



PROYECTO FINAL DE ESTUDIOS, UNA EXPERIENCIA ACADÉMICA

ALFREDO E. PUGLESI, MARÍA SUSANA BERNASCONI

Universidad Nacional de Cuyo
Facultad de Ingeniería
Centro Universitario (M5502KFA) – Mendoza – República Argentina

(Recibido 8 de junio de 2011, para publicación 25 de julio de 2011)

Resumen – Inserto en la temática de las innovaciones, experiencias e investigación en las tecnologías aplicadas, este trabajo describe la realización del último Proyecto Final de Estudios (PFE) por parte de alumnos de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo y en el marco del convenio que la misma tiene con la de l'École Nationale d'Ingénieurs de Brest (Francia), mediante el cual, dos alumnos concurren anualmente para cursar los dos últimos años de la mencionada carrera, retornando para desarrollar el PFE y luego la PPS en Argentina, a cuyo término egresan con titularidad reconocida por ambas casas de estudios y sus respectivos países. Los PFE se llevan a cabo desde el 15 de agosto al 15 de diciembre de cada año, debiendo totalizar no menos de 600 horas y bajo la tutoría, orientación y supervisión de los autores de este trabajo. Como conclusión, a lo largo de más de tres años desde su implementación, ha quedado demostrado que los PFE se perciben como una clara y potente estrategia de enseñanza con la finalidad de que se alcancen los objetivos propuestos en relación con los contenidos, organizados y secuenciados por la currícula. Ha demostrado ser una forma concreta de enseñar y aprender que postula el modelo pedagógico-didáctico y dentro de un conjunto de pautas específicas orientadas a asegurar ese modelo en la práctica de enseñanza institucional.

Palabras clave – Innovación, educación, control, inteligencia artificial.

1. INTRODUCCIÓN

El péndulo invertido rotatorio consiste en una varilla vertical que posee un grado de libertad en unión pívot con un brazo horizontal, a su vez, este gira alrededor de un eje vertical sobre el cual se ejerce, mediante un motor de CC, una cupla con la que se intenta estabilizar la varilla o péndulo en posición vertical que resulta ser de equilibrio inherentemente inestable.

La Fig. 1 muestra el esquema utilizado en el desarrollo del modelo matemático del sistema [3] que en virtud de la brevedad, no se presenta en este trabajo, mientras que la Fig. 2 nos muestra el prototipo terminado.

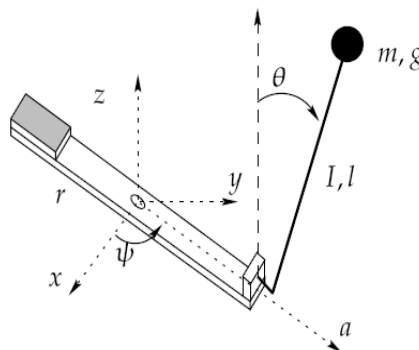


Fig. 1. Esquema del péndulo invertido montado en pívot sobre brazo horizontal.

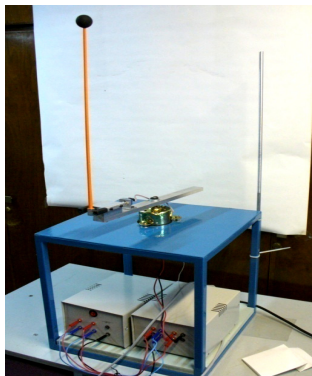


Fig. 2. Prototipo terminado, en plano inferior se destacan la fuente de alimentación e interfaz de potencia.

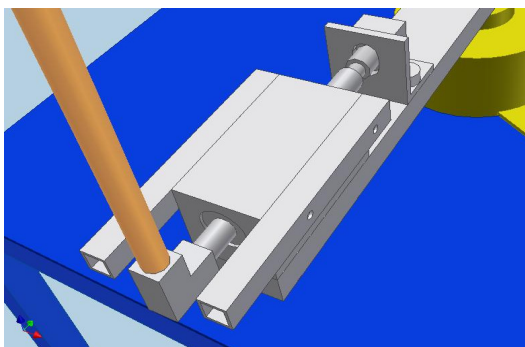


Fig. 3. Detalle en perspectiva de varilla y brazo horizontal en la etapa de diseño y simulación.

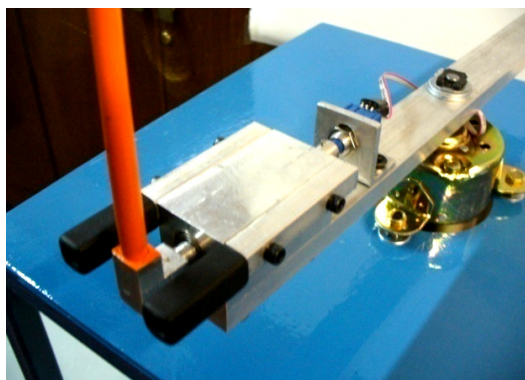


Fig. 4. Varilla y brazo ya contruidos.

2. DESARROLLO DEL TRABAJO

2.1. Diseño mecánico

Empleando el software Inventor[®] versión 6.0, se diseñaron piezas y componentes, la simulación del conjunto resultó de gran ayuda para sortear cuellos de botella, permitiendo luego un mecanizado y ensamblado con mínimos contratiempos. Las Figuras 3 a 8 inclusive nos muestran, de a pares, el resultado entre el diseño y la realización.

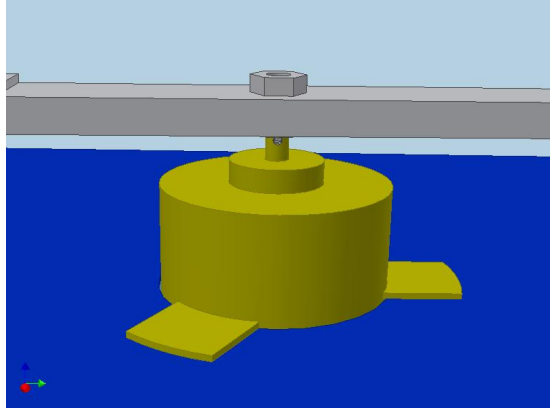


Fig. 5. Detalle del motor y brazo horizontal en la etapa de diseño y simulación.



Fig. 6. Motor y brazo horizontal ya construido.

La estructura principal, de forma cúbica tiene 40 cm de arista, en su cara superior posee una planchuela de acero que soporta el motor y el resto del mecanismo. El armazón fue construido de caño estructural de 20 x 20 mm. El ensamblaje está hecho por soldadura TIG. Se eligió un motor de corriente continua de un electro-ventilador de automóvil que provee la cupla necesaria para mantener en equilibrio la varilla. La elección del mencionado motor fue hecha a partir de las necesidades del proyecto y en función del costo más aceptable. Para la nivelación del mismo se utilizó un sistema de trípode que permite regular la altura de cada pata y así lograr la verticalidad del eje.

El brazo horizontal es de aluminio de sección rectangular de 40 cm de largo encastrada en su punto medio al eje del motor. En un extremo está el soporte del péndulo, que es un bloque de aluminio con un orificio de cada lado donde se insertan los rodamientos que sostienen al eje de la varilla o péndulo que consiste a su vez de cuatro piezas: una varilla de fibra de vidrio, una bola en su extremo de mayor peso que la varilla misma, un codo de aluminio que une solidariamente la varilla y el eje y finalmente el eje que posee un orificio en el extremo dentro del cual se acopla el sensor de ángulo.

Dentro de dificultades que este proyecto encontró en su desarrollo fueron, entre otros, que resulta crítica la alineación del eje del sensor con el eje que sostiene la varilla que debe ser lo más perfecta posible a los efectos de disminuir al máximo el rozamiento dado que podría interferir en la medición (Figuras 7 y 8). A la vez es necesario evitar todo tipo de juego muerto desde el motor hasta el péndulo en sí. La existencia de este juego muerto entre las diferentes piezas puede entorpecer el control ya sea en la medición de la señal o en la transmisión de movimiento. El sistema debe contar con la simetría suficiente para que la medición en ambas direcciones sea simétrica también y el eje del motor debe ser lo más vertical posible para evitar la variación del punto de equilibrio a lo largo de la trayectoria.

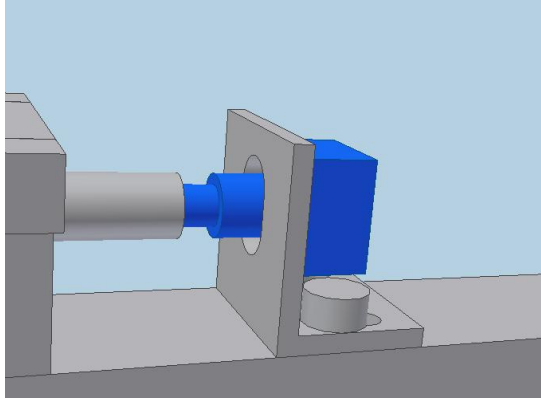


Fig. 7. Acoplamiento entre los ejes de la varilla y sensor en la etapa de diseño y simulación.

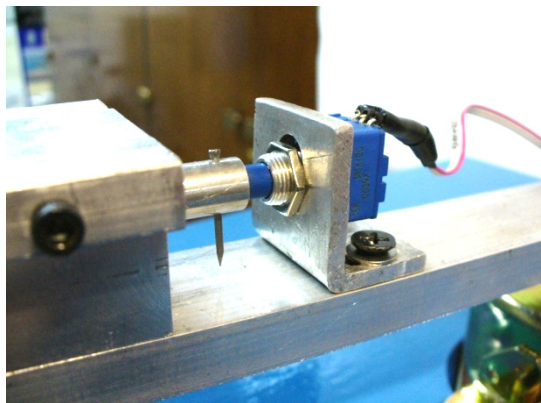


Fig. 8. Acoplamiento entre los ejes de la varilla y sensor ya construido.

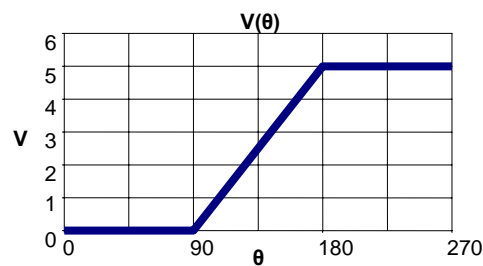


Fig. 9. Tensión de entrada al ADC en función del ángulo de la varilla.

2.2. Diseño electrónico

Se empleó una placa de bajo costo con ocho entradas y dos salidas analógicas de 8 bits de resolución, insertada en una ranura o slot de expansión de una PC, por lo que fue necesario acondicionar la señal de entrada al único ADC utilizado e implementar una interfaz de potencia entre la salida de uno de los DAC y el motor de corriente continua acoplado al brazo horizontal.

El potenciómetro utilizado como sensor es de 10 K Ω con una carrera de 270°. Se estimó apropiado el acondicionamiento de la señal de tal modo que en el tercio medio del recorrido del mismo haya una variación de 0 a 5V y saturación de estos valores si se sale de esta zona. Es decir que la señal en función del ángulo de giro del potenciómetro sea como lo indica la Fig. 9.

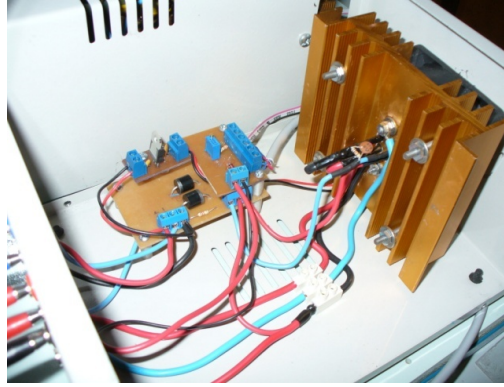


Fig. 10. Interfaz de potencia, entre la salida del DAC y el motor de corriente continua.

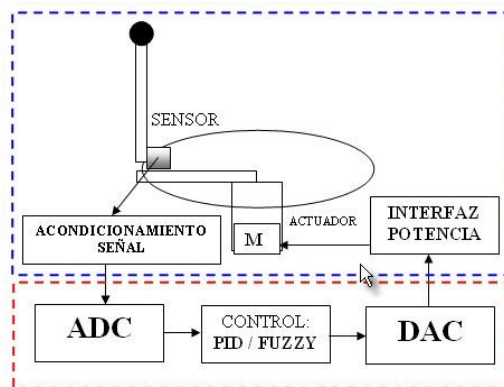


Fig. 11. Detalle del sistema y controlador asociado.

Con lo que se obtuvo una discriminación angular tres veces mayor, ya que sabiendo que el conversor ADC de la tarjeta es de 8 bits, se obtiene una relación angular con la resolución del ADC de $90^\circ/28=0,35^\circ$, de no haberse modificado la señal del potenciómetro, la relación sería $270^\circ/28=1,05^\circ$.

En cuanto a la interfaz de potencia, Fig. 10 y como ya se mencionó, la salida del DAC de la tarjeta en la PC es una señal en tensión comprendida entre 0 y 5V que ingresándola al amplificador operacional de potencia LM12CLK, en su configuración no inversora, se obtiene una salida de alimentación al motor de corriente continua comprendida entre -18,4 a +18,4V, lo que asegura un buen torque en ambos sentidos de rotación.

2.3. Diseño del controlador

La señal de entrada al controlador es el ángulo de inclinación del péndulo respecto de la vertical, mientras que la salida es la cupla ejercida sobre el brazo horizontal. Para el control se usó una PC usando el software Matlab® / Simulink® que corre en tiempo real, haciendo uso de archivos tipo .dll (acrónimo de *dynamic linking library*, esto es, bibliotecas de enlace dinámico) incorporadas como funciones de Matlab® y que posibilitan la interfase con la plaqueta ADC/DAC de bajo costo con el referido software, comprobándose confiabilidad operativa y alto grado de robustez, dichos archivos se desarrollaron en C++ por los autores [5] y se han probado anteriormente sobre otros sistemas con un desempeño similarmente satisfactorio [6].

La Fig. 11 muestra el lazo de control, que así pensado permite la aplicación sobre Simulink® de lazos de control “clásicos” como el solo Proporcional [2] o un recurso de control basado en Inteligencia Artificial [10], como es la lógica difusa pudiendo así, los alumnos comparar ambas prestaciones.

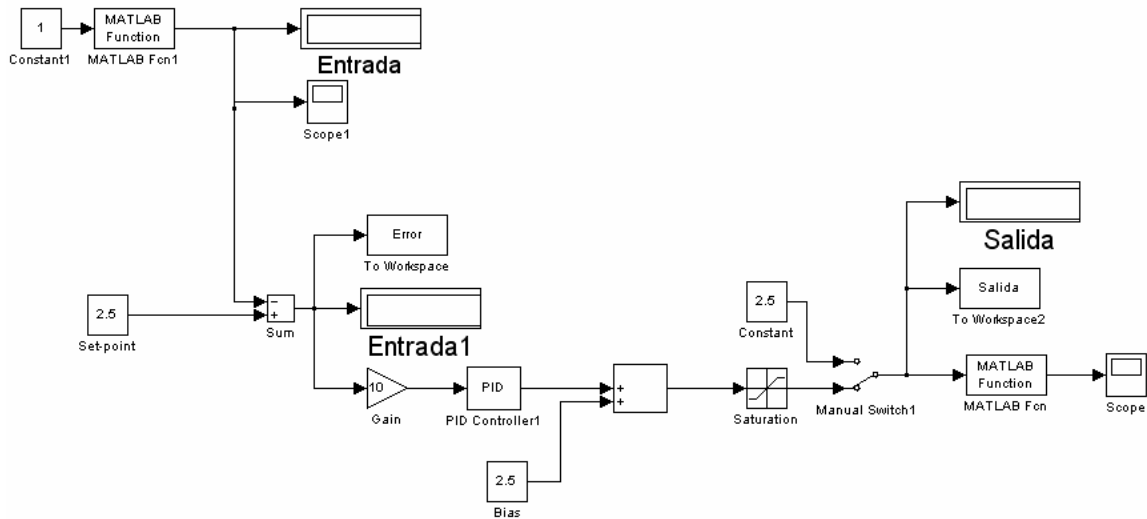


Fig. 12. Controlador sólo proporcional.

La idea, válida para los dos controladores, es plantearse, instante a instante que debe hacer el sistema de control cuando el error (tomado como la diferencia entre el valor deseado (verticalidad) y el ángulo real de la varilla) y en función del mismo como incidir en la alimentación del motor para que gire en el sentido correcto y con la cupla adecuada. El rango de la entrada es de 0 a +5,00 voltios, por lo que el valor deseado corresponde a +2,50 voltios, valor al cual la variable controlada deberá ajustarse lo más cercanamente posible pese a los disturbios.

2.3.1 Controlador proporcional

La Fig. 12 corresponde al diagrama de este tipo de controlador, que incluye el bloque *PID Controller* de SIMULINK que posee los tres términos (proporcional, integral y derivativo) de un controlador PID clásico, no obstante aquí se seleccionó sólo la acción Proporcional.

Para tener un registro de datos, se emplean osciloscopios y displays virtuales, tanto a la entrada como a la salida. Mediante los bloques *simout* se guardan, en vectores, los datos para explorarlos posteriormente.

La Fig. 13 muestra una corrida en tiempo real, mostrando en ordenadas el error, esto es la diferencia entre el valor deseado y la posición del péndulo, notar que oscila alrededor del cero, las oscilaciones intermedias se deben a perturbaciones tipo impulso, introducidas ex profeso, tocando la varilla con el dedo durante un instante.

Al final de gráfico, dando fin a la corrida y ya sin control, la varilla se va hacia un costado. Situación similar se observará con el controlador difuso.

2.3.2 Controlador difuso

Para el controlador difuso, se empleó la Toolbox específica del paquete Matlab® / Simulink®, [8], que exigió en primer término un planteamiento verbal en términos difusos sobre lo que se debería hacer cada vez que la varilla perdía la verticalidad, generando así los términos lingüísticos asociados a las variables de entrada / salida, grados de pertenencias (o de membresía) y las reglas de inferencias que el control difuso requiere para su implementación, [4]. No se abundará aquí sobre la teoría que da base a la lógica difusa, que por otra parte está ampliamente difundida, pero sí se recalcará que es otro interesante recurso y una alternativa más en el empleo de controladores de procesos, equipos y sistemas electromecánicos como el presente. Una innovación interesante es la inclusión de un lazo de realimentación sobre el controlador difuso, esto es, tomar la salida como una segunda entrada al controlador, con un retraso de un ciclo, la Fig. 14 muestra el modelo realizado en Simulink®.

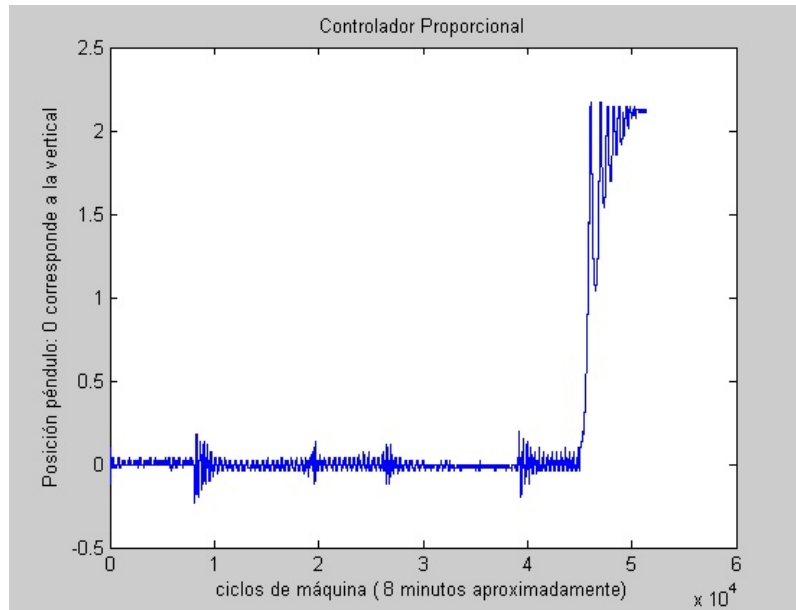


Fig. 13. Corrida en tiempo real con controlador sólo Proporcional.

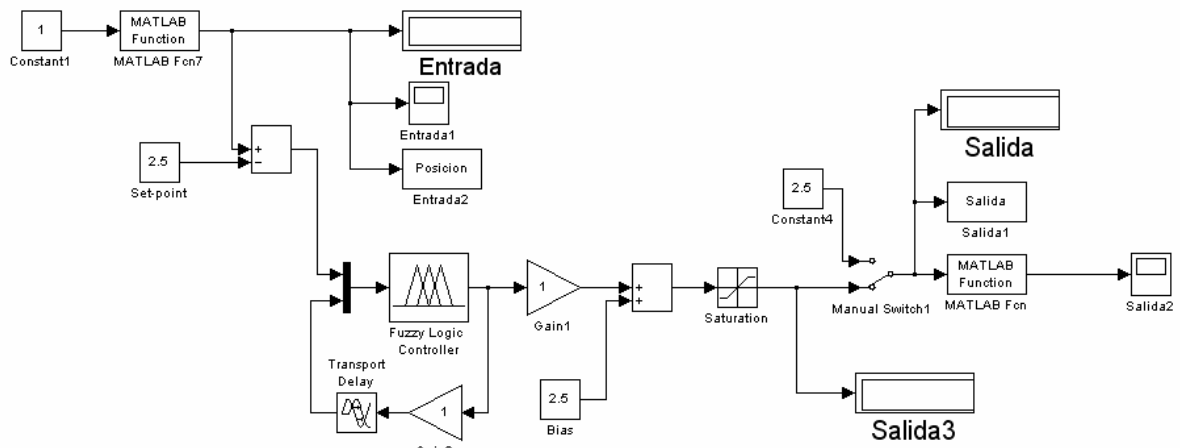


Fig. 14. Controlador difuso.

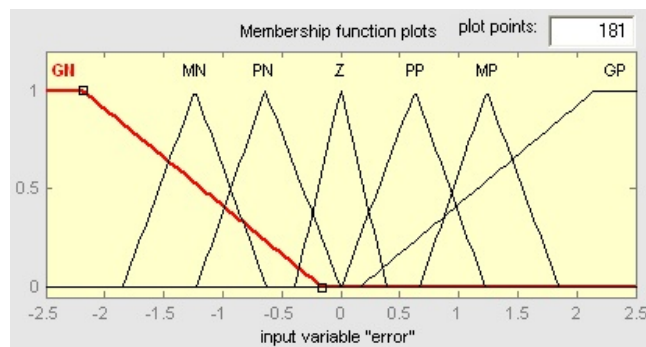


Fig. 15. Variable "error".

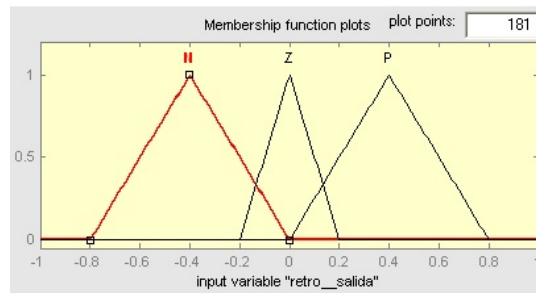


Fig. 16. Variable "retro_salida".

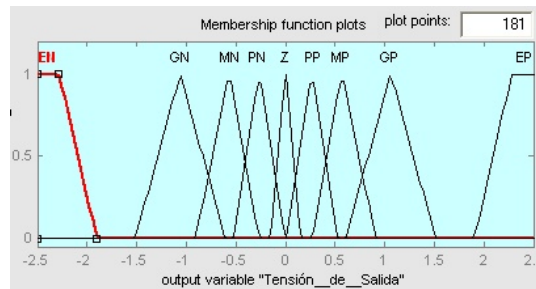


Fig. 17. Variable "Tensión de Salida".

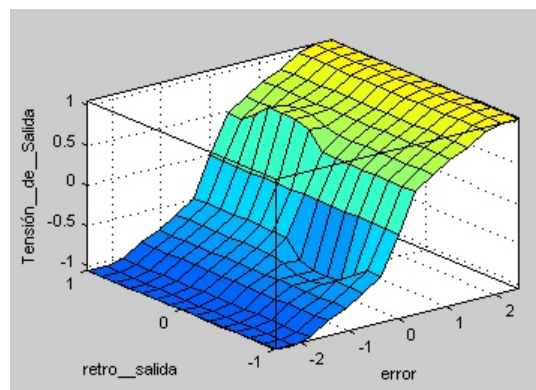


Fig. 18. Relación en 3D de entradas/salida.

El controlador difuso fue creado a través del editor FIS (*Fuzzy Inference Systems*) que dispone Matlab®, a continuación, en la Fig. 15 se destaca la variable error, sus variables lingüísticas y grados de pertenencias, así tenemos que el error puede ser cero, pequeño positivo o pequeño negativo, muy positivo y muy negativo o gran positivo y gran negativo, en forma similar con la entrada realimentada y retrasada (*retro_salida*), aquí puede ser cero, positiva o negativa, como se aprecia en la Fig. 16 y similarmente la Fig. 17 hace lo propio con la tensión de salida, donde puede ser cero, pequeña positiva y pequeña negativa, muy positiva y muy negativa, gran positiva y gran negativa y excesivamente positiva y negativa. La Fig. 18 grafica en 3D, las relaciones de las entradas con las salida, esta última se puede rotar para ver con más detalle las relaciones entre las variables.

Para finalizar, la Fig. 19 muestra una corrida en tiempo real de 2 minutos aproximadamente con el controlador difuso, en esta oportunidad, en ordenadas está en valor deseado (+2,5 voltios representa la verticalidad) y en torno a él, la variable controlada.

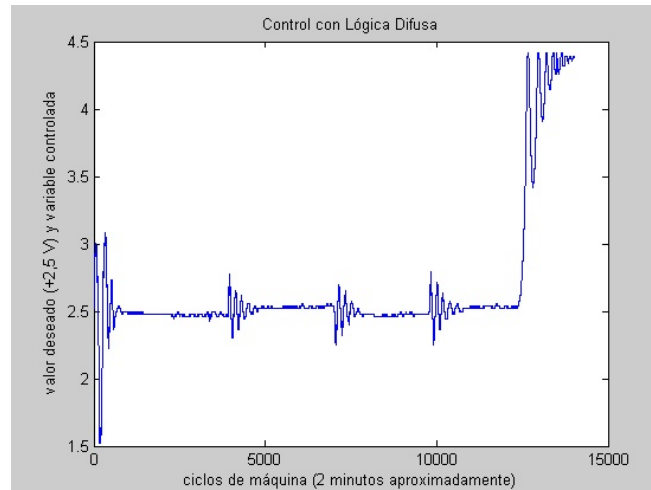


Fig. 19. Corrida en tiempo real del controlador difuso, la verticalidad exacta corresponde a 2,5 voltios.

3. CONCLUSIONES

3.1. Respecto de los controladores

Las Figuras 13 y 19 muestran las gráficas del sistema controlado por ambas acciones, en ambos casos las oscilaciones mayores son debidas al inicio y a las producidas por las perturbaciones tipo impulso ya mencionadas con el fin de observar la reacción del sistema, que mantiene la verticalidad pese a ellas.

En general se observa que ambos controladores neutralizan las perturbaciones, el péndulo queda en oscilación permanente alrededor del punto de equilibrio deseado, lo que es normal.

La posibilidad de utilizar el software Matlab® Simulink® en tiempo real fue de gran ventaja, dado que se pudieron desarrollar y modificar los controladores ensayados en forma sencilla. Además permitió para el caso del controlador difuso, almacenar los datos obtenidos para el posterior análisis y ajuste de las variables lingüísticas y las reglas de inferencia, tarea laboriosa debido a los múltiples ensayos y la experiencia que se necesita para configurar un controlador de este tipo.

Comparando el desempeño del controlador tipo proporcional, se concluyó que el controlador difuso, al tener una respuesta no lineal apropiada, absorbe mejor las oscilaciones del péndulo, también se alcanza un mayor ángulo de control con él.

Entre las limitaciones de adquisición del valor del ángulo, se encontró que el sensor tiene una fricción interna que altera levemente el comportamiento del péndulo. Para solucionar este problema y ya en el campo de las mejoras, habría que utilizar un sensor en el que la medición no implique el contacto de las piezas, como un encoder o un sensor magnético.

3.2. Conclusiones generales

En este trabajo, como en los anteriores, el par de alumnos afectados a este PFE, han tenido que trabajar en estrecha relación con sus tutores, desarrollándose un espíritu de equipo [1], para sortear las dificultades encontradas en las distintas etapas, desde el diseño, mecanizado y armado del conjunto, la electrónica de acondicionamiento y de interfaz con el motor de corriente continua, además de la fuente de alimentación y el desarrollo de los controladores. En realidad, disponiendo del equipo y el entorno provisto por Matlab® Simulink® corriendo en tiempo real, permitirá ensayar muy variados sistemas de control, por ejemplo un controlador neuro-fuzzy [9], o de otro tipo que se puedan obtener a partir de la combinación adecuada de las diferentes "toolboxes" que el software mencionado dispone.

Este equipo queda a disposición de los alumnos de la carrera, como los ya realizados en los PFE previos [7].

Finalmente deseamos felicitar y agradecer a los alumnos Ernesto Benjamín Paz y Jorge Pablo Solanes, ya noveles ingenieros, por participar en este Proyecto con dedicación y esmero y cuyo trabajo nos alienta a continuar en este “enseñar y aprender haciendo” que son los PFE.

REFERENCIAS

- [1] Brandt, D., Imamichi, C., McGregor, H., Moses, I., “Integrating Technical and Non-technical Issues in Control Education”, *Control Eng. Practice*, **4**(5), 655-662 (1996)
- [2] Franklin, G.F., Powell, J.D., Emani-Naeini, A., *Feedback Control of Dynamics Systems*, Third Edition, Addison-Wesley (1995)
- [3] Goodwin, G.C., Graebe, S.F., Salgado, M., *Control System Design*, Prentice-Hall, New Jersey (2001)
- [4] Kosko, B., *Fuzzy Engineering*, Prentice Hall, New Jersey (1997)
- [5] Puglesi, A.E., *Diseño, Construcción y Control en Tiempo Real mediante Simulink de Planta Didáctica Multivariable*, Editorial Ex-Libris (2004)
- [6] Puglesi, A.E., Bernasconi, M.S., “Planta Piloto Multivariable para la enseñanza del Control Automático de Procesos en la Facultad de Ingeniería”, *V CAEDI*, **II**, 961-968 (2006)
- [7] Puglesi, A.E., Bernasconi, M.S., “Control difuso en tiempo real sobre planta didáctica Motor-Generador”, *Anales de la XII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control (RPIC)*, 134-138 (2007)
- [8] The MathWork Co., *Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide version 2*, Natick (2002)
- [9] Von Altrock, C., *Fuzzy Logic & NeuroFuzzy Applications Explained*, Prentice Hall, New Jersey (1996)
- [10] Yager, R., Filev, D., *Essentials of fuzzy modeling and control*, John Wiley & Sons (1994)

FINAL PROJECT STUDIES, AN ACADEMIC EXPERIENCE

Abstract – Inserted in the issue of innovations, experiences and research into applied technologies, this paper describes the realization of the Final Project Studies (PFE) by students of the Mechatronics Engineering in the Faculty of Engineering of the Universidad Nacional de Cuyo and at under the agreement that it has with the de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest (France), by which two students attend each year to study the last two years of that career, returning to develop the PFE and PPS then in Argentina, after which title graduate is recognized for both educational institutions and their respective countries. The PFE was conducted from August 15 to December 15 each year and should total at least 600 hours under the supervision, guidance and supervision of the authors of this paper. In conclusion, over more than three years since its inception, has demonstrated that PFE is perceived as a clear and powerful teaching strategy in order that meet the objectives proposed in relation to the contents organized and sequenced by the curriculum. It has proved a particular way of teaching and learning which postulates didactic pedagogical model and within a specific set of guidelines designed to ensure that model in practice institutional education.

Keywords – Innovation, Education, Control, Artificial intelligence.