

# HERRAMIENTA PARA SIMULACIÓN Y CONTROL EN TIEMPO REAL DE UN MOTOR DE C.C. APLICANDO DIVERSAS ESTRATEGIAS

Juan Ildefonso Galán Alcaide

[elgalan@terra.es](mailto:elgalan@terra.es)

Jorge E. Jiménez Hornero

[jjimenez@uco.es](mailto:jjimenez@uco.es)

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Departamento de Informática y Análisis Numérico  
Universidad de Córdoba  
Campus Rabanales.- Edificio Albert Einstein  
14071 - Córdoba

## Resumen

*Se presenta en este trabajo una herramienta que permite al alumno realizar de forma interactiva tanto la simulación como el control experimental de un motor de C.C. mediante un sistema de adquisición de datos y actuación basado en PC, con las siguientes estrategias implementadas: PID, control en el espacio de estados, control predictivo y control adaptativo. En cada una de éstas podrán ser modificados sus parámetros más significativos y observar los resultados. La herramienta permite el control tanto de la velocidad angular del motor como de su posición, es decir, grados girados por el rotor.*

**Palabras clave:** Control digital, simulación, tiempo real, docencia en control.

## 1 INTRODUCCIÓN

Hasta no hace excesivos años, el ingeniero de control se encontraba obligado a dominar ineludiblemente la tecnología analógica debido al uso de estos dispositivos como herramienta más importante para realizar cálculos y simulaciones. Y aun más cercano a nuestros días, y contando ya con tecnología digital, se imponía el uso de dispositivos específicos para solventar algún problema determinado, presentando entonces la solución diseñada un alto déficit de versatilidad. Sin embargo, debido a la mejora del rendimiento, así como al vertiginoso descenso de costes, se ha verificado un intenso proceso de implantación en el sector industrial de sistemas de control basado en PC, realizándose controladores avanzados incluso para aplicaciones elementales.

Al mismo tiempo, y justificación esencial de este trabajo, el uso del PC permite ampliar en el campo académico las posibilidades de enseñanza y

comprensión de diferentes estrategias de control muy representativas por las que el alumno podrá optar.

## 2 BASE EXPERIMENTAL

La planta física utilizada es el “Servomecanismo Modular MS-150”, distribuido por Prodel. Mediante el conexionado de los módulos apropiados, tal y como muestra la Figura 1, se consigue un sistema que, resumiendo para el interés de este trabajo, presenta una entrada y dos salidas. La entrada será la tensión suministrada al motor y podrá oscilar entre 0 y 5 V. Y las salidas serán: por un lado la velocidad angular que se nos presentará desde el tacómetro de forma analógica, y por otro la posición del motor que se nos presentará desde el encoder de forma digital mediante 2 bytes de datos que habrá que leer secuencialmente, al estar limitado el ancho de palabra a 1 byte.

En cuanto a la tarjeta de adquisición, se hace uso de la “Advantech PCI-1711”, suministrada con el conjunto.

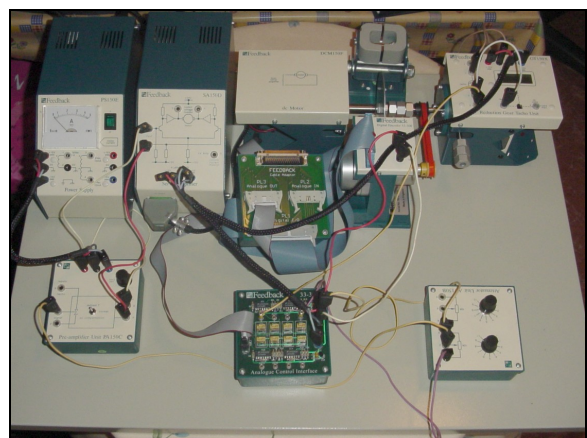


Figura 1: Planta experimental

### 3 ESTRATEGIAS DE CONTROL IMPLEMENTADAS

#### 3.1 IDENTIFICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA

Antes de realizar el diseño de los sistemas de control que implementa la herramienta y que serán expuestos a continuación, es evidente la necesidad de disponer del modelo matemático de la planta a controlar. Y dada la naturaleza de la misma se puede realizar un simple proceso experimental del que extraer las características necesarias para el establecimiento de dicho modelo. Además, la propia herramienta incorpora una ventana para extraer y almacenar los datos de estos experimentos, tanto en velocidad como posición ante cambios en la tensión de entrada. Importante es reseñar que el periodo de muestreo utilizado para la adquisición de datos es de 0.01 segundos, y se demuestra que es suficiente para la características dinámicas que presenta el motor.

Una vez disponibles dichos datos se realiza el proceso de identificación haciendo uso de los mismos, bien mediante aplicación de fórmula directa, como en el caso del modelo en velocidad al tratarse de un sistema de primer orden, o bien mediante el uso de software específico de identificación (toolbox Ident de MATLAB) para el caso del modelo en posición.

Se obtienen entonces los siguientes modelos de la planta:

Modelo en velocidad:

$$G(z) = \frac{0.2218}{z - 0.8521} \quad (1)$$

Modelo en posición:

$$G(z) = \frac{2.79z + 2.79}{z^2 - 1.84673762z + 0.84673762} \quad (2)$$

Comprobándose mediante experimentación que ambos modelos representan con alta eficiencia la dinámica del sistema a controlar.

#### 3.2 CONTROLADOR PID

La importancia que el alumno debe dar a este controlador viene acreditada por el hecho de ser la estrategia más utilizada en control de procesos, ya que la flexibilidad y robustez que presentan los hacen idóneos para las aplicaciones más exigentes, siendo capaces de proporcionar las especificaciones requeridas en la mayor parte de casos. Y si a ello se

une la facilidad de sintonización de sus parámetros, se justifica que se empleen PID's en más del 90% de las aplicaciones industriales.

Sin entrar en mayor detalle sobre esta conocida estrategia, el alumno podrá diseñar el control [6] actuando sobre los tres parámetros;  $k_p$ ,  $k_i$ , y  $k_d$ , comprobando los efectos de la acción proporcional, integral y derivativa respectivamente.

La ecuación de la función de transferencia del PID en tiempo continuo es la siguiente:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (3)$$

Que se debe discretizar al estar implementada de forma digital por la herramienta. Este proceso se realiza haciendo uso de la transformación bilineal ("Tustin") mediante:

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z - 1}{z + 1} \quad (4)$$

Llegando al fin a la expresión discreta del PID:

$$\frac{U(Z)}{E(Z)} = \frac{(K_p + \frac{K_I T_s}{2} + \frac{2K_D}{T_s})z^2 + (K_I T_s - \frac{4K_D}{T_s})z + (-K_p + \frac{K_I T_s}{2} + \frac{2K_D}{T_s})}{z^2 - 1} \quad (5)$$

#### 3.3 UBICACIÓN DE POLOS: CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADOS

Se trata de otra estrategia fundamental que el alumno debe conocer y dominar, ya que es otro de los métodos más importantes de diseño para los ingenieros de control, puesto que permite bajo determinadas circunstancias conseguir las características de respuesta transitoria y estacionaria deseadas.

Sin tratar de ahondar en el estudio necesario llevado a cabo para implementar esta técnica en la herramienta desarrollada, exponer que el alumno simplemente ha de indicar la posición deseada de los polos en lazo cerrado, sabiendo que ello determinará la respuesta del sistema. La aplicación permitirá tanto la simulación como el control real de la planta con esa localización de polos, tal y como se describe más adelante. Esto se consigue gracias a la integración de ambos sistemas de "seguimiento" en el espacio de estados; para el modelo en velocidad y para el modelo en posición, y cada diseño con sus peculiaridades. En ambos la señal de control adecuada en cada muestreo se obtiene mediante la fórmula de "Ackermann". Sin embargo, para el modelo en velocidad, nos encontramos con la

necesidad de utilizar variables “ficticias” para poder calcularlo, tal como se detalla en [5]. Y para el modelo en posición, al tratarse de un sistema de segundo orden y sólo tener accesible físicamente una variable (posición del encoder) se ha realizado también el diseño del observador de estados para poder aplicar “Ackermann”. Además, en este último caso al no incluir integrador puro a la entrada, es necesaria la inclusión de una ganancia para conseguir que el sistema sea no sólo de regulación, sino también de seguimiento.

### 3.4 CONTROL PREDICTIVO

Esta será otra técnica interesante para el alumno, puesto que representa una clase de algoritmos que hacen uso de ciertas variables para **optimizar** el comportamiento futuro del proceso. Aunque fue desarrollado originalmente para solucionar las necesidades especiales de control en las plantas generadoras de energía y refinerías de petróleo, dicha tecnología puede encontrarse en la actualidad en una gran variedad de áreas de aplicación, como son la ingeniería química, automoción, metalurgia, ingeniería aeroespacial, robótica, etc.

Este sistema de control traslada el proceso desde un estado a otro diferente con unas restricciones dadas, mientras trata de **minimizar** el sobrepaso de las mismas durante el transcurso de dicha tarea [2].

A pesar de existir distintos tipos de estrategias predictivas basadas en modelos [3], todos ellos comparten una serie de características comunes, representadas por las variables sobre las que precisamente el alumno podrá actuar:

- Horizonte de predicción: Ventana temporal (número de muestras) en la que se trata de predecir las salidas futuras haciendo uso del modelo matemático de la planta y la información disponible hasta ese instante, esto es, entradas y salidas pasadas del sistema más las señales de control futuras que se prevén.
- Coefficiente penalización errores futuros: Cuanto mayor sea este valor, mayor importancia se le dará a los errores futuros en la función de coste.
- Coefficiente de penalización de los esfuerzos de control: Penaliza los incrementos en la señal de control. Valores pequeños proporcionan señales de control más agresivas, mientras que valores mayores generan controladores más suaves (se puede utilizar este parámetro para no saturar al actuador).

- Establecimiento de trayectoria: Mediante este parámetro se establecerá la agresividad de la trayectoria a partir de la consigna introducida por el alumno. Su valor oscilará entre 0 y 1, y cuanto mayor sea más suave será la trayectoria de referencia generada.

### 3.5 CONTROL ADAPTATIVO

La última estrategia implementada por la herramienta será también de interés para el alumno, puesto que aborda la problemática de la modificación en tiempo real de los parámetros de control de un sistema cuando se alteran las condiciones de trabajo o se producen modificaciones en el modelo de la planta a controlar. Se podría decir entonces que el control adaptativo abarca dos áreas fundamentales:

- Identificación, que trata de estimar “off-line” u “on-line” los parámetros del modelo del proceso a controlar, dependiendo del tipo de control adaptativo que se desee implementar.
- Algoritmo de establecimiento de los parámetros de control, proceso en el que se asignan al controlador los nuevos parámetros para que se cumplan las especificaciones deseadas en lazo cerrado.

La aplicación de mecanismos de adaptación para el establecimiento de nuevos parámetros de control cuando varíen las condiciones de trabajo es aplicable a cualquier estrategia. Es decir, se pueden emplear algoritmos adaptativos con casi cualquier clase de controlador. En este trabajo, y dada la gran difusión que tienen en la industria, así como su gran flexibilidad y sencillez de implementación, se aplica un control PID a la planta que, acompañado de su correspondiente algoritmo adaptativo, se transforma en un PID autoajutable [1].

El alumno podrá comprender que el autoajuste de los parámetros del PID puede resultar muy útil en algunas aplicaciones si se vuelve muy complicado sintonizarlos adecuadamente. Será también tarea costosa si dicha sintonización debe repetirse periódicamente debido a cambios en las condiciones del proceso que conllevan un empeoramiento del comportamiento del sistema. Por tanto, bajo estas circunstancias resultará muy conveniente disponer de algoritmos de autoajuste de parámetros que actúen en el momento preciso, cuando las condiciones de trabajo varíen o se produzca un deterioro en la respuesta del sistema en lazo cerrado.

La alternativa de autoajuste utilizada es la basada en la técnica de asignación de polos para la función de transferencia en lazo cerrado [4]. El regulador PID

que se implementa se ajusta a la forma de la Ecuación 6:

$$G_r(z^{-1}) = \frac{p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (6)$$

Y calculando el lazo cerrado del conjunto controlador-planta se obtiene la siguiente ecuación característica:

$$z^{-3} + \frac{a_1 - a_2 + b_1 p_1}{b_1 p_2 + a_2} z^{-2} + \frac{-a_1 - 1 + b_1 p_1}{b_1 p_2 + a_2} z^{-1} + \frac{1}{b_1 p_2 + a_2} = 0 \quad (7)$$

Para que el problema planteado de determinación de los parámetros de control tenga solución es necesario que se imponga la condición de la ubicación de los tres polos del sistema en la misma localización real, es decir, que contenga un polo triple real en lazo cerrado, el cual evidentemente ha de estar en la región de estabilidad de  $z^{-1}$  o, lo que es lo mismo, su módulo ha de ser *mayor* que la unidad. Esto es equivalente a afirmar que el polinomio característico tenga la forma:

$$(z^{-1} - a)^3 = z^{-3} - 3az^{-2} + 3a^2 z^{-1} - a^3 \quad (8)$$

Siendo  $a$  el polo triple deseado. Igualando los coeficientes de las dos ecuaciones características anteriores se obtiene:

$$\begin{aligned} p_0 &= \frac{1}{b_1} \left( 1 + a_1 - \frac{3}{a} \right) \\ p_1 &= \frac{1}{b_1} \left( a_2 - a_1 + \frac{3}{a^2} \right) \\ p_2 &= -\frac{1}{b_1} \left( a_2 + \frac{1}{a^3} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Que serán los parámetros buscados para el controlador a raíz del modelo matemático de la planta. Y para ese proceso de identificación del modelo se usa el método de los mínimos cuadrados, integrado en la herramienta mediante sus algoritmos correspondientes.

El alumno, por tanto, sólo ha de especificar un sólo parámetro de diseño: la ubicación del polo triple en lazo cerrado (aunque se incluye también otro parámetro que será una ganancia para suavizar posibles oscilaciones presentadas durante el proceso de auto-identificación del modelo).

## 4 DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

Como ya ha sido comentado, la aplicación desarrollada permitirá al alumno comunicarse con la planta, simular los algoritmos de control diseñados y, lo más importante, experimentar en tiempo real la eficacia de los mismos. Ésta ha sido programada mediante *Visual Basic 6.0*, y para la integración de las estrategias de control y su simulación se ha creado una DLL mediante *MATLAB COM Builder 6.5*. Sin embargo, aclarar que la aplicación es totalmente autónoma, sin necesidad de tener instalado *MATLAB* en el equipo, tan sólo algunas librerías específicas. Por otro lado, reseñar que está diseñada para funcionar bajo Windows'98, puesto que la tarjeta de adquisición suministrada sólo incluye *drivers* optimizados para este sistema operativo.

Se realiza ahora un recorrido por las diferentes ventanas de la herramienta exponiendo sus características principales.

### 4.1 VENTANA PRINCIPAL

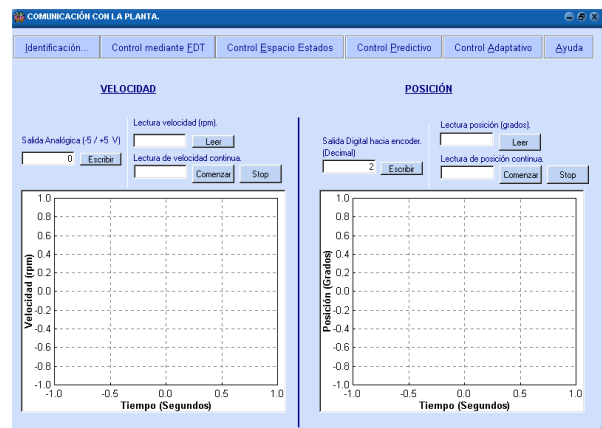


Figura 2: Ventana principal

Desde esta ventana se podrá realizar la comunicación en lazo abierto con la planta y será útil, por ejemplo, para realizar la calibración de la misma. Así mismo, a través de la barra de menú se accederá al resto de ventanas del programa.

Introduciendo el valor deseado de tensión a enviar hacia el motor se podrá observar en **tiempo real** la evolución de la velocidad angular correspondiente, tanto en las casillas numéricas como en la gráfica. En el caso de la posición se podrán enviar instrucciones digitales hacia el encoder, por ejemplo para reiniciarlo, y observar como evolucionan los grados al girar el motor, numéricamente o mediante la gráfica.

## 4.2 VENTANA PARA EL CONTROL MEDIANTE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA (PID,ZPK O FDT)

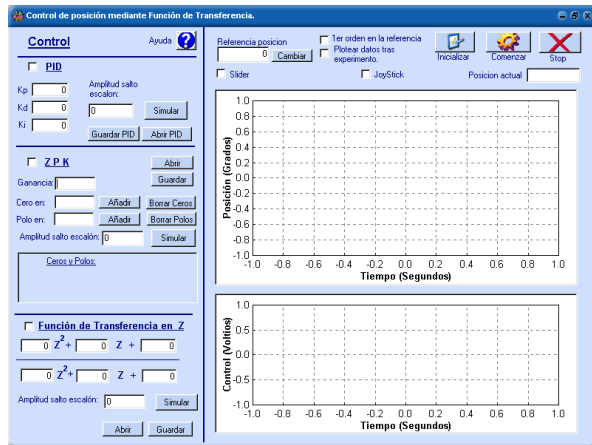


Figura 3: Control mediante función de transferencia

Se muestra en la Figura 3 la ventana para el control de la posición, pero dejando constancia de la existencia de otra ventana con las mismas funcionalidades implementadas para el control de la velocidad.

En la zona de la izquierda se encuentra el espacio reservado para la introducción del control diseñado, bien mediante los parámetros del PID, los cero, polos y ganancia del ZPK o directamente mediante la función de transferencia discreta correspondiente al controlador. Todos estos diseños podrá ser almacenados en disco en archivos de formato propio, para su posterior utilización o recuperación de alguno guardado previamente con características que interesen. Y una vez establecido el controlador mediante sus parámetros se podrá realizar la simulación del mismo ante la entrada especificada, siendo presentada mediante ventana emergente con el mismo formato y características que ofrece la *Toolbox* de gráficas de *MATLAB*, bien conocida por los alumnos de control.

Y tras la simulación, se podrá experimentar el comportamiento de la planta bajo el control establecido. En la parte superior se introduce la referencia de posición deseada y tras pulsar sobre inicializar, justo cuando se pulse el botón comenzar, el motor quedará bajo la acción del controlador diseñado. Dicha referencia puede ser modificada en cualquier instante y la evolución de la posición podrá ser observada en tiempo real numéricamente o mediante la gráfica, así como el control que se está enviando continuamente (cada 10 milisegundos) al motor. Se incorporan también algunas opciones adicionales que son:

- 1<sup>er</sup> orden en la referencia: Utilidad que permitirá generar una referencia más suave en lugar de un salto escalón.
- Slider y JoyStick: Permitirá que el alumno en lugar de introducir la posición deseada numéricamente pueda hacerlo a través de una barra de desplazamiento emergente o de un joystick comercial común.
- Plotear datos tras experimento: Si se tiene seleccionada esta casilla, al pulsar sobre el botón *Stop* se nos mostrarán los datos del experimento graficados en una ventana igual que la empleada en la simulación, con lo que podremos comparar los datos reales con los obtenidos en dicha simulación.

## 4.3 VENTANA PARA CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADOS

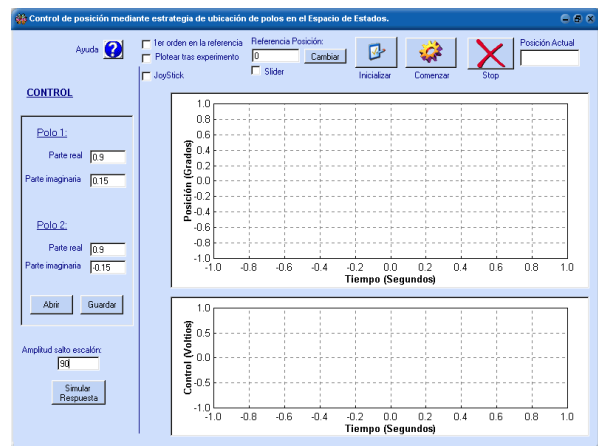


Figura 4: Control mediante técnica de ubicación de polos

Mediante esta técnica el alumno sólo necesita indicar dónde desea ubicar los polos del sistema en lazo cerrado. Los algoritmos integrados en la DLL desarrollada se encargarán, partiendo del modelo matemático de la planta, de realizar el diseño del sistema de seguimiento correspondiente. Y aunque dicho proceso sea diferente para el caso del control de la posición o de la velocidad, la interfaz de ambas pantallas es la misma de cara al usuario que la mostrada en la Figura 4.

El funcionamiento de esta ventana y opciones disponibles son iguales que los descritos para el controlador PID en el punto anterior, tan sólo con la diferencia de parámetros que definen esta estrategia.

#### 4.4 VENTANA PARA EL CONTROL MEDIANTE ESTRATEGIA PREDICTIVA

La interfaz tanto para el control de la velocidad como de la posición será equivalente, mostrándose en la Figura 7 este último caso.

La característica principal de esta técnica, y que el alumno rápidamente entenderá, es la necesidad de conocer previamente la referencia que se desea que siga la salida a lo largo del tiempo. De este modo los algoritmos correspondientes podrán ir estableciendo la señal de control adecuada para conseguir dicho propósito de forma **óptima** conforme a los parámetros definidos. Éstos serán introducidos en las casillas reservadas en la zona izquierda de la ventana, quedando por ejemplo como muestra la Figura 5:

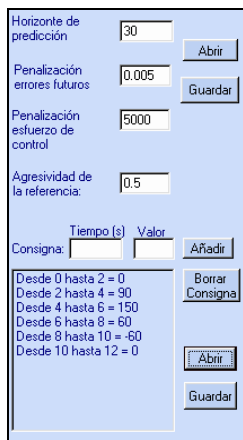


Figura 5: Detalle de ventana para control predictivo; introducción de parámetros

Se observa como ha sido introducida también la consigna necesaria. Igualmente se puede guardar o recuperar de disco tanto los parámetros como dicha consigna, ahorrando tiempo en futuros experimentos.

Y una vez establecidos estos elementos se puede realizar la simulación del comportamiento del sistema, obteniendo en este ejemplo lo mostrado en la Figura 6:

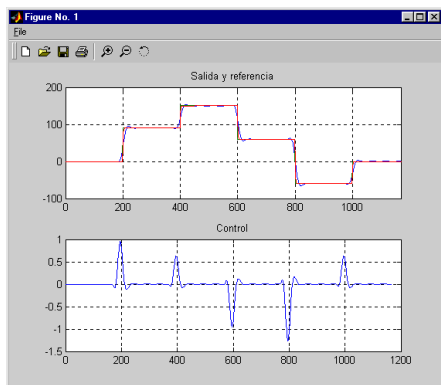


Figura 6: Simulación de estrategia predictiva Y una vez comprobado el comportamiento del algoritmo conforme al diseño establecido, se puede realizar el control experimental de la planta, logrando el resultado mostrado en la Figura 7:

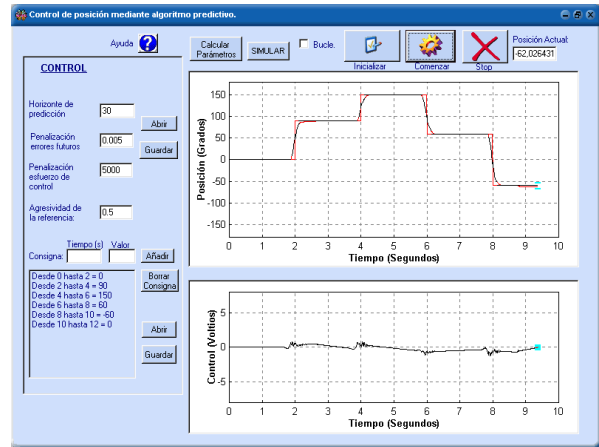


Figura 7: Ventana para estrategia predictiva; control real

En la grafica de la posición lo que se visualiza ahora es, sobre el mismo espacio, por un lado la consigna establecida y, por otro, la posición real obtenida. Se observa como el algoritmo incluso adelanta el valor de salida al de consigna buscando precisamente dicha optimización conforme a los parámetros definidos.

La opción que incluye esta ventana, casilla de "Bucle", es para mantener el control indefinidamente, repitiendo la misma consigna una y otra vez. Sería el ejemplo más claro de aplicación robótica y el alumno podrá observar la bondad real de los diseños realizados.

#### 4.5 VENTANA PARA EL CONTROL MEDIANTE ESTRATEGIA ADAPTATIVA

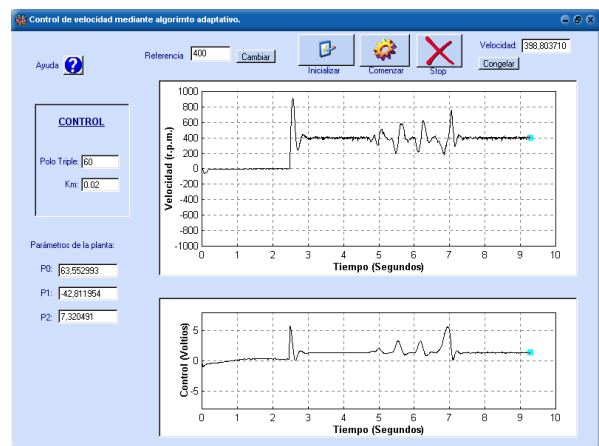


Figura 8: Ventana para estrategia adaptativa

La Figura 8 muestra la ventana que implementa la estrategia adaptativa integrada en la herramienta. En ella el alumno tan sólo ha de especificar la ubicación deseada del polo triple en lazo cerrado y el factor apropiado para suavizar posibles oscilaciones, pudiendo comprobar como el sistema procede a la identificación automática del modelo matemático de la planta y al autoajuste necesario del PID para conseguir el control. Podrá observar en tiempo real los parámetros identificados del sistema, así como el control aplicado al motor y la velocidad resultante mediante la gráficas.

#### 4.6 GESTIÓN DEL TIEMPO REAL EN EL SISTEMA

Debido a la velocidad que presenta la dinámica del sistema se ha de establecer un mecanismo para conseguir la repetición del ciclo de muestreo exactamente cada 0.01 segundo. Esto no puede ser logrado mediante los temporizadores proporcionados por el entorno de desarrollo, ya que están basados en el reloj del sistema operativo y, por un lado su precisión no es muy elevada (en torno a los 50 ms) y por otro, su exactitud tampoco puesto que no se garantiza que no interfiera algún otro proceso gestionado por *Windows*.

Para solventar este problema, se ha realizado la gestión del periodo de muestreo mediante un “*Objeto de tiempo de alta resolución*”. Dicho objeto proporcionará un tiempo de disparo exactamente igual al deseado sin utilizar el reloj de *Windows*, sino directamente el reloj del sistema, lo que garantiza el tiempo real aunque se trabaje con valores del orden de milisegundos.

#### 4.7 GESTIÓN DE GRÁFICAS

En todas las ventanas de la herramienta las representaciones realizadas en las gráficas se hacen en tiempo real. Esto es reseñable puesto que para implementar las mismas mediante *Visual Basic* es cierto que existen multitud de herramientas, incluido el propio control (*mschart*) proporcionado por el lenguaje. Sin embargo, lo que no permiten comúnmente es que las gráficas representen la cantidad de puntos que la herramienta utiliza y, sobre todo, que sea posible su refresco a una velocidad tan elevada como impone el periodo de muestreo utilizado.

Para solucionar esta cuestión, se ha empleado una librería gráfica basada en objetos. Aunque la creación e integración de gráficas mediante dicha librería resulta mucho más tediosa (al ser diseñada completamente mediante código y técnica de *doble buffer*) que utilizando algún control gráfico, ésta opción permite en cambio la posibilidad de

representar valores en tiempo real conforme se van adquiriendo (salida de la planta mediante tarjeta adquisición) o calculando (señal de control). Y todo ello con un periodo de tan sólo 10 ms.

También se ha tenido en cuenta al diseñar las gráficas que los ejes presenten una escala adecuada y, más allá aún, que se “auto-escales” instantáneamente si la señal representada sobrepasa el eje horizontal o vertical.

## 5 CONCLUSIONES

El uso de herramientas como la desarrollada en este trabajo permiten al alumno una mejor comprensión durante el estudio de las distintas técnicas de control por las que podrá optar, ya que no sólo observará las consecuencias al aplicar una determinada estrategia mediante simulación, sino que podrá percibir los efectos reales del control sobre la planta. Además, mediante elementos innovadores como la utilización del *joystick*, el resultado será mucho más satisfactorio, despertando sin duda su interés al permitirle interactuar con los diseños y observar sus consecuencias.

### Referencias

- [1] Aguado, A., (2002) Identificación y Control Adaptativo. Prentice Hall.
- [2] Camacho, E.F., (1995) Model Predictive Control in the Process Industry. Springer-Verlag.
- [3] De Keyser, R.M.C., (1992): The MBPC Methodology. Intensive Training Course on Model Based Predictive Control. UNED.
- [4] Landau, I.D., (1974) A Survey of Model-Reference Adaptive Techniques-Theory and Applications. Automática: vol. 10, nº 4.
- [5] Ogata, K., (1996) Sistemas de Control en Tiempo Discreto. Prentice Hall. México.
- [6] Vázquez, F.; Morilla, F.; Dormido, S., (1998) Entorno para simulación, análisis y sintonía de sistemas con control descentralizado 2x2. XIX Jornadas de Automática. Madrid.