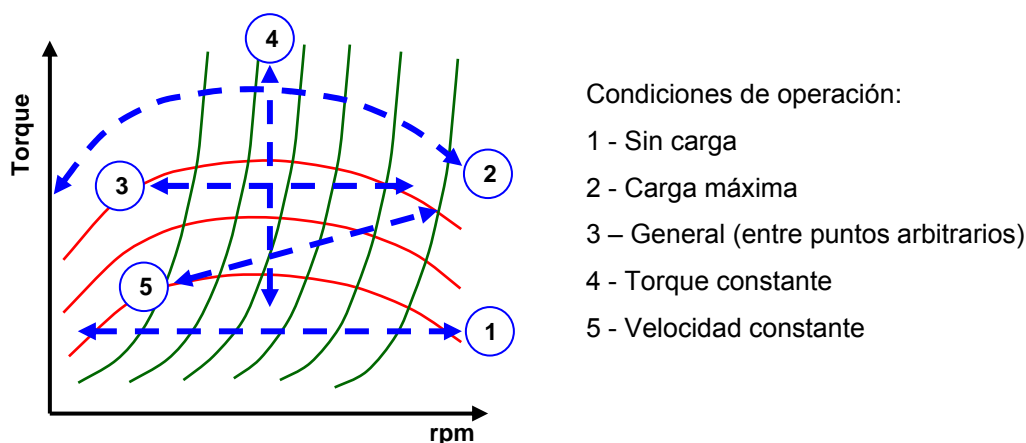


Figura 4 Condiciones de operación típicas en ensayos de motores

- 3) *Torque constante*: se mantiene el torque del motor en un valor prefijado ( $VP = T_M$ ) en todo el rango de velocidades. Se actúa sobre el acelerador o freno ( $VC = a$  o  $VC = v$ ) según la zona de operación.
- 4) *Variación de torque a velocidad constante*: mientras se varía la posición del acelerador se mantiene la velocidad en un valor determinado ( $VP = \omega$ ) en todo el rango de carga del motor, actuando sobre el freno ( $VC = v$ ).
- 5) *Operación general*: se desea operar libremente el motor en cualquier punto del área de trabajo y posibilitar el pasaje de un punto a otro cumpliendo dos condiciones esenciales, que son rapidez y ausencia de oscilaciones. En este caso deben reconocerse las condiciones más exigentes, como puede ser el caso de llevar al motor desde la máxima a la mínima velocidad a plena carga o cargas intermedias. Se trabaja simultáneamente con el acelerador y el freno, por lo que  $VP = \{ \omega, T_M \}$  y  $VC = \{ a, v \}$ , característico de un sistema MIMO.

#### 4. UNIDAD DE CONTROL

##### 4.1 Control PID

Para la acción básica de control realimentado se recurre a la unidad PID (Proporcional, Integral y Derivativa) que es representada en la Figura 5. Los conceptos asociados al controlador de tipo PID tuvieron un respaldo teórico a partir del trabajo de Minorsky [3] y, a pesar de disponerse de alternativas más modernas y sofisticadas, en la actualidad mantiene plena vigencia debido a su simplicidad, versatilidad y eficacia [4]. Sin embargo, su mayor limitación es la tendencia a generar ajustes de elevada magnitud en respuesta a errores que cambian con mucha rapidez [5], como ocurre frecuentemente en el caso del problema aquí tratado. En efecto, este inconveniente se origina en la acción derivativa y se pone de manifiesto ante cambios bruscos en las condiciones de control requeridas. Para resolver este problema se trasladó el componente derivativo, de manera que sea calculado sobre la variable realimentada de salida del proceso y no sobre su error. Esta lógica de control, denominada PI-D [6] y mostrada en la Figura 6, demostró ser una excelente alternativa al esquema PID clásico y brindó muy buenos resultados.

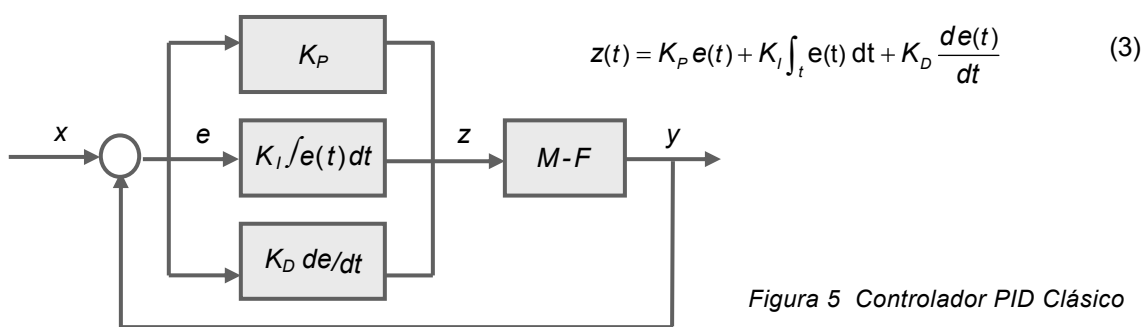


Figura 5 Controlador PID Clásico

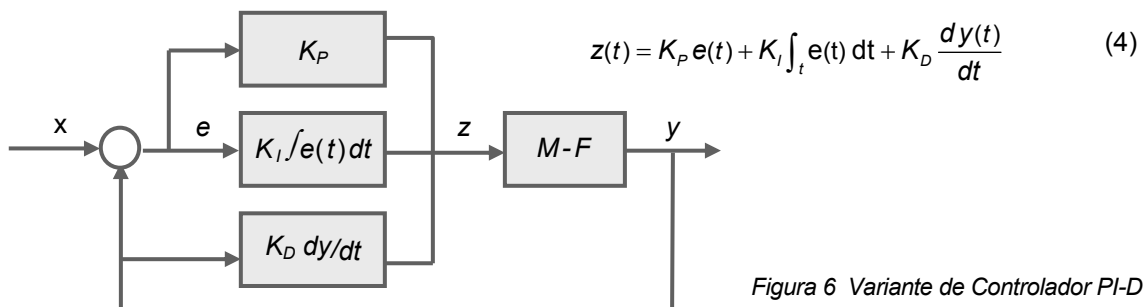


Figura 6 Variante de Controlador PI-D

#### 4.2 Lógicas de Control

Por tratarse de un Sistema MIMO se presentan opciones para combinar las variables de proceso y las variables de control. Se definieron así dos lógicas principales de control que tienen cada una como elementos centrales dos unidades PID (Proporcional, Integral y Derivativa), que utilizan las mismas variables de control (VC) y variables de proceso (VP) y se distinguen en la forma en que estas últimas son realimentadas.

Los esquemas de ambas opciones, denominadas Casos A y B, son representados en las Figuras 7 y 8, mostrándose las unidades PID y demás componentes de medición, amplificación, generación de señales y control. Si bien la literatura advierte que el control independiente de variables de proceso en sistemas MIMO, como el aquí propuesto, sólo es aplicable a casos especiales y carece de generalidad [6], las experiencias realizadas demostraron que ésta es una solución apropiada para el control de motores.

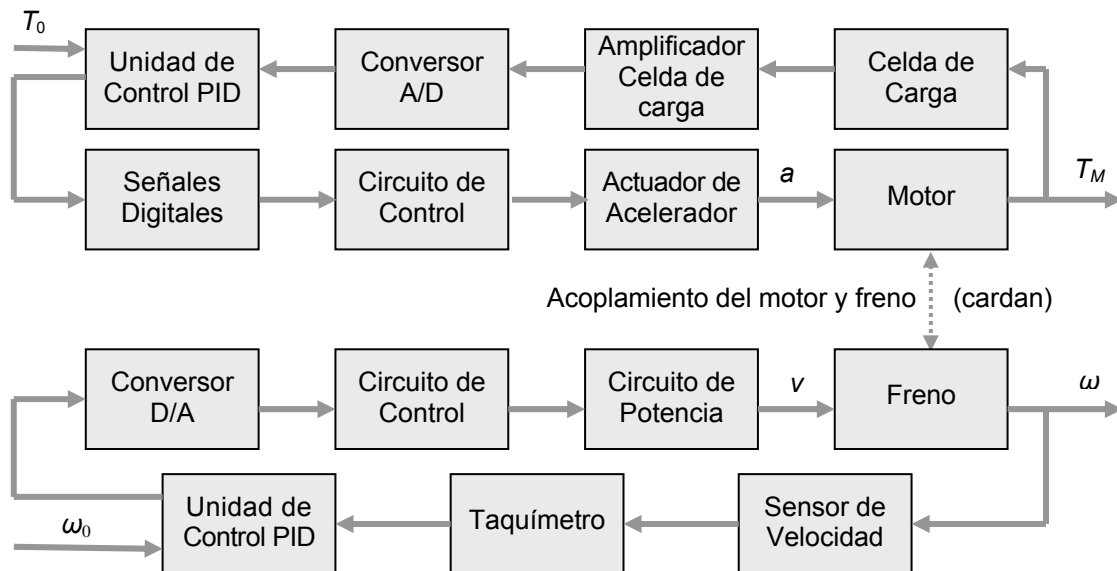


Figura 7 Control independiente de las variables de proceso (Caso A)

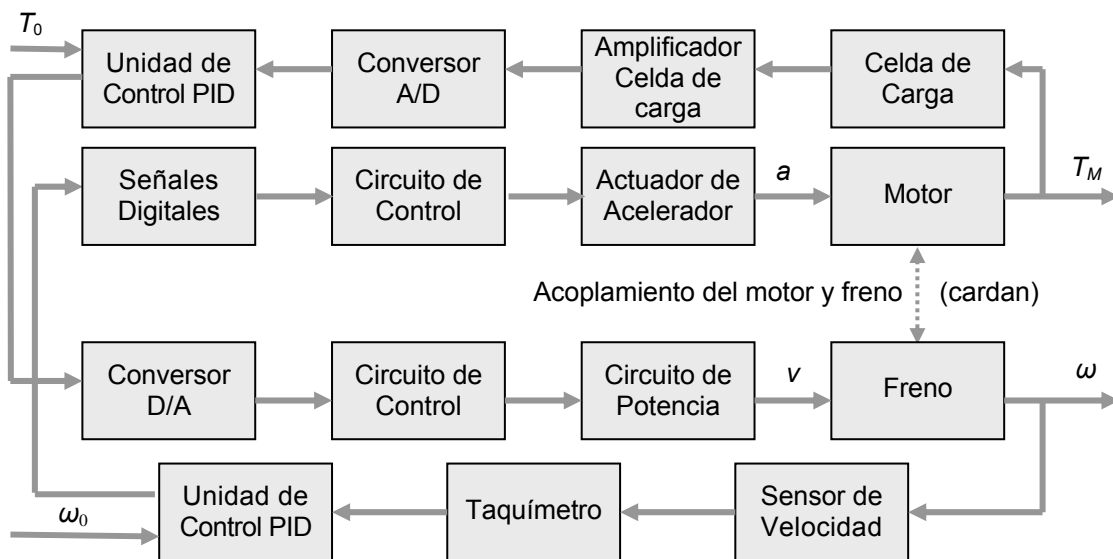


Figura 8 Control independiente con realimentaciones cruzadas (Caso B)

### 4.3 Control Conmutado

Si bien las lógicas de control tipificadas como casos “A” y “B” permiten cumplir con todas las condiciones de operación requeridas en el ensayo de un motor, el sistema debe ser capaz de seleccionar la más apropiada para cada caso y pasar de una a otra cuando sea más conveniente. En efecto, la disponibilidad de dos lazos de realimentación independientes y simultáneos obligaron a un proceso de sincronización o secuenciado de las acciones sobre el freno y el acelerador, lo que es realizado con una unidad de control conmutado que fue implementada a través de una Máquina Secuencial de Moore. De esta forma se obtuvo un “sistema de control de estructura variable” del tipo de los definidos conceptualmente por Utkin [7] y De Carlo [8], donde se altera la estructura de la lógica de control de manera de asegurar, en el espacio de estados, una trayectoria compatible con ciertas condiciones que aseguren su precisión y estabilidad. El conjunto de estados previstos para la máquina de Moore fue implementada a partir de las lógicas de control tipificadas como Casos A y B y son definidos en la Tabla 1.

Tabla 1 Definición del conjunto de estados de la Máquina Secuencial de Moore

Estado	Descripción	Variable de Control (VC)	Variable de Proceso (VP)	Condición especial
q <sub>0</sub>	Motor descargado a velocidad mínima	Ninguna	Ninguna	Arranque y detención
q <sub>1</sub>	Motor con frenado constante o libre	Posición del acelerador	Velocidad	Tensión de frenado constante o nula
q <sub>2</sub>			Torque	
q <sub>3</sub>	Motor a carga constante	Tensión en el freno	Velocidad	Acelerador en posición constante
q <sub>4</sub>			Torque	
q <sub>5</sub>	Operación General (Caso A)	Posición del acelerador	Torque	Ajuste simultáneo de la tensión de frenado y posición del acelerador
		Tensión en el freno	Velocidad	
q <sub>6</sub>	Operación General (Caso B)	Posición del acelerador	Velocidad	
		Tensión en el freno	Torque	

Para completar la Máquina de Moore debe definirse su función de transición. Para ello se ensayaron numerosas alternativas de diagramas de estados, como el representado en Figura 9, sin que pueda decirse que se encontró una solución concluyente. En cada caso la función de transición se completa con la definición de las condiciones que provocan los cambios de estados y esto es realizado a través de reglas de producción que son cargadas desde una tabla exterior al sistema.

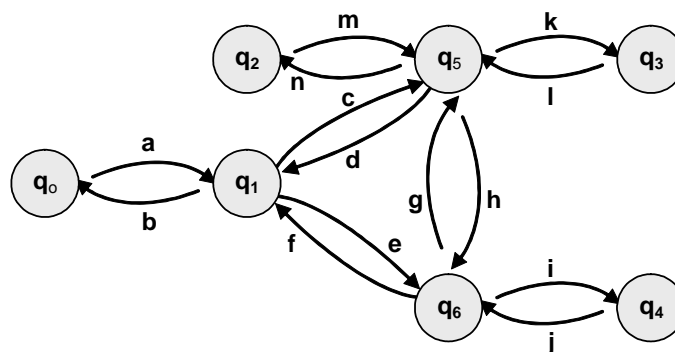


Figura 9 Diagrama de estados de la máquina secuencial de conmutación de condiciones de control

Los lenguajes de reglas de producción son una forma conveniente de definir las condiciones de transición, ya que facilita su adecuación para atender condiciones especiales o para mejorar el desempeño de la unidad de control a partir de los resultados obtenidos con su utilización. En concordancia con este enfoque, la unidad de control conmutado adoptó la forma de un intérprete de reglas de producción, donde las reglas toman como argumentos una combinación de las variables del sistema ( $VC$ ,  $VP$ , condiciones requeridas y variables auxiliares) y permiten la definición de condiciones tan complejas como sea necesario. Por ejemplo, una de las reglas que da lugar a la condición de transición “a” del diagrama de estados (Figura 9) toma la forma:

$$Q0; \quad VELO > VELMIN; \quad FREN = 0; \quad TAGS > TAMIN \quad \rightarrow \quad Q1 \quad (5)$$

que establece que: estando en el estado  $q_0$ , con velocidad requerida mayor que la velocidad mínima, con condición de frenado nula y temperatura de agua motor (salida) mayor que la mínima permitida, pasar a estado  $q_1$ .

## 5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA Y RESULTADOS OBTENIDOS

Como ya fue anticipado, los resultados y dificultades encontradas en sucesivas experiencias y las ideas halladas en la literatura especializada permitieron perfeccionar en forma progresiva una unidad de control apta para conducir con seguridad y precisión ensayos de diverso tipo. El traslado de la acción de control desde circuitos electrónicos especializados a módulos de software incorporados en el computador personal (PC) redujeron enormemente el costo de las instalaciones y eliminaron una fuente potencial de fallas, manteniendo una prestación similar a condición de que se cumplan dos condiciones esenciales: 1) una adecuada regulación de las constantes ( $K_P$ ,  $K_I$  y  $K_D$ ) de las cuatro unidades PID básicas (Figuras 5 y 6) incorporadas en los Casos A y B ya definidos ( $VC = \{a, v\}$  y  $VP = \{\omega, T_M\}$ ), y 2) la definición del conjunto de reglas de producción necesarias para todas las transiciones previstas en la unidad conmutada (máquina secuencial de Moore). Estos son puntos centrales, ya que ambas condiciones permitirán operar al conjunto motor freno de manera de cumplir los requerimientos del ensayo y asegurar la integridad de sus componentes.

Por último, es necesario un tercer nivel de control (no descrito aquí por razones de espacio) que es el encargado de interpretar las secuencias de condiciones requeridas a lo largo del ensayo (programas de ensayo): 1) fijar a la unidad conmutada los valores de  $\omega_0$ ,  $T_0$  requeridos en cada caso, 2) determinar la duración de cada condición y 3) definir los requerimientos especiales de adquisición de datos (medición de consumo, blow by, emisiones, etc.).

A título de ejemplo, en la Figura 10 se reproduce una secuencia de ensayo en la pantalla de una unidad de control y en un sector ampliado (amarillo) se muestra con más detalle las condiciones del motor. Se trata de un ensayo corto (producción) que típicamente se realiza sobre todos los motores a la salida de la línea de montaje. En este caso el ensayo tiene una duración total de unos 22 minutos, en los que inicialmente se calienta el motor a un régimen moderado (1) para luego probar los puntos de máxima potencia (2) y máximo torque (3). En estas dos últimas condiciones es muy importante la estabilidad del motor en velocidad y carga, midiéndose consumo, temperaturas, presiones, blow by y emisiones.

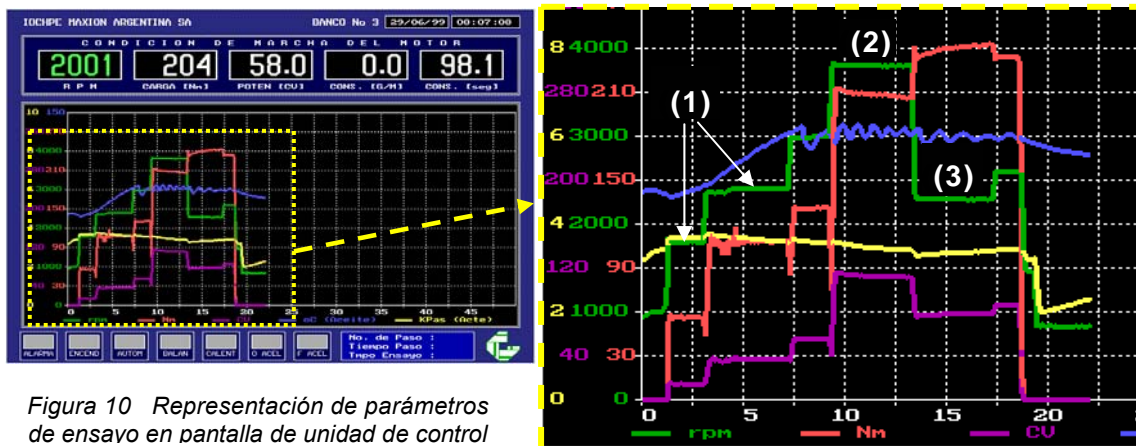


Figura 10 Representación de parámetros de ensayo en pantalla de unidad de control

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se propusieron ideas referidas al diseño e implementación de unidades de control para el ensayo de motores. La implementación de estos sistemas a partir de unidades PID, coordinadas por una máquina secuencial de estados y en un Módulo Digital sobre PC demostró ser una opción muy ventajosa por su bajo costo, alta confiabilidad y buen desempeño.

Al mismo tiempo, merece ser destacada la flexibilidad que ofrece este tipo de sistema para adecuarse a las más variadas combinaciones de dinamómetros, tipos de motor y condiciones de ensayo. Como contrapartida debe señalarse que en todos los casos el ajuste de las constantes de las unidades PID y la definición de las transiciones de la máquina secuencial dan lugar a un proceso bastante laborioso y que requiere experiencia.

Se estima que podría superarse esta última limitación dotando de cierta inteligencia a la unidad de control, de manera de permitirle mejorar su desempeño a partir de sus propias experiencias, convirtiéndolo en un sistema de control adaptativo inteligente. El trabajo a ser realizado en el futuro se orientará en esta dirección.

## 7. REFERENCIAS

- [1] ISO 8178, *Reciprocating Internal Combustion Engines - Exhaust Emission Measurement*, 2002.
- [2] M. Hori, M. Suzuki, M. Nomura, M. Terashima, *High-Performance Automotive Engine Control in Engine Tester*, Industry Applications Conference, Annual Meeting, IAS '95, pp.1572-1579, 1995.
- [3] X. Minorsky, *Directional Stability of Automatically Steered Bodies*, Journal of the American Society of Naval Engineering, **34**:280-309, 1922.
- [4] G. Goodwin, S. Graebe, M. Salgado, Classical PID Control, *Prentice Hall*, 2001.
- [5] A. Voda, I. Landau, *A Method for the Auto-calibration of PID Controllers*, Automatica, **31**(1):41-53, 1995.
- [6] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, *4a Edición*, Pearson, 2003.
- [7] V. Utkin, *Variable Structure Systems with Sliding Modes*, IEEE Transactions on Automatic Control, **22**(2):212-222, 1977.
- [8] R. DeCarlo, S. Zak, G. Matthews, *Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial*, Proceedings of the IEEE, **76**(3):212-232, 1988.