

# IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE UN CILINDRO NEUMÁTICO

Angel E. Rubio\*, Oscar Reinoso\*\*, Roque Saltarén\*\*, Carlos Pérez\*\*, Luis M. Jiménez\*\*  
[aerubio@fie.uclv.etecsa.cu](mailto:aerubio@fie.uclv.etecsa.cu)

*\*Universidad Central de Las Villas,  
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales,  
50100, Santa Clara (Villa Clara), Cuba.*

*\*\*Universidad Miguel Hernández,  
División de Ingeniería de Sistemas y Automática,  
03202, Elche (Alicante), España.*

## RESUMEN

*Se presenta en este artículo un procedimiento realizado para la identificación de un sistema servoneumático compuesto por un cilindro de doble efecto, una válvula proporcional y un encoder incremental. En lugar de utilizar el modelo matemático no lineal del sistema compuesto por estos tres elementos se presentan los resultados al obtener un modelo lineal e invariante de este sistema. Asimismo se presenta el modelo matemático del conjunto y se realiza un análisis de los resultados obtenidos en la identificación del sistema.*

**Palabras Clave:** control neumático, robótica, identificación de sistemas.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de actuadores neumáticos en aplicaciones robóticas ha estado a menudo limitado debido a la complejidad del sistema de control en comparación con los actuadores eléctricos. Los actuadores neumáticos presentan notables ventajas y algunos inconvenientes frente a los eléctricos. Las ventajas de los actuadores neumáticos residen en su alta relación fuerza/peso y por otro lado en su bajo coste. Sin embargo presentan como principal inconveniente su dificultad de control debido a la presencia de no linealidades en todo su recorrido debido fundamentalmente a las propiedades del aire comprimido en su flujo

dentro de la cámara del cilindro. En la universidad Miguel Hernández de Elche (España), se encuentra en fase de prueba un prototipo de robot móvil, basado en la adaptabilidad de dos plataformas paralelas a entornos 3D. Este robot es capaz de “trepar” por estructuras alargadas como podrían ser tuberías, estructuras metálicas en la construcción o troncos de palmeras. Está formado por dos planos hexagonales articulados por seis cilindros, con lo cual logra seis grados de libertad cuando una de sus plataformas es anclada a la estructura por la que se mueve y puede adquirir la postura necesaria para el avance en cualquier dirección.

Como parte de este proyecto se han desarrollado una serie de herramientas teóricas y computacionales basadas en la dinámica multicuerpo capaces de resolver de manera eficaz el comportamiento cinemático y dinámico de plataformas paralelas [2]. Estas herramientas, unidas a la mayor capacidad de cálculo de los computadores actuales permiten obtener una solución sencilla para abordar el control de estas estructuras.

La determinación experimental del modelo del sistema válvula-cilindro resulta fundamental para el buen diseño de la estrategia de control y el regulador en sí que se implementaría a bajo nivel para el control de cada una de las articulaciones [3]. Este trabajo centra su atención en la obtención de dicho modelo que resultó, como era esperado [4][5], altamente no

lineal y dependiente del punto de operación (posición) del vástago del cilindro.

**Descripción del sistema válvula-cilindro**

Cada cilindro neumático de doble efecto es accionado por una válvula proporcional de tres

Componente	Descripción	Fabricante
Cilindro neumático de doble efecto	32 mm Ø Cámara 12 mm Ø Vástago 800 mm Carrera 10bar Presión Mx.	Bosch 015
Válvula proporcional de tres vías	24v Alimentación 0-10v Comando 10bar Presión Mx.	Festo MPYE-5-1/8-HF
Encoder incremental	5v Alimentación 9.75 pulsos/mm	LX-EP-40

vías alimentada con una presión de 6 bares (ver detalles en Tabla 1), la posición se lee de un encoder incremental a través de una tarjeta controladora de ejes que permite dar acciones de comando cada 10ms. (ver figura 1).

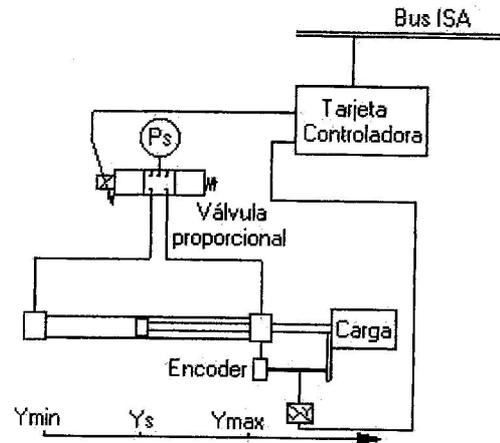


Figura 1. Esquema del sistema Válvula-Cilindro y sus principales componentes.

En la dinámica de un cilindro neumático intervienen una enorme cantidad de factores que alteran sensiblemente su modelo: la temperatura del émbolo, la fricción estática del mismo, la compresibilidad del aire, la respuesta en términos de presión de la válvula, entre otros. No obstante se puede tener una idea del modelo matemático de este sistema descrito en la literatura con mayor o menor detalle, linealizado alrededor de un punto de operación o considerando las funciones no lineales que rigen algunos de sus componentes [4][6][7][8]. En el próximo apartado se presenta el modelo linealizado según Burrows.

**2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA**

Para simplificar la obtención de la función transferencial del sistema, se hacen las siguientes consideraciones:

- El gas es ideal y los cambios de estados adiabáticos.
- Los cambios de temperatura en las cámaras son despreciables.
- No se considera la fricción estática

- El punto de operación es el centro del cilindro por lo que el volumen de ambas cámaras es el mismo.
- El flujo másico a través de la válvula se considera en función de la posición del spool y la presión de la cámara a la que descarga y se linealiza en el punto de operación.

Con todo esto, la función transferencial del sistema válvula cilindro queda:

$$\frac{Y}{X} = \frac{2C_1RTA}{VM} \cdot \frac{1}{s \left( s^2 + \left( \frac{b}{M} + \frac{RTC_2}{A} \right) \cdot s + \frac{(2A^2P_i + RTbC_2)}{VM} \right)}$$

Donde:

- R: Constante de los gases.
- T: Temperatura del gas en las cámaras.
- A: Área del pistón del cilindro.
- V: Volumen de las cámaras.
- M: Masa de la carga y el pistón.
- b: Constante de fricción viscosa.
- Pi: Presión inicial en las cámaras.
- C1 y C2 : Ctes de la función de transferencia de masa en la válvula.

Evidentemente el sistema es de tercer orden con uno de sus polos en el origen lo cual sirve de

base para identificar directamente aproximando a un sistema de este tipo y luego comprobar si tiene esta forma el resultado.

### 3. IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL

El sistema electroneumático descrito anteriormente puede verse como un sistema de control discreto de una entrada y una salida, y describirse matemáticamente como:

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_m u(k-m) \quad (2)$$

La identificación experimental consiste en la obtención de los parámetros  $a_i$  y  $b_i$  a partir de una señal de entrada conocida  $u_i$  y la señal de salida  $y_i$  obtenida con ella. Para la correlación de ambas señales y obtención del modelo matemático que describa el sistema existen diversos métodos, en este caso se usó el N4SID desarrollado por Van Overschee [9] e implementado en el toolbox de identificación de Matlab, que permite la obtención directa del modelo paramétrico en el espacio de estado. Teniendo en cuenta que la respuesta del sistema dependerá de la posición en que se encuentre el vástago, se dividió la carrera del mismo en siete tramos y la identificación experimental se realizó alrededor cada uno de esos puntos. Otras fuentes conocidas de variación en la respuesta del sistema son la temperatura y fricción estática del émbolo por lo cual se identificó el sistema con cinco tipos diferentes de señales de excitación:

- RU: Ruido uniforme limitado, posición aleatoria entre  $\pm 500pe$  (pulsos de encoder) generada en cada período de muestreo (10ms).
- RBS01 Señal del tipo prbs (pseudo random binary sequence) con una amplitud de  $1000pe$  que puede variar en cada período de muestreo.
- RBS05 Señal del tipo prbs con una amplitud de  $500pe$  que puede variar en cada período de muestreo.
- RBS51: Señal del tipo prbs con una amplitud de  $1000pe$  que puede variar

cada cinco períodos de muestreo (50ms).

- RBS55: Señal del tipo prbs con una amplitud de  $500pe$  que puede variar cada cinco períodos de muestreo (50ms).

Estas señales garantizan variaciones rápidas o lentas y que el sistema se estabilice o no con lo cual se pondrán más o menos de manifiesto las perturbaciones producidas por las no linealidades antes señaladas.

#### Resultados experimentales

El sistema se identifica en lazo cerrado ( $G_{lc}$ ) para poder controlar la posición alrededor del punto de operación y posteriormente se obtiene el modelo en lazo abierto ( $G_{la}$ ) sabiendo que se ha usado un regulador proporcional de ganancia conocida ( $kp=0.6$ ):

$$G_{lc} = \frac{kp \cdot G_{la}}{1 + kp \cdot G_{la}} \Rightarrow G_{la} = \frac{G_{lc}}{kp \cdot (1 - G_{lc})} \quad (3)$$

Luego, en cada posición se realiza lo siguiente: Se somete el sistema a cada una de las señales antes descrita durante 10 segundos y para cada vector  $[y \ u]$  así obtenido se determina el modelo matemático que lo representa mediante el toolbox de identificación de Matlab. Cada modelo es sometido a las cinco señales de entrada y se determina, para cada una de ellas, cuanto se aproxima la respuesta del modelo a la respuesta real mediante el valor obtenido por la sumatoria del error absoluto en cada caso. En la tabla 1 se presentan estos valores, en % respecto al mayor. El dato más importante lo brinda el promedio del error ya que indica cual de los modelos se comporta mejor independientemente de la señal de entrada. En la tabla 2 se presenta el promedio de error para cada una de las posiciones.

De la tabla 2 se deduce claramente que el mejor de los modelos obtenidos es el que responde a la señal RBS01. De estos siete modelos se presentan los correspondientes a las posiciones 1, 4 y 7 (el resto son intermedios).

Posición 1	Señal RU	Señal RBS01	Señal RBS05	Señal RBS51	Señal RBS55	Promedio
Modelo RU	22.8926	88.2998	55.3485	100.0000	65.0947	66.3271
Modelo RBS01	29.3160	58.3647	61.8161	26.0606	41.3524	43.3820
Modelo RBS05	28.0701	65.5044	46.6986	46.7487	47.5880	46.9220
Modelo RBS51	31.4092	65.9626	66.7996	25.8452	47.3941	47.4821
Modelo RBS55	39.9014	72.5814	46.8288	55.6831	31.3466	49.2682

Tabla 1. Sumatoria del error absoluto en % para cada modelo ante cada señal.

Err. Promedio	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Posición 6	Posición 7
Modelo RU	66.3271	62.0555	55.0246	53.5188	57.0375	64.8323	65.7056
Modelo RBS01	43.3820	39.4688	40.2821	36.7765	42.1533	45.0021	51.6839
Modelo RBS05	46.9220	61.4860	43.2265	45.4007	48.2241	56.2309	64.0057
Modelo RBS51	47.4821	41.4524	43.3278	42.4500	48.2533	47.8265	63.9088
Modelo RBS55	49.2682	41.5424	49.1881	39.2488	54.5131	50.8486	57.0177

Tabla 2. Promedio de error para cada modelo en cada posición.

Posición 1)  $-0.005862 s^3 + 4.809 s^2 - 1225 s + 9.948e004$

Ceros: 416.7989; 203.5815; 200.0000

$$s^3 + 83.84 s^2 + 3997 s - 1.717e004$$

Polos:  $-43.8940 \pm 49.1670i$ ; 3.9529

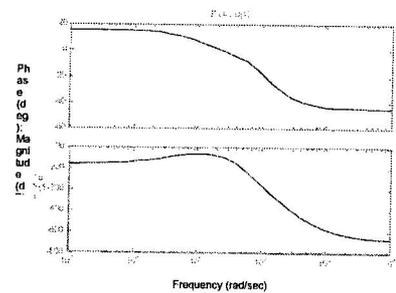
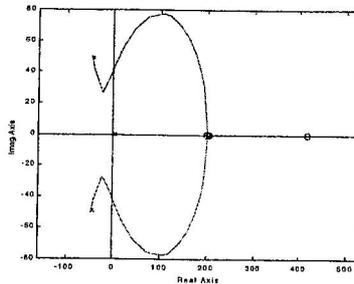
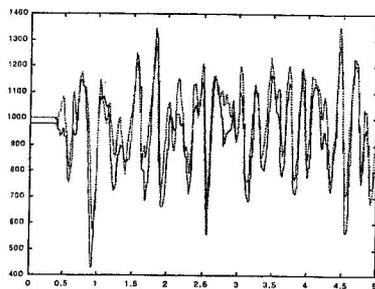


Figura 2. Convergencia, lugar de las raíces y diagrama de bode (posición 1).

Posición 4)  $-0.005991 s^3 + 3.583 s^2 - 730.4 s + 5.071e004$

Ceros:  $198.98 \pm 52.23i$ ; 200.00

$$s^3 + 98.04 s^2 + 1873 s - 1587$$

Polos:  $-71.5469$ ;  $-27.3069$ ;  $.8123$

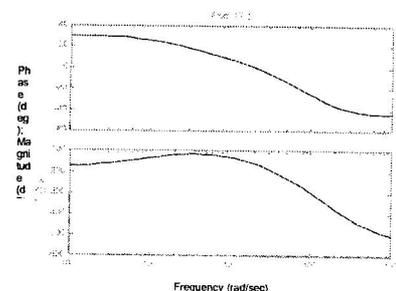
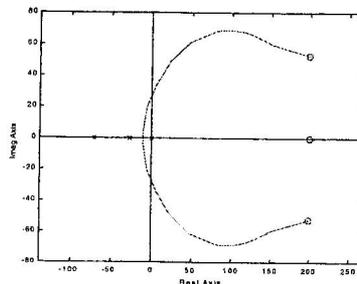
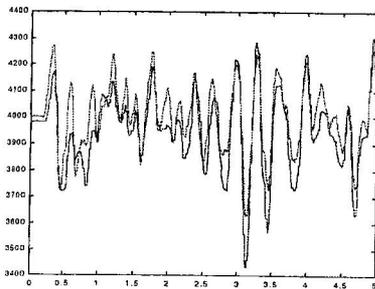


Figura 3. Convergencia, lugar de las raíces y diagrama de bode (posición 4).

Posición 7)  $-0.007921 s^3 + 5.039 s^2 - 1099 s + 8.153e004$

Ceros:  $218.09 \pm 62.42i$ ; 200.00

$$s^3 + 81.18 s^2 + 3453 s - 1.542e004$$

Polos:  $-42.6202 \pm 44.5248i$ ; 4.0601

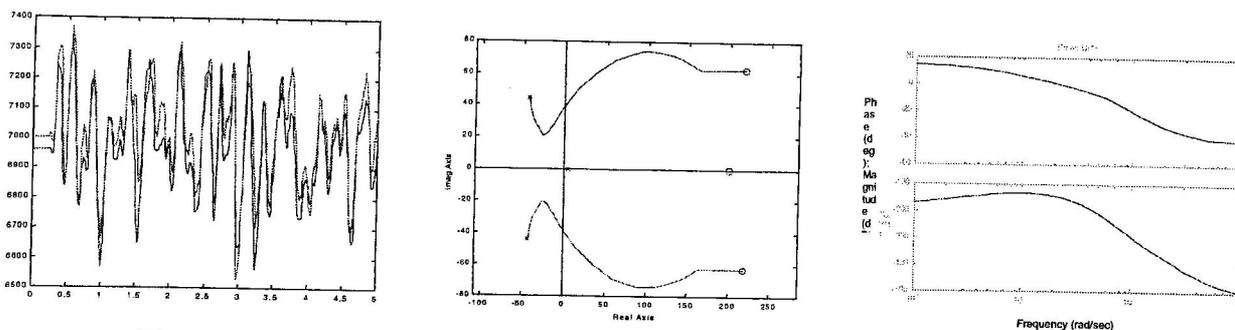


Figura 4. Convergencia, lugar de las raíces y diagrama de bode (posición 7).

#### 4. CONCLUSIONES

Se han presentado en este artículo los trabajos relativos a la identificación de un sistema compuesto por un cilindro neumático, una válvula proporcional y un encoder incremental. En primer lugar se ha estudiado el modelo teórico para el sistema introducido por otros investigadores. Este modelo teórico permitirá validar los resultados experimentales obtenidos. Como consecuencia de las pruebas efectuadas para la identificación del sistema se ha podido comprobar los diferentes comportamientos del mismo en función del punto de funcionamiento. Se ha analizado en profundidad siete puntos de funcionamiento distintos que permite mostrar la diferencia e influencia del punto de funcionamiento sobre el comportamiento del sistema. Los resultados alcanzados posibilitarán el diseño y utilización de diferentes reguladores de forma que se posibilite un control de posición del sistema lo más exacto y robusto posible.

#### AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este artículo se ha realizado gracias a la financiación aportada por el Ministerio de Educación y Cultura (Dirección General de Enseñanza Superior e Investigación Científica) para el desarrollo del proyecto de investigación 'Robot Trepador para mantenimiento de palmeras y de estructuras cilíndricas alargadas' 1FD1997-1338.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Aracil, R. Saltarén, J.M. Sabater, "TREPA, Parallel Climbing Robot for Maintenance of Palm Trees and Large Structures", Proc. 2nd International Workshop & Conference on CLIMBING & WALKING ROBOTS (CLAWAR), Sept. 1999, pp. 453-461.
- [2] R. Saltarén, R. Aracil, J.M. Sabater, O. Reinoso, L.M. Jiménez, "Modelling, Simulation and Conception of Parallel Climbing Robots for Construction and Service", Proc. 2nd International Workshop & Conference on CLIMBING & WALKING ROBOTS (CLAWAR), Sept. 1999, pp. 253-265.
- [3] R. Saltarén, R. Aracil, J.M. Sabater, O. Reinoso, J.M. Azorín, "Research and development of a pneumatic control for a parallel climbing robot", International Workshop & Conference on CLIMBING & WALKING ROBOTS (CLAWAR), 2000.
- [4] C. R. Burrows, "Fluid Power Servomechanisms", Van Nostrand Reinhold Co., London, England, 1972, pp 132-155.
- [5] Robert B. Van Varseveld, Gray M. Bone, "Achurate Position Control of a Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves", Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nuevo Mexico, Abril 1997.

- [6] J. Wang, J. Pu, P. Moore, "*A practical control strategy for servo-pneumatic actuator systems*", Control Engineering Practice, Pergamon, 1999.
- [7] X. Brun, M. Belgharbi, S. Sesmat, D. Thomasset, S. Scavarda, "*Control of an electropneumatic actuator, comparison between some linear and nonlinear control laws*", Journal of Systems and Control Engineering.
- [8] H. Hahn, "Nonlinear Control of a Servopneumatic Actuator", Automatisierungstechnik 48, Oldenbourg Verlag, Marzo, 2000.
- [9] Van Overschee, B. De Moor, "*N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems*", Automatica, Vol. 30, No 1, pp. 75-93, 1994.