



## EQUIPO EDUCATIVO PARA LA ENSEÑANZA DE LA MECATRÓNICA, SISTEMA DE BOLA Y BARRA

ALFREDO E. PUGLESI, MARÍA SUSANA BERNASCONI

Universidad Nacional de Cuyo

Facultad de Ingeniería

Centro Universitario (M5502KFA), Mendoza, República Argentina

*(Recibido 15 de mayo de 2011, revisado 14 de agosto de 2011, para publicación 25 de agosto de 2011)*

**Resumen** – Este trabajo llevado a cabo por los autores, docentes de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, que junto con una par de alumnos, aborda el tópico de la enseñanza experimental. El objetivo fue diseñar, construir y poner en marcha un equipo que integre los conceptos que dan origen a la mencionada ingeniería. A su vez y desde la óptica local, tal equipo sirve para práctica de las cohortes subsiguientes sin recurrir a la compra de similares a veces muy costosos; en ese sentido es un aporte a la educación en el intento de cerrar la brecha entre teoría y práctica. Se tomó el caso de una bola que se puede desplazar sobre una barra, en cuyo centro y mediante engranajes reductores, se vincula al eje de un motor de CC, la consigna es posicionar la bola en cualquier parte de la barra, para ello el motor ejerce una cupla para desplazarla a la posición indicada y mantenerla allí, aún en presencia de disturbios en forma de impulsos.

**Palabras clave** – Diseño, mecanizado, modelado, control en cascada, educación.

### 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene por objetivo mejorar los aspectos cognitivos de los estudiantes de la carrera de grado de Ingeniería en Mecatrónica, habida cuenta que los autores, profesores a su vez de las carreras de Ingeniería Industrial y de Petróleos, en la asignatura “Instrumentación y Control Automático”; vienen desarrollando plantas pilotos con igual finalidad desde 1997 con igual consigna, con resultados muy satisfactorios, a la luz de las encuestas realizadas, años tras año, a los estudiantes de las mencionadas ingenierías, ya que ponderan los beneficios de experimentar sobre procesos reales [1].

No pocos de ellos, con una simple frase sintetizan la conveniencia de disponer de tal equipamiento al escribir: “me imaginaba que era así, pero después de practicar me di cuenta que la realidad es otra”. Está claro que el proceso de educar es complejo, con desigual grado de entendimiento por parte de los alumnos al momento de impartir la teoría, que aún siendo interactiva, no alcanza, por igual a todos. Otra ventaja adicional es que al experimentar en equipo sobre una planta didáctica, discuten sus diferentes puntos de vista, consultan la teoría, preguntan a sus docentes, aclaran dudas y finalizan con conclusiones convergentes y acertadas.

Para sumar un equipo más con igual finalidad que sus predecesores, se describe aquí el diseño y la construcción de un sistema que consiste en posicionar una bola en cualquier parte de una barra acanalada, cuyo centro y mediante un subsistema de engranajes la vinculan a un motor de CC de forma tal que éste ejerce una cupla para desplazar la bola a la posición indicada y mantenerla allí, aún en presencia de disturbios en forma de impulsos, tomando los antecedentes de brindados por [2].

Se eligió la construcción de un sistema de “bola y barra” con el propósito de aplicar en forma integrada los conocimientos adquiridos en los años de estudio previos. Por otra parte, dado que una de las piedras angulares del proyecto es el control de un sistema intrínsecamente no lineal, es también un aporte para la explicación de este tipo de sistemas en el dictado y prácticas de la cátedras afines a los sistemas de control.

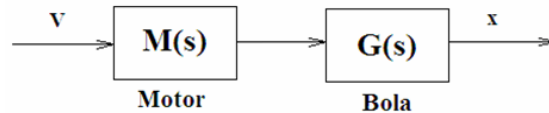


Fig. 1. Diagrama de bloque de lazo abierto.

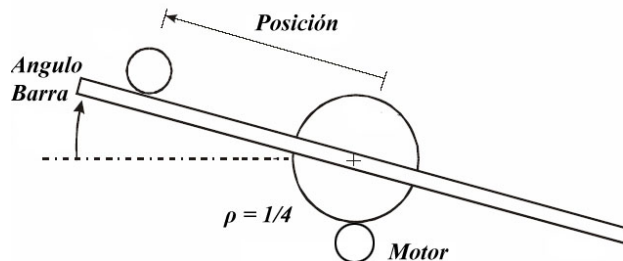


Fig. 2. Esquema del sistema, incluyendo la reducción.

En este trabajo se describirá la concepción mecánica, el modelado del sistema obteniendo las respectivas funciones de transferencia, los componentes electrónicos principales y el control necesario para cumplir el objetivo.

## 2. DESARROLLO

Como metodología se realizó en una primera instancia una revisión bibliográfica, luego el diseño mecánico, mecanizado y ensamblaje, posteriormente se procedió al modelado y simulación para dar paso al diseño de la electrónica de potencia necesaria y del control mediante Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> corriendo en tiempo real, culminando así la integración de las partes y posterior período de prueba y puesta a punto.

El punto de partida es el diagrama de bloque de lazo abierto mostrado en la Fig. 1, donde  $v(t)$  es la tensión aplicada al motor de CC y  $x(t)$  la posición de la bola:

La literatura menciona algunas variantes para vincular el efector con la barra, cada una con ventajas e inconvenientes, en este caso se prefirió la disposición del eje en el centro de la barra ya que disminuye la cantidad de piezas mecánicas y facilita el modelado del sistema, en comparación con otros modelos, por ejemplo con eje en un extremo de la barra.

La Fig. 2 brinda un esquema simplificado que contempla la reducción implementada, ya que ésta juega un papel muy importante debido a que la resolución del motor elegido tiene una distancia angular de giro mínima de unos  $5^\circ$ , observándose que si bien esto no implica un gran cambio en el centro de la barra de 100 centímetros de longitud, hacia los extremos significa un cambio considerable de altura de 4,36 centímetros. Para reducir esta variación, es decir, aumentar la resolución de la barra en relación a la del motor se utilizó un sistema piñón - engranaje con un coeficiente de reducción  $\rho = 1/4$ . Se logra así una variación mínima de  $1,25^\circ$  que se traduce en un cambio de altura de 1,09 cm en los extremos de la barra.

### 2.1. Concepción mecánica

La concepción mecánica del modelo de bola y barra se ideó con el objetivo de disminuir las vibraciones causadas por el motor y el movimiento mismo de la barra sobre su eje. De esta manera se lograron buenas condiciones para la captación de señales por parte de los sensores de posición y de ángulo, mejorando de este modo el desempeño de los controladores, a continuación se describen sus partes principales.

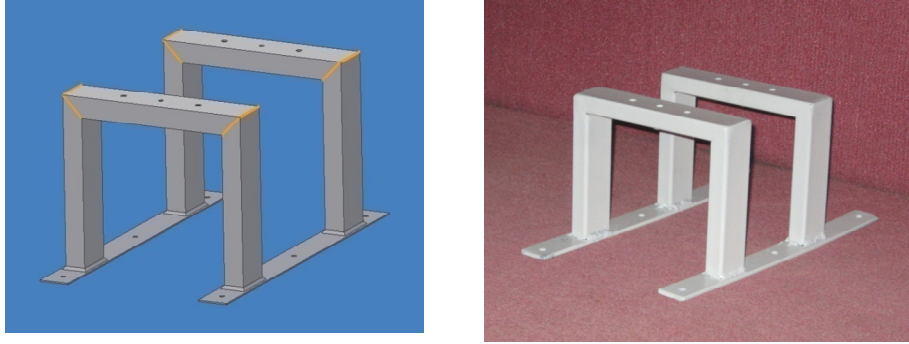


Fig. 3. Soporte de la barra.

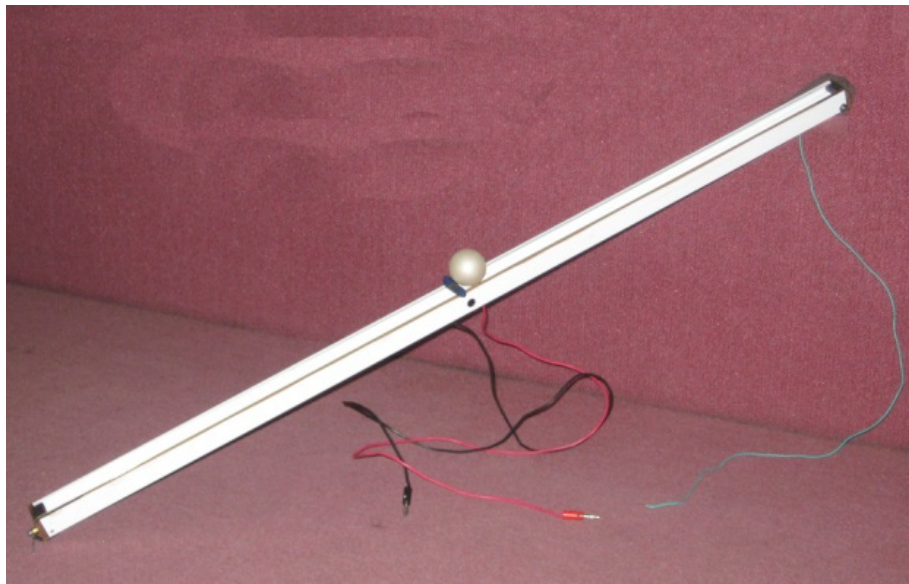


Fig. 4. Barra y bola, los conductores corresponden al sensor de posición.

### 2.1.1 Soporte de la barra

El soporte tiene como finalidad sostener los rodamientos que guían al eje, el cual es solidario a la barra. Éste fue construido con caños estructurales de 40 mm por 20 mm soldados entre sí. La Fig. 3 muestra la pieza en el diseño CAD, como su realización, esquema que se repetirá con las otras piezas componentes del sistema.

A su vez la Fig. 4 corresponde a la barra, que es el elemento donde se desplaza la bola. Este componente debe ser rígido y liviano, por lo que se eligió aluminio. Su perfil posee una forma estandar y permite que la bola se transporte sin problemas. Se realizaron tres agujeros de 5 mm de diámetro para hacer la barra solidaria al eje y al engranaje. Además se maquinó una canaleta de 3 décimas de milímetro en donde va adherido el alambre de nicrom con el que se desarrolla un potenciómetro lineal, indicando la posición de la esfera.

### 2.1.2 Plataforma y soporte del motor

Con la plataforma se buscó obtener rigidez pero también la posibilidad de transportar el equipo completo. Por este motivo se diseñó una que pudiera albergar las fuentes de alimentación y la electrónica de potencia. Fig. 5.

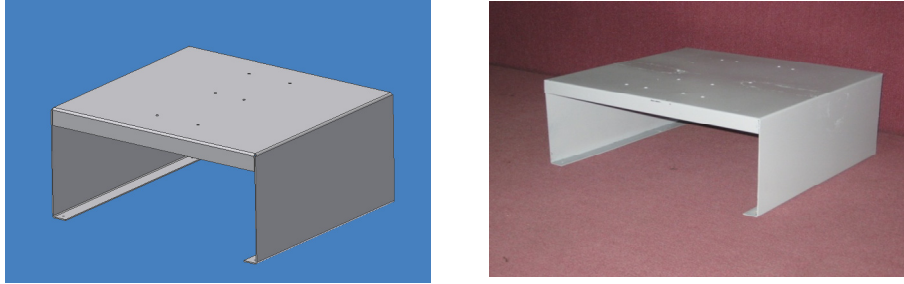


Fig. 5. Plataforma del motor.

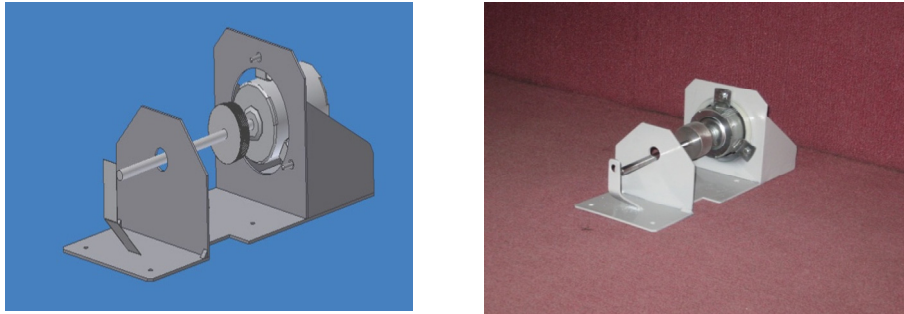


Fig. 6. Soporte y motor.

En tanto el soporte del motor, como se puede ver en la Fig. 6, es la pieza intermedia entre la plataforma y el motor. Sus componentes son láminas de acero de espesor 1,5 mm soldadas entre sí. El soporte está vinculado al motor y a la plataforma a través de bulones. Una prolongación está destinada a alojar el potenciómetro sensor del ángulo que se puede observar en la parte delantera. También se colocó una planchuela de polietileno entre el soporte y la plataforma con el objetivo de absorber las vibraciones provenientes del motor.

### 2.1.3 Subsistema reductor de velocidad

Como ya se mencionara y como puede verse más adelante en la Fig. 9, se diseñaron dos engranajes que constituyen un reductor de velocidad. Se optó por una transmisión por engranaje, ya que esta era más adecuada que una transmisión por correas, la cual además de agregar partes al proyecto, supone la concepción de un sistema de tensado. Esto complicaría el diseño mecánico y aumentaría la cantidad de piezas.

Entre las transmisiones por engranajes se consideró más adecuado el de tipo cilíndrico. El material debía ser liviano por lo que se eligió hacerlo en aluminio; además para disminuir el efecto de la inercia, al final del mecanizado, se torneó la corona quitándole masa de forma radial desde los 10 mm hasta los 90 mm de radio, conservando a su vez, la resistencia para soportar los esfuerzos en los dientes.

Para su dimensionamiento se debió definir el módulo en función de la potencia a transmitir y de la relación de transmisión deseada. Como el torque resistente y las inercias eran pequeñas, la potencia a transmitir se pudo despreciar y se procedió a elegir la relación de transmisión adecuada. El motor iba a trabajar a velocidades no muy altas en el estado estacionario pero con una velocidad de reacción considerable en los transitorios. Estaba claro que para estabilizar la bola, el ángulo de la barra debe variar rápido en función de la consigna de control enviada. Siguiendo estas pautas y usando la bibliografía recomendada, se eligió la relación de transmisión de  $\frac{1}{4}$ . A su vez se consideraron las ventajas de un dentado helicoidal, este es más silencioso, duradero y suave en la transmisión del movimiento. Como el proyecto requería de precisión para estabilizar la bola, y la diferencia de precio entre el mecanizado de uno y otro no era significativa, se optó por el dentado helicoidal, según se muestra en la Fig. 7.

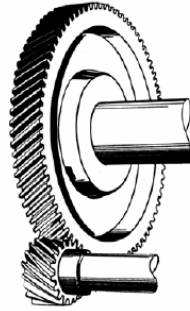


Fig. 7. Subsistema reductor de velocidad, dentado helicoidal.

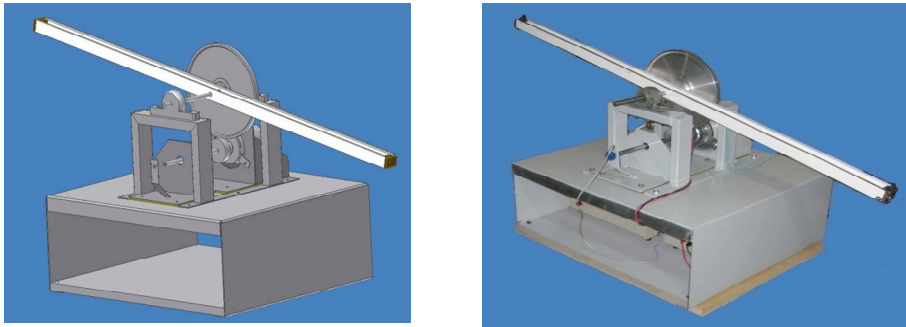


Fig. 8. Ensamblaje completo.

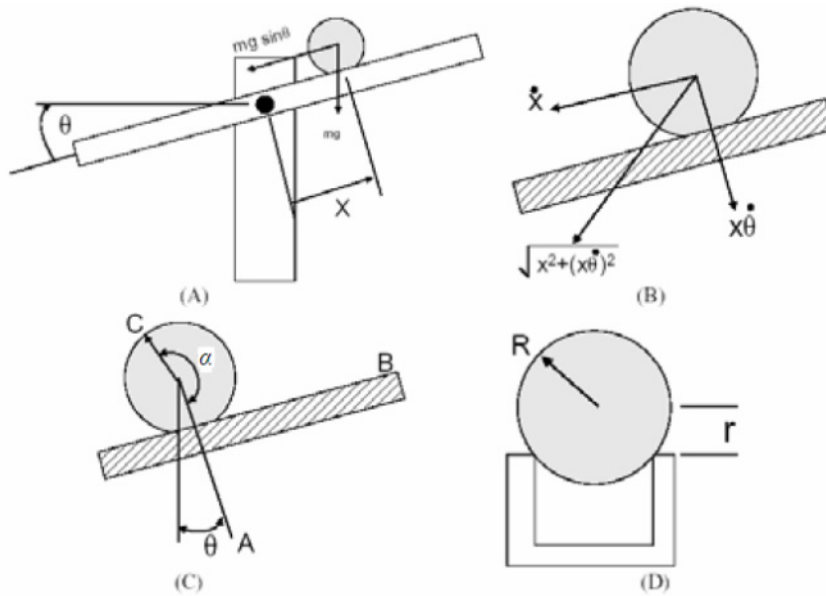


Fig. 9. Modelado del sistema.

Para los cálculos de los engranajes helicoidales, se utilizaron los recomendados por [3]. Como conclusión, la transmisión por engranajes helicoidales seleccionada supone un buen aporte al sistema ya que a través de ésta se mejora la resolución del ángulo de la barra y se facilita el control de la posición de la bola.

### 2.1.4 Ensamblaje completo

A continuación y mediante la Fig. 8, se puede observar el ensamblaje completo, la estructura final resultó compacta y fácil de transportar.

### 2.2. Modelo matemático - Función de transferencia (FT)

Las ecuaciones matemáticas derivan de la concepción mecánica del sistema [4]. La Fig. 9 muestra una representación esquemática del modelo. Para modelarlo se eligió un enfoque Lagrangeano, en vez de aplicar directamente las ecuaciones de Newton.

En este problema, se asumió que la bola gira sin resbalamiento y que la fricción entre la barra y la bola es despreciable. Como el efector del sistema es un motor de corriente continua, no hay elasticidad en el sistema. El Lagrangeano es por lo tanto la energía cinética  $U$ , dada por (1):

$$U = \frac{1}{2}m \cdot v^2 + \frac{1}{2}I_b \cdot \omega^2 + \frac{1}{2}I_a \cdot \theta^2 \quad (1)$$

donde  $m$  es la masa de la bola,  $v$  la velocidad de traslación de la bola,  $w$  la velocidad angular de la bola,  $\theta$  el ángulo de la barra,  $I_a$  la inercia de la barra, e  $I_b$  la inercia de la bola. Debido a que los sensores del sistema miden la posición de traslación de la bola  $x$  y el ángulo de la barra  $\theta$ , se procedió a escribir la ecuación anterior en términos de sólo estas dos variables.

Como resultado de la elaboración del cálculo, la ecuación 2 representa el modelo del sistema a partir de los puntos de equilibrio donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. Se asume que el sistema de control, para pequeñas perturbaciones, actúa de tal forma que lleva la bola al reposo con un mínimo movimiento de la barra. De este modo, el ángulo de la barra y sus derivadas se asumen pequeñas ( $\sin\theta \rightarrow \theta$ ).

$$\left(m + \frac{I_b}{r^2}\right) \ddot{x} = m \cdot g \cdot \theta \quad (2)$$

La FT del modelo de la planta se obtiene tomando la transformada de Laplace de la ecuación precedente, por lo que la ecuación 3 representa la FT:

$$G(s) = \frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{mg}{m + \frac{I_b}{r^2}} \cdot \frac{1}{s^2} \quad (3)$$

Como la bola utilizada es una pelota de ping-pong, pintada con pintura a la plata, para tornarla conductora, el momento de inercia de una esfera homogénea hueca de masa  $m$ , radio interior  $a$  y radio exterior  $R$ , está dada por (4):

$$I_b = \frac{2}{5}m \cdot \frac{R^5 - a^5}{R^3 - a^3} \quad (4)$$

Reemplazando (4) en (3), y simplificando la masa, se obtiene la ecuación 5:

$$G(s) = \frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{g}{1 + \frac{5}{r^2} \frac{R^3 - a^3}{R^5 - a^5}} \cdot \frac{1}{s^2} \quad (5)$$

donde  $r$  es el rotacional efectivo sobre la barra, como se puede ver en la Fig. 10 y es calculado por el teorema de Pitágoras:

La aceleración de la gravedad  $g$  depende de la altitud, de la latitud y de la topografía del lugar donde se haga el experimento. Para este caso se tomó  $g = 9,793 \text{ m/s}^2$ . Con este valor de  $g$  y  $R = 2 \text{ cm}$ ,  $a = 1,824 \text{ cm}$  y  $r = 1,73 \text{ cm}$  se obtiene la FT para este sistema en particular:

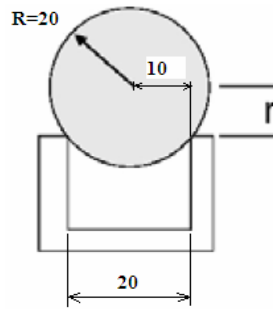


Fig. 10. Radio rotacional o efectivo.

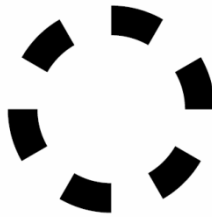


Fig. 11. Rueda del encoder.

$$G(s) = \frac{X(s)}{\theta(s)} = \frac{5,3984}{s^2} \quad (6)$$

En cuanto al motor de corriente continua, su FT  $M(s)$ , se encuentra en la literatura especializada, no obstante, para este caso, no resultó posible conocer los parámetros tales como  $K_t$  (constante de armadura),  $K_e$  (constante del motor),  $b$  (constante de amortiguamiento) y la inductancia  $L$ , por ser un motor de CC de bajo costo y no disponer de las especificaciones del fabricante.

Es por ello que se tuvo que seguir un método indirecto para caracterizarlo. El método consistió en analizar la respuesta del motor a un escalón y así obtener la FT de la relación velocidad - tensión a partir de (7), simplificada como de primer orden y así poder estimar los valores de  $K_m$  y  $\tau_m$

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{s\tau_m + 1} \quad (7)$$

Para ello era necesario contar con un tacómetro, su adquisición era excesivamente costosa, por lo que se tuvo que proceder a construir un encoder óptico para reemplazarlo.

Un encoder es un dispositivo electromecánico que se usa para medir posición o velocidades. Este consiste en un sensor óptico y en una rueda que se fija al eje. La rueda tiene un patrón de sectores opacos y transparentes, como se ve en la Fig. 11. Cuando esta rueda gira, los sectores opacos bloquean el paso de luz, y los sectores transparentes la dejan pasar. De este modo se obtiene un tren de pulsos, que puede ser traducido en posición y/o velocidades.

El sensor que se eligió fue simplemente un sensor infrarrojo de ranura (o foto-interruptor). La conexión eléctrica se muestra esquematizada en la Fig. 12.

Como el sensor tiene un tiempo de respuesta (Fig. 13), se le agregó el circuito integrado HEF40106B que funciona como un inversor con disparador de Schmitt. Este circuito satura en diferentes puntos de aumento y disminución de la señal de entrada (Fig. 14). La diferencia entre  $V_P$  y  $V_N$  define el tensión de histéresis  $V_H$ .

De este modo, al girar la rueda entre el sensor de ranura, se obtuvo un tren de pulsos con una frecuencia proporcional a la velocidad de giro.

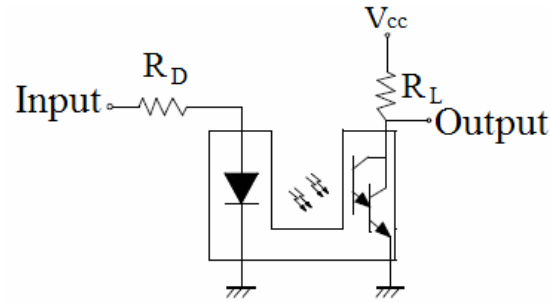


Fig. 12. Aplicación del sensor de ranura.

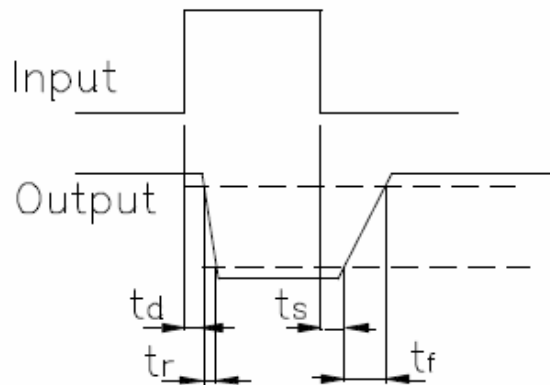


Fig. 13. Tiempos de respuesta del sensor de ranura.

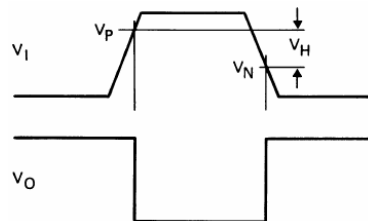


Fig. 14. Acción del circuito integrado HEF40106B.

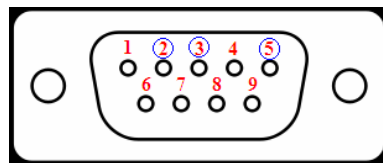


Fig. 15. Conector DB - 9 hembra - vista lado soldadura.

Para enviar esta señal a la computadora, y procesarla con el software LabVIEW, se usó un PIC18F4523 y una conexión por puerto serie. Siguiendo el estándar RS-232, se usó un conector de 9-pines (Fig. 15), y los siguientes pines:

- Pin 2. RD: recepción de datos
- Pin 3. TD: transmisión de datos
- Pin 5. GND: tierra



Tabla 1. Constantes de tiempo y ganancias.

Escalón PC	$V_{teórica}$	$V_{real}$	$K_m$	$\tau_m$
1.1	-10.27	-10.24	28.51	0.17
1.4	-8.07	-8.07	28.57	0.13
1.7	-5.87	-5.9	32.21	0.11
2.0	-3.67	-3.64	22.79	0.15
2.7	1.47	1.44	15.16	0.15
3.0	3.67	3.75	20.16	0.1
3.3	5.87	5.88	25.22	0.12
3.6	8.07	8.01	27.47	0.13
3.9	10.27	10.19	27.58	0.17

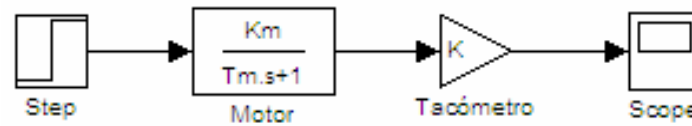


Fig. 16. Diagrama en bloques con Matlab®/ Simulink®.

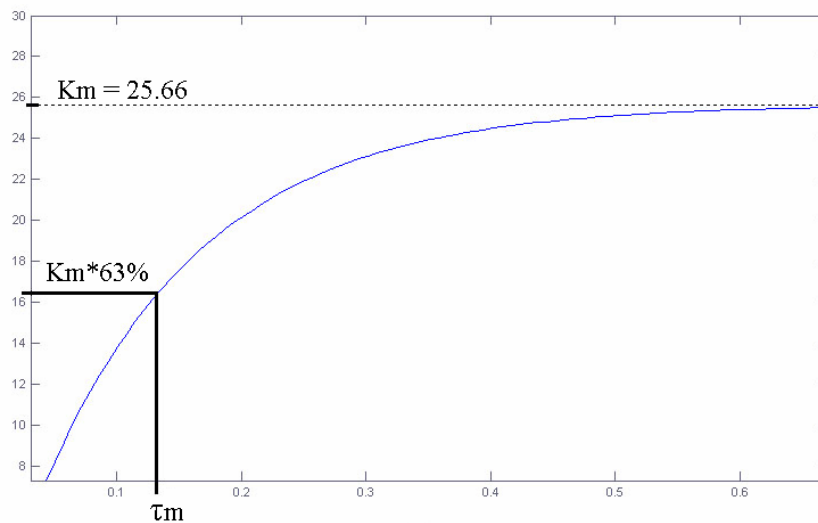


Fig. 17. Respuesta al escalón.

Con el software LabVIEW®, se llenó la tabla 1 siguiente, midiendo la tensión real aplicada al motor y calculando la constante de tiempo  $\tau_m$  y la ganancia  $K_m$  para cada escalón. Finalmente se hizo un promedio de todas las constantes de tiempo y de todas las ganancias calculadas.

El  $K_m$  promedio resultó 25,30 y el  $\tau_m$  promedio 0,14. Con el software Matlab®/ Simulink®, se hicieron las pruebas de respuesta escalón del motor, y posterior graficación.

La Fig. 16 muestra el diagrama en bloques realizado y la Fig. 17 la respuesta al escalón.

El valor de  $\tau_m$  corresponde al tiempo transcurrido desde el momento en que la entrada perturba al sistema hasta que la salida de este alcanza el 63% de su valor en estado estacionario.

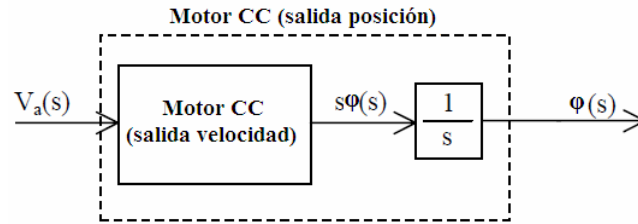


Fig. 18. Función de Transferencia Tensión - Posición.

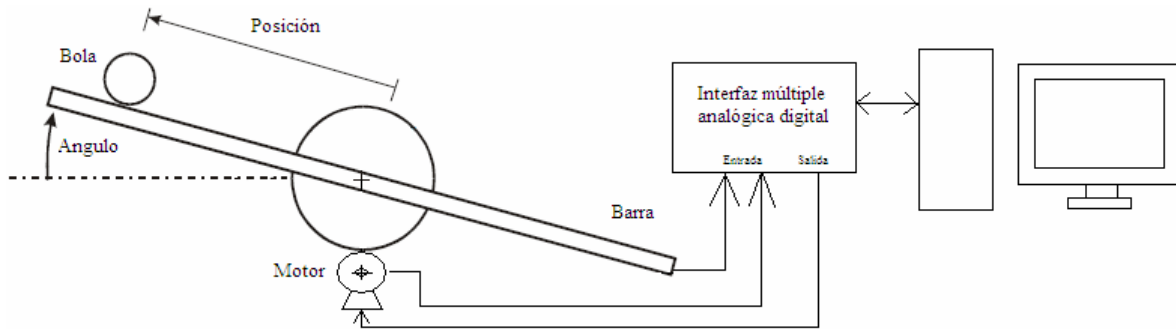


Fig. 19. Esquema completo del sistema de bola y barra, incluyendo el hardware de control.

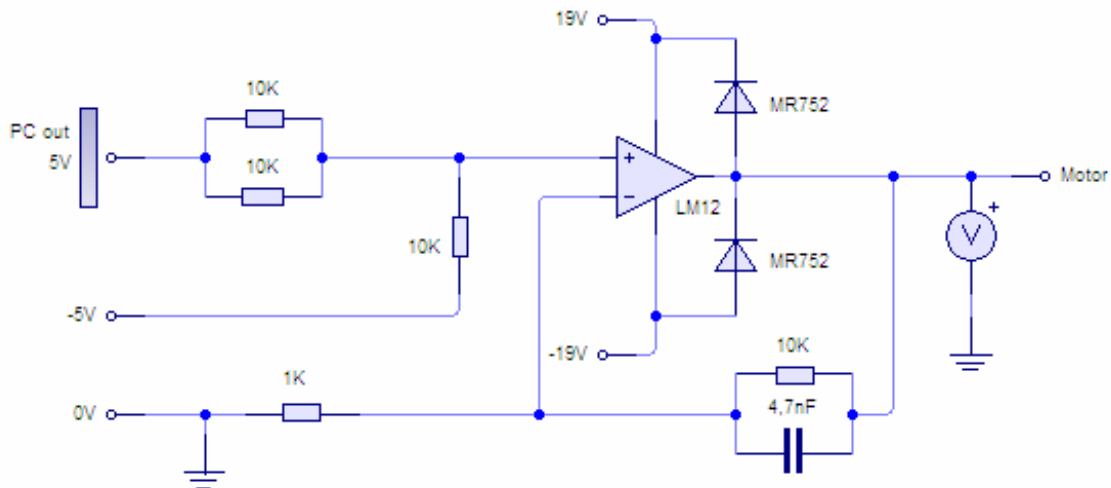


Fig. 20. Interfaz DAC con alimentación en ambos sentidos del motor de CC.

Luego la FT tensión-posición se obtuvo integrando (7). La Fig. 18 corresponde al diagrama en bloques y (8) la Función de Transferencia.

$$M(s) = \frac{\Phi(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{s^2 \tau_m + s} = \frac{25,66}{0,14 \cdot s^2 + s} \quad (8)$$

Obtenidas las FT del sistema (6) y del efector (8), resultó sencillo simular el sistema a lazo cerrado en Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup>, aspecto que fue de utilidad al momento de encontrar los valores de arranque o tentativos más apropiados para los parámetros de los algoritmos de control PID en el lazo realimentado.

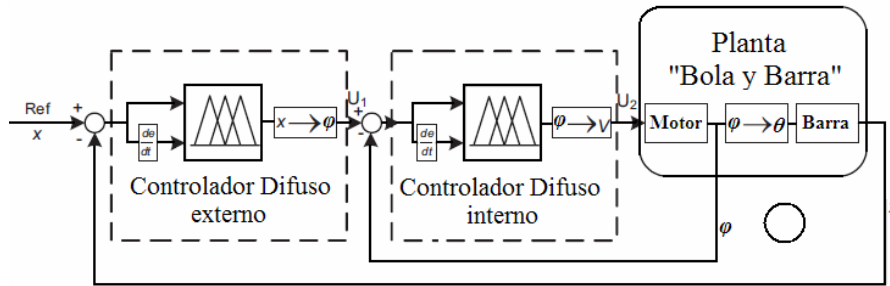


Fig. 21. Control en cascada con lógica difusa.

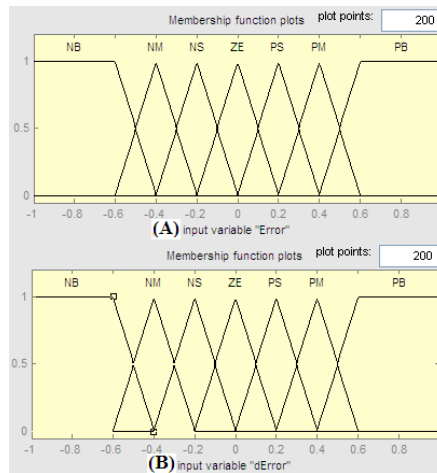
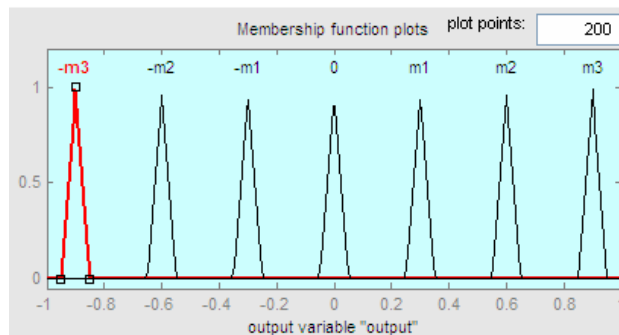
Fig. 22. Funciones de pertenencia de las entradas al controlador externo: E por error y  $\Delta E$  por su derivada.

Fig. 23. Funciones de pertenencia de la salida del controlador externo.

### 2.3. Control y electrónica asociada

Como se adelantara, el ángulo de la barra se midió con un potenciómetro angular y la posición de la bola con un potenciómetro lineal desarrollado mediante un alambre de nicrom a lo largo de la barra.

El control se realizó con una PC con Matlab®/ Simulink® corriendo en tiempo real [5], .dll específicas establecen una interfaz con una plaqueta ADC / DAC, con un rango de tensión tanto para las entradas como para las salidas de 0 a +5Vcc. La Fig. 19 muestra el esquema del sistema completo.

A su vez la Fig. 20 corresponde al circuito de interfaz entre la salida del DAC y la alimentación del motor de CC, que debe girar en ambos sentidos.

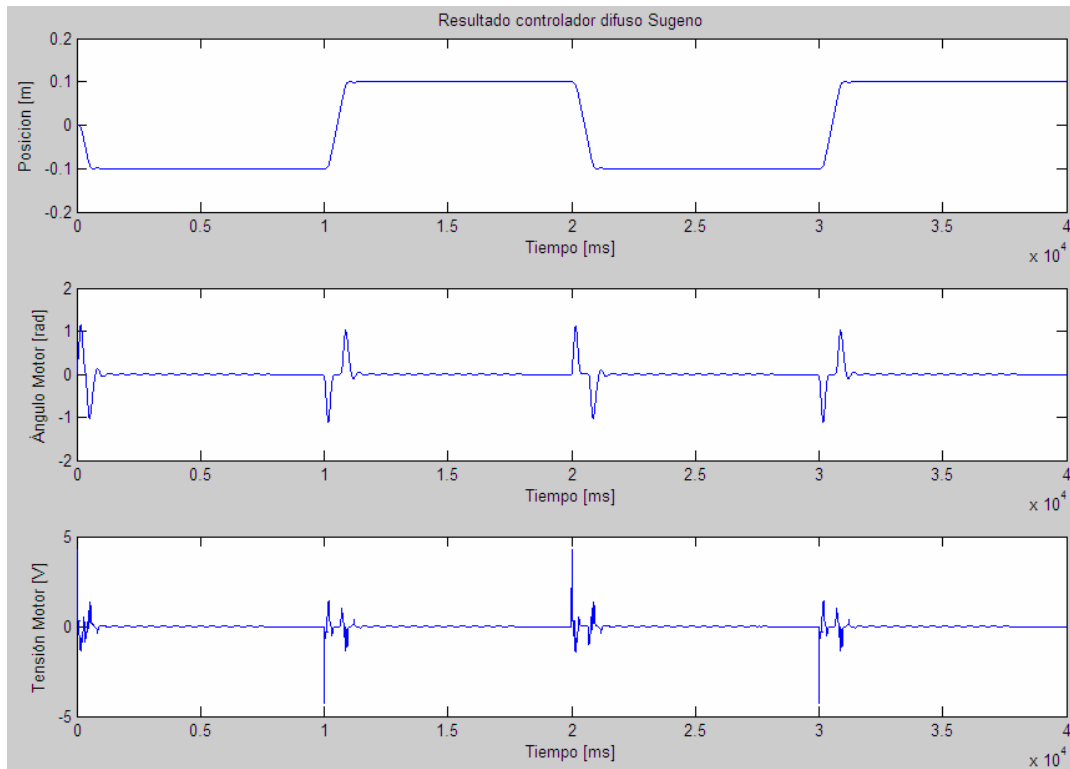


Fig. 24. Corrida en tiempo real.

Se ensayaron distintas estrategias de control, en este trabajo se expone solo la realizada con lógica difusa en una estructura en cascada [6], esto es, la salida de un controlador “maestro o externo”, cuya variable controlada es la posición de la bola, es el valor deseado de un controlador “esclavo o interno” donde su variable controlada es el ángulo de la barra y su salida maneja a través del DAC maneja la tensión de alimentación del motor de CC tanto en magnitud como en polaridad, permitiendo velocidad de reacción y sentido de giro del mismo. La Fig. 21 muestra el esquema de control mencionado:

Los controladores difusos son del tipo Sugeno y ambos fueron diseñados con el mismo procedimiento. Las variables de entrada para el primero son el error  $E$  y la derivada del error  $\Delta E$ . Sus funciones de pertenencia fueron etiquetadas de la siguiente manera, siguiendo la bibliografía en inglés: NB: Negative Big, NM: Negative Medium, NS: Negative Small, ZO: Zero, PS: Positive Small, PM: Positive Medium y PB: Positive Big, Fig. 22.

Ahora, la salida del controlador tiene la siguiente semántica: -m3, -m2, -m1, 0, m1, m2 y m3. Fig. 23:

Las reglas de inferencia entre las entradas y la salida son sencillas de establecer, por lo que no se abundará en ese tema. En forma similar se establecieron funciones de pertenencia de las entrada – salida para el controlador difuso “esclavo o interno”. En la Fig. 24 se destaca una corrida en tiempo real del sistema bola y barra controlado mediante lógica difusa.

### 3. CONCLUSIONES

En cuanto al proyecto en particular: se logró diseñar y construir un aparato de bola y barra cuyo control demostró ser aceptable. Al comienzo se trabajó paralelamente en el diseño mecánico y en el desarrollo de la electrónica. En la concepción mecánica, no surgió ningún inconveniente y se podría decir que ésta fue la adecuada ya que mirando retrospectivamente, se puede apreciar que la utilización de engranajes helicoidales fue una decisión acertada. En la etapa final se llevó a cabo el control del sistema, esta fue la de mayor complejidad debido a la gran cantidad de métodos existentes, además de las variadas combinacio-

nes posibles. Primero se utilizó control en cascada con PID. Aunque se lograron buenos resultados con este método se sabía que el controlador PID no es eficiente en cuanto a las no linealidades. Por ello el valor deseado de la bola debe permanecer no muy lejos del centro de la barra ya que esa es la zona en donde el comportamiento del sistema se aproxima al de uno lineal. Luego la introducción de la lógica difusa posibilitó que el controlador fuera capaz de adaptarse a las no linealidades que el sistema de bola y barra presenta. Si bien generalmente la puesta en marcha de este tipo de controlador es compleja y tediosa debido a la gran cantidad de ensayos que se deben realizar, las prestaciones del controlador difuso en cuanto a sistemas no lineales son superiores a los del PID ensayado previamente. Fue de gran ayuda las simulaciones realizadas off line con Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> utilizando las FT desarrolladas en el punto 2.2.

En relación a la educación en carreras de grado: retomando y ampliando lo vertido en la Introducción, es interesante destacar, que como docentes de una asignatura del área de las Tecnologías Aplicadas, vemos que hay una creciente tendencia al uso de programas de simulación relativas al control de procesos y de dispositivos mecatrónicos, incluyendo el llevado a cabo en este Proyecto.

A ese respecto, se pondera la conveniencia del empleo de tales paquetes de software, pero en la fase educativa experimental no debe sujetarse solo a la misma, dado que justamente son los tropiezos y dificultades que conlleva diseñar, construir y poner en uso plantas y equipos didácticos, los que arrojan un saldo muy positivo para los involucrados en ese propósito.

El aporte más significativo de este trabajo, es que sirve para que las sucesivas cohortes practiquen con el equipo en cuestión, en ese sentido y a la fecha, el mismo está siendo utilizado por alumnos de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica, con los resultados esperados, esto es, tomar conciencia de aspectos a veces simplificados en los modelos determinísticos tales como alinealidades no simétricas y fricciones, entre otros aspectos difíciles de contemplar en los mismos.

En contraste con la enseñanza tradicional: teoría, resolución de ejercicios y posible simulaciones, el contar con equipos reales posibilita un beneficioso proceso didáctico realimentado, ya que la calidad de los modelos que intervienen en la simulación son convalidados o mejorados por los obtenidos por el equivalente real y esta a su vez tiene como pié de inicio a la simulación.

Se recuerda que el control se realizó con una PC con Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> corriendo en tiempo real, los datos de las variables en juego son almacenadas en archivos .mat que luego sirven para identificar el sistema y subsistemas del equipo mediante métodos regresivos, ofreciendo a los alumnos una ventana al mundo de los modelos heurísticos.

Por lo expuesto se concluye que estas experiencias nos animan a opinar una vez más, que este tipo de proyectos contribuyen de una forma efectiva y eficaz en la formación de los ingenieros [7], opinión que es compartida por otros docentes del orbe [8,9].

## REFERENCIAS

- [1] Puglesi, A., Bernasconi, M.S., *Equipos para la enseñanza del Control Automático*, Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, Mar del Plata, RPIC (1999)
- [2] Rosales, E.A., *A Ball-on-Beam Project kit*, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology (2004)
- [3] ANSI/AGMA 2101-D04, *Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Helical Gear Teeth* (Metric Edition) (2004)
- [4] Virseda, M., *Modeling and Control of the Ball and Beam Process*, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (2004)
- [5] Puglesi, A.E., *Diseño, Construcción y Control en Tiempo Real mediante Simulink<sup>®</sup> de Planta Didáctica Multivariable*, Editorial Ex-Libris, Mendoza, Argentina (2004)
- [6] Oh, S.K. *et al.*, "The design of a fuzzy cascade controller for ball and beam system: A study in optimization with the use of parallel genetic algorithms", *Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **22**(2), 11217-11229 (2009)
- [7] Puglesi, A.E., Bernasconi, M.S., "Planta Piloto Multivariable para la enseñanza del Control Automático de Procesos en la Facultad de Ingeniería", *Actas de V CAEDI*, **II**, 961-968, Mendoza, Argentina (2006)

- [8] Horacek, P., *Laboratory Experiments for Control Theory Courses: a Survey*, Annual Reviews in Control, (2000)
- [9] Lewin, D.R., Rockman, J., Lavic, R., *Teaching Advanced Process Control to Undergraduates*, Computers Chemical Engineering (1996)

### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean felicitar y agradecer a los alumnos Gustavo Monjo y Gonzalo Garrido, ya noveles ingenieros, por participar en este trabajo con dedicación y esmero, lo que alienta a continuar en este “enseñar y aprender haciendo”. También se agradece a la Asociación Cooperadora de la Facultad de Ingeniería (ACOFI) de la Universidad Nacional de Cuyo, por el apoyo económico brindado para el diseño y construcción de este equipo.

### **EDUCATIONAL EQUIPMENT FOR TEACHING MECHATRONICS, BALL AND ROD SYSTEM**

**Abstract** – This work carried out by the authors, professors of Engineering in Mechatronics, Faculty of Engineering – National University of Cuyo, which together with a pair of students, addresses the experimental teaching topic. The objective was to design, build and launch an educational equipment that integrates the concepts that give rise the above mentioned engineering. At the same time and from a local perspective, it is used for next cohorts to practice without to buy similar and sometimes very expensive device, in that sense is a contribution to education in an attempt to bridge the gap between theory and practice. Was chosen the case of a ball which can move on a rod that in its center and through reduction gears, is linked to a DC motor’s shaft, the idea is to position the ball anywhere on the rod, so the motor makes a braked over the rod to move the ball to indicated position and hold it there, even in presence of disturbances in the form of short pulses.

**Keywords** – Design, Mechanized, Modeling, Cascade control, Education.