

# DESARROLLO DE MAQUETAS EXPERIMENTALES EN ESTUDIOS DE INGENIERÍA APLICADO A LA MEJORA DE LA DOCENCIA.

R. PUERTO, D. BLANCO, L.M. JIMÉNEZ, R. ÑECO, A. GIL  
*Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales  
Área de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Universidad Miguel Hernández  
Spain*

*En el presente documento se expone la realización de maquetas experimentales para su utilización en prácticas de Ingeniería, en concreto, en áreas afines a la Ingeniería de Sistemas y Automática. Se presenta en este trabajo una experiencia docente para realizar prácticas y/o trabajos de investigación, que por una parte, sean de interés para los alumnos que los realizan, y por otra, que dichos trabajos ayuden a mejorar la docencia que se imparte en dichas titulaciones.*

## 1. Introducción

Los principales objetivos que se plantean en este trabajo son, por una parte, la realización por parte del alumno de una maqueta experimental (en este caso un cilindro deslizante), donde se ponga de manifiesto los conocimientos adquiridos a lo largo de sus estudios, y por otra, que dicha maqueta (una vez validada su utilidad) sea replicada para la creación de nuevos puestos de trabajo y por tanto suponga una mejora en la docencia que se imparte. El aprovechamiento para mejorar la docencia, reside en que los proyectos realizados son, normalmente, maquetas experimentales que en su versión comercial tienen un coste elevado, y además, que se plantean como trabajos y/o prácticas docentes la replicación del primer prototipo realizado. Esto permite, a un bajo coste, que los alumnos realicen trabajos “reales” (trabajos que posiblemente tengan que desarrollar en su vida profesional), a la par que mejora la infraestructura de los laboratorios docentes, permitiendo así mejorar la calidad de la docencia.

## 2. Descripción de la maqueta

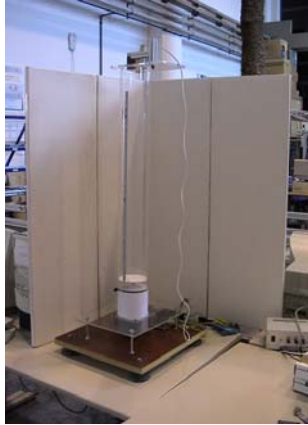
### 2.1. Descripción

El sistema a controlar se compone de un tubo de metacrilato por el cual se desliza una pieza impulsada por el flujo de aire producido por un ventilador de corriente continua, el ventilador de corriente continua (12V DC brushless) (Fig. 1). En la pared exterior del tubo se ha ubicado una cinta métrica adhesiva, que sirve para conocer la altura de la pieza en todo momento.

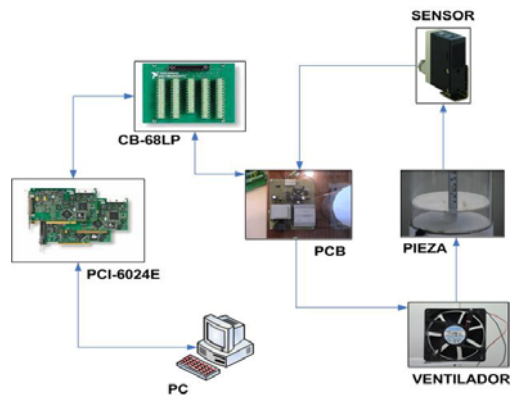
El cilindro hueco se asienta sobre una base de metacrilato rectangular que sirve para dar estabilidad y verticalidad al conjunto. Esta misma base se apoya sobre una superficie de madera de mayor tamaño que da robustez al conjunto y que sirve de soporte para la placa de circuito impreso (PCB), en la cual se encuentran los circuitos de alimentación, amplificación, acondicionamiento de la señal y accionamiento del sistema.

En la parte superior del conjunto, se encuentra situado el sensor fotoeléctrico de posición, que está fijado a otra pieza rectangular de metacrilato unida al tubo.

Mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAQ), instalada en el computador, se captan los valores de tensión que proporciona el sensor y se envían al ordenador, que mediante una serie de algoritmos de control diseñados debe ser capaz de calcular y generar las acciones de control adecuadas para mantener la posición de la pieza en una altura determinada (Fig 2).



**Figura 1.** Maqueta del cilindro deslizable



**Figura 2.** Esquema general del sistema

La conexión entre la tarjeta de adquisición de datos y la placa de circuito impreso se lleva a cabo por medio de una tarjeta bornero de conexión ubicada fuera del ordenador. La electrónica se encargará de interpretar las señales que recibe por parte del ordenador y del sensor y modificarlas según los circuitos diseñados. El software que se ha utilizado para implementar las diferentes técnicas de control es Matlab<sup>®</sup>. Concretamente se emplean modelos en Simulink<sup>®</sup> y se utiliza la toolbox Real-Time Windows Target para llevar a cabo el control por computador del cilindro deslizable en tiempo real.

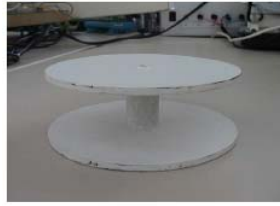
La tarjeta de adquisición de datos (DAQ) es el dispositivo encargado de efectuar la comunicación entre el computador y el sistema a controlar. En este caso, se trata de una tarjeta National Instruments PCI-6024E, que consta de 16 canales de entrada analógicas, dos canales de salida analógicas, una resolución de 12 bits, una frecuencia de muestreo máxima de 200kS/s, un conector de 68 pines y ocho líneas de E/S digitales. Asimismo, se dispone de una tarjeta bornero de conexión National Instruments CB-68LP en la cual se efectúan las conexiones oportunas entre la placa de circuito impreso y la tarjeta de adquisición de datos. La conexión entre la tarjeta DAQ instalada en el interior del ordenador y la tarjeta bornero ubicada fuera del mismo se realiza mediante un cable apantallado de 1m de longitud con conectores de 68 pines, cuyo modelo es National Instruments SH-68-68-EP.

Para medir la posición de la pieza deslizable en el interior del cilindro hueco de metacrilato se dispone de un sensor fotoeléctrico de infrarrojos. Se trata de un sensor Telemecanique XUJ-K803538, que efectúa una medida de distancia por triangulación, lo que le vuelve prácticamente insensible al color del objeto. A pesar de los problemas surgidos con este sensor fotoeléctrico, para la elección del mismo principalmente se ha tenido en cuenta su bajo coste, el rango de actuación muy adecuado a las necesidades del prototipo, la independencia ante el color de la pieza a medir,...

La pieza que se desliza a lo largo del tubo de metacrilato es otro de los puntos clave en la definición del sistema. A la hora del diseño de la pieza se han tenido muchos factores en cuenta: forma, peso, material, etc. Cabe destacar antes de nada el hecho que la parte superior de la pieza tiene que ser plana y aproximadamente cubrir todo el diámetro interior del tubo, puesto que si no las medidas del sensor suelen ser erróneas, debido a la técnica de medición (principio de triangulación) que emplea este sensor fotoeléctrico para detectar la posición de la pieza. En cuanto a materiales se refiere, se han testado diferentes tipos de materiales ligeros, tales como madera, corcho, espuma de poliuretano, poliestireno expandido, plástico,...

Finalmente, se ha comprobado en los experimentos prácticos que los mejores resultados, en cuanto a estabilidad en el interior del tubo de metacrilato, rozamiento mínimo con las paredes del cilindro, medidas fiables por parte del sensor,... se han obtenido con una pieza formada por dos discos

de madera (de marquetería) unidos mediante tornillos por una pieza cilíndrica, también de madera, tal y como se muestra en la figura 3.



**Figura 3:** Pieza definitiva

El éxito de esta pieza se basa en que apenas tiene superficie de contacto con las paredes del tubo, por tanto existe poco rozamiento, y que tiene la altura suficiente como para no inclinarse de manera que se quede encajada dentro del cilindro. A pesar que el color no afecta a la medida del sensor, se ha pintado de blanco simplemente porque refleja mejor la luz y por motivos estéticos.

### **3. Realización de experimentos**

Los experimentos que se pueden realizar con este prototipo abarcan un amplio abanico: desde la identificación y obtención de la función de transferencia del mismo hasta la realización de diversos esquemas de control digital, tal y como se verá más adelante.

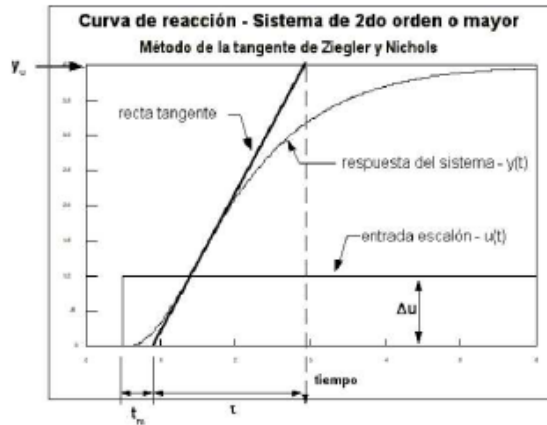
Antes de proceder a la identificación del sistema, hay que tener en cuenta dos pasos previos muy importantes y claves para el éxito de dicha identificación, como son la calibración del sensor y el filtrado de la señal de posición. Puesto que normalmente se trabaja con luz artificial y la frecuencia de la red es de 50Hz se diseñará un filtro apropiado para eliminar este ruido no deseado.

#### **3.1. Identificación del Sistema**

Los dos métodos de identificación utilizados en este proyecto para obtener el modelo de la maqueta son los siguientes: método de Ziegler-Nichols y algoritmo de identificación por mínimos cuadrados (LS). Hay que comentar que también se intentó identificar el proceso con la toolbox de identificación de Matlab<sup>®</sup> (System Identification Toolbox 5.0.2), sin embargo, la función de transferencia que mejor se ajustaba al comportamiento real del sistema, calculada mediante esta toolbox, era de orden cuatro, con lo cual se desestimó este método de obtención del modelo del proceso, ya que trabajar con una función de transferencia de cuarto orden hubiese complicado los cálculos innecesariamente.

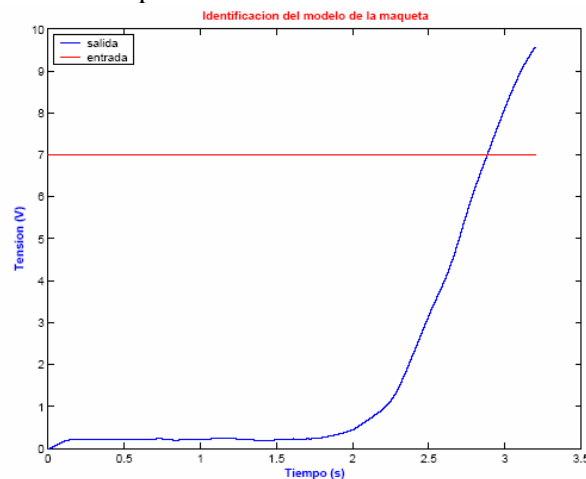
En los experimentos preliminares, se puede intuir que el comportamiento del proceso es muy similar al de una función de transferencia de primer orden ante entrada rampa, sin considerar la zona muerta inicial, que depende de la amplitud del escalón utilizado para la identificación y de las no-linealidades en el arranque de la pieza. Si se hubiera introducido un escalón de mayor amplitud, esta zona muerta habría sido más pequeña. Por tanto, no se ha tomado en cuenta retardo alguno en el sistema, salvo el estructural, a la hora de calcular los distintos reguladores.

El método de la tangente de Ziegler-Nichols es una técnica de identificación experimental basada en la respuesta del sistema a una entrada escalón (*curva de reacción del proceso*). Se trata de un método de lazo abierto, cuyo procedimiento es básicamente gráfico (Fig. 4). Este método se utiliza para identificar modelos simples, normalmente modelos de primer o segundo orden más retardo en caso que exista.



**Figura 4:** Curva de reacción del proceso

Para el método de la tangente de Ziegler-Nichols, se ha escogido un escalón de tensión como entrada al sistema (Fig. 5), cuyo valor depende de la rapidez con la que se pretenda excitar al sistema. Se probó a introducir un ruido blanco al sistema, sin embargo el ventilador no respondía adecuadamente ante esta entrada, por muchos parámetros que se variasen de la misma, y la señal de salida que se podía leer del sensor no permitía hacer una buena identificación del modelo.



**Figura 5:** Respuesta del sistema ante entrada escalón

El principio de los mínimos cuadrados indica que los parámetros de un modelo se deben elegir de tal forma que: “La suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de la salida observados (reales) y los estimados, multiplicada por factores que midan el grado de precisión, sea mínimo”. Por otra parte, para el algoritmo LS la entrada considerada ha sido una rampa, ya que este método no admite entradas constantes, sino únicamente aquéllas que mantengan al sistema en excitación permanente.

Por tanto, se ha modelado el sistema como una función de transferencia de primer orden con un integrador en serie ante entrada escalón. Así, finalmente se asume que la maqueta se comporta como un modelo de segundo orden. Tras numerosas pruebas experimentales, la función de transferencia que se empleará para el cálculo se muestra en la Ec.1.

$$G_p(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0,3163 \cdot 10^{-3} z^{-1} + 0,3124 \cdot 10^{-3} z^{-2}}{1 - 1,9637 z^{-1} + 0,9637 z^{-2}} \quad (1)$$

### 3.2. Algoritmos de control

Se han calculado los siguientes algoritmos de control digital: reguladores tipo PID [1], Reguladores Algebraicos (tiempo mínimo, tiempo finito y asignación de polos) [3], Control por Realimentación del Estado [1], Control Óptimo [2], Reguladores de Mínima Varianza [2] y Control Predictivo.

Con el objetivo de facilitar la actividad docente, se ha programado una interfaz gráfica en Matlab<sup>®</sup> para aplicar los diferentes algoritmos de control sobre la maqueta, de forma que variando una serie de parámetros, que dependen del tipo de controlador digital que se pretenda probar en cada instante, no sea necesario crear un esquema Simulink<sup>®</sup> nuevo para cada tipo de regulador y todos los esquemas de control puedan ser estudiados con mayor comodidad.

#### 3.2.1. Consideraciones prácticas

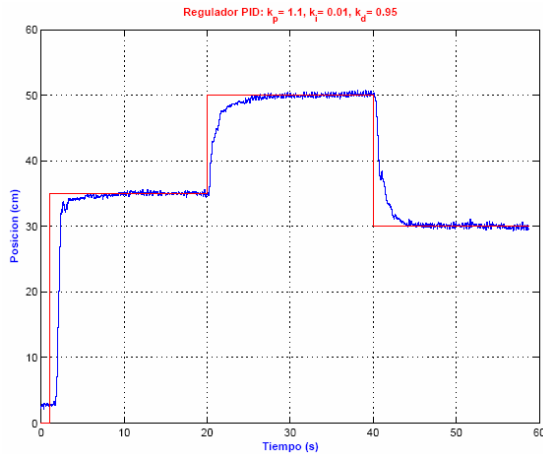
El período de muestreo  $T$  es un parámetro de diseño importante que suele seleccionarse en función de un compromiso entre el deterioro de la calidad del control que puede producir un valor alto de  $T$  y la potencia de cálculo necesaria para ejecutar el algoritmo de control con valores pequeños. La elección del período de muestreo en este caso viene condicionada por las limitaciones físicas del hardware de la tarjeta de adquisición de datos, cuyo mínimo período de muestreo es de  $T = 5\mu\text{s}$ , y las restricciones del Kernel de tiempo real de Matlab<sup>®</sup>, cuyo mínimo período de muestreo es de  $T = 1\text{ms}$ . Con todo esto, y dado que la dinámica del proceso no es excesivamente rápida, no es necesario un período de muestreo muy exigente. A la vista de los resultados prácticos y con los experimentos realizados, se observa que un período de muestreo  $T = 10\text{ms}$  es más que suficiente para implementar todas las ejecuciones en tiempo real de la maqueta.

En cuanto al retardo del sistema, en este proceso es difícil de determinar debido a las no-linealidades del sistema real, con lo cual se ha considerado únicamente un retardo estructural en el modelo del proceso a la hora de calcular los reguladores. No se consideran retardos adicionales, puesto que se ha despreciado el tiempo que tarda el flujo de aire en alcanzar la pieza desde que es impulsado por el ventilador (la distancia a recorrer es sumamente pequeña) y el tiempo que tarda en arrancar el ventilador cuando se le aplica una determinada tensión de entrada. Sin embargo, sí que hay que destacar la presencia de una zona muerta, una no-linealidad, inevitable en el inicio de cada control, debida a las acciones de control que implementa cada regulador, que, por un lado, hasta que no alcanzan un valor mínimo de tensión no mueven la pieza deslizante o, por otro lado, que continuamente oscilan negativa y positivamente de manera que el ventilador no tiene tiempo para reaccionar y es como si estuviese inmóvil. Esto se debe a rozamientos indeseables de la pieza con el tubo de metacrilato, a la posibilidad que la pieza se haya quedado ligeramente encajada en el lugar donde reposa,... Para acelerar esta lentitud inicial del control se ha estimado oportuno añadir una acción de control fija de referencia.

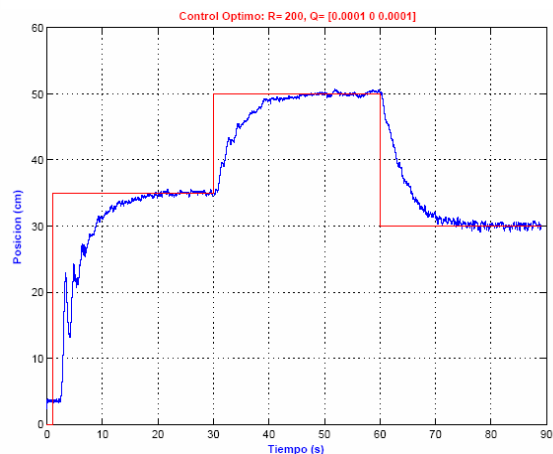
#### 3.2.2. Resultados obtenidos

Experimentalmente, se demuestra que según el tipo de respuesta del sistema que se pretenda obtener y las especificaciones de diseño, el funcionamiento de los distintos reguladores es muy variado, con lo cual un tipo de controladores funcionará mejor en régimen permanente y otros se adaptarán mejor a las restricciones en régimen transitorio.

A continuación, en las figuras 6 y 7, se muestran dos ejemplos de gráficas resultantes de aplicar el control de posición de la maqueta con un regulador PID ( $k_p = 1.1$ ,  $k_i = 0.01$ ,  $k_d = 0.95$ ) y con un controlador óptimo ( $R = 200$ ,  $Q = [0.0001 \ 0 \ 0.0001]$ ).



**Figura 6:** Regulador PID



**Figura 7:** Control Óptimo

Esta maqueta, además, está conectada a un laboratorio remoto de control en tiempo real [6], denominado RECOLAB (<http://recolab.umh.es>) [4], desarrollado en el seno de este departamento, el cual permite la realización de experimentos de forma remota, aumentando así la utilización y aprovechamiento de la misma.

#### 4. Conclusiones

Como conclusiones más importantes cabe citar las siguientes:

- El alumno desarrolla un trabajo experimental en el que emplea prácticamente todos sus conocimientos sobre el control digital de sistemas.
- El alumno aprecia la problemática inherente a este tipo de control: presencia de ruidos, no linealidades, problemas en la identificación, bondad de los reguladores realizados, etc.
- La replicación de esta maqueta, una vez comprobado su correcto funcionamiento y su validez para el objetivo propuesto, mejora la infraestructura del laboratorio docente permitiendo así aumentar la calidad de la docencia impartida.
- La conexión de la maqueta al sistema RECOLAB reduce la saturación de los laboratorios y permite realizar al alumno multitud de ensayos de la más variada naturaleza.

#### Referencias

- [1] K. Ogata. "Sistemas de Control en Tiempo Discreto". Prentice Hall (1996).
- [2] A. Ollero Baturone. "Control por Computador. Descripción interna y diseño óptimo". Marcombo Boixareu Editores (1991)
- [3] E.J. Bernabeu Soler y M.A. Martínez Iranzo. "Diseño algebraico de controladores discretos. Problemas resueltos". SPUPV ETSII (1997).
- [4] R. Puerto, L. Jiménez, O. Reinoso, C. Fernández y R. Ñeco. Remote control laboratory using matlab and simulink: Application to a dc control model. IFAC IBCE (2004).
- [5] A. Aguado, M. Martínez. "Identificación y Control Adaptativo". Pearson Educación (2003)
- [6] The MathWorks, Inc. "Real-Time Windows Target User's Guide v2.1". Matlab 6.5. (2001)
- [7] National Instruments. "6023E/6024E/6025E User Manual" (2000). Tarjeta DAQ PCI-6024E.