

EQUIPO DIDÁCTICO DÉDALO¹: EXPERIENCIA DE APLICACIÓN

Departamento de Electrónica², Universidad de Alcalá. Campus Universitario s/n. 28871. Alcalá de Henares (MADRID).

Tel. 34 1 8854810, Fax: 34 1 8854899-04. E-mail: mazo@depeca.alcala.es

RESUMEN

En esta comunicación se presentan los resultados de la experiencia docente de la utilización del equipo didáctico DÉDALO en la enseñanza de los diferentes sistemas que, de forma general, configuran el control de motores DC, con y sin escobillas, y paso-paso. Los resultados de esta experiencia a nivel de estudios de ingeniería y cursos de postgrado han puesto de manifiesto las grandes ventajas que supone utilizar equipos con las características del DÉDALO para la comprensión del funcionamiento de las diferentes etapas y aspectos que intervienen en el control de motores. Sin duda, la concepción de este equipo permite aventurar resultados similares de su utilización en otros niveles de enseñanza.

1. INTRODUCCIÓN

En el último congreso TAEE, celebrado en Sevilla en Septiembre de 1996, se realizó la presentación, por el mismo grupo de autores, del equipo didáctico DÉDALO, del cual se disponía en aquellos momentos de un solo prototipo. Durante el curso siguiente se acometió el desarrollo de 20 unidades completas del mismo y desde entonces se ha venido utilizando, tanto en cursos específicos de postgrado como en la enseñanza reglada de cursos de ingenierías de segundo ciclo.

El objeto de este entrenador es facilitar la tarea docente en el campo del control electrónico digital, presentando en un mismo entorno la posibilidad de ensayar con diversos tipos de motores y, dentro de cada uno de ellos, con diferentes métodos de control y/o excitación.

El equipo se compone de cinco módulos hardware (tarjetas) [1] [2], según el diagrama de bloques de la figura 1: una para cada tipo de motor (cuatro en total) y otra que se encarga del control y excitación

¹ DÉDALO es el acrónimo de "Desarrollo de Equipos Didácticos de Asistencia en Laboratorio"

² Este proyecto ha sido desarrollado por un grupo de profesores, dirigidos por Manuel Mazo, formado por: J. Jesús García, Jesús Ureña, Fco. Javier Rodríguez, José L. Lázaro, Felipe Espinosa, Ricardo García, Pedro Revenga, J. Carlos García, Enrique Santiso, Raúl Mateos, Emilio Bueno y Álvaro Hernández.

de las anteriores, de la adquisición de datos y de la interfaz con un PC. Se ha desarrollado también un software altamente didáctico y de fácil manejo que permite desde un PC y bajo un entorno Windows realizar funciones tales como: seleccionar el tipo de motor con el que se desean realizar ensayos; configurar los diferentes modos de control; generar consignas; representar en pantalla diagramas de bloques y las señales de mayor interés dentro de cada uno de los circuitos utilizados en los distintos modos de control; etc.

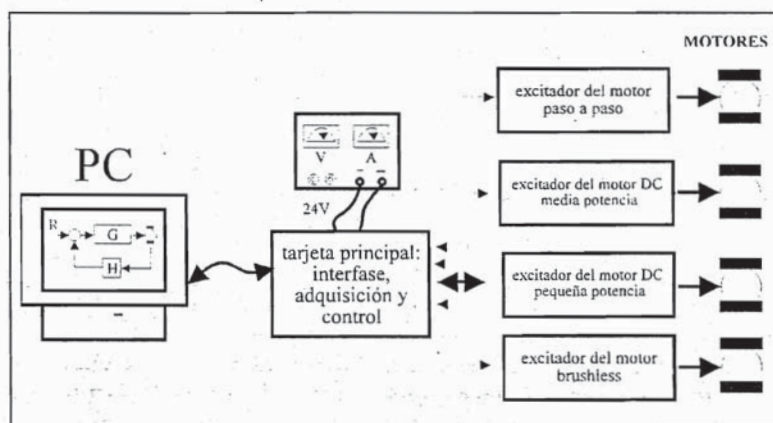


Figura 1.- Diagrama de bloques general del entrenador.

Una característica común a todas las tarjetas, con el fin de facilitar el aprendizaje, es la incorporación de numerosos puntos de test. De esta manera se permite visualizar en un osciloscopio las magnitudes que aparecen en los puntos más significativos de los circuitos que forman el sistema de control. Algunas de estas señales se pueden visualizar también en la pantalla del ordenador.

2. ASPECTOS PRÁCTICOS QUE SE PUEDEN ABORDAR CON EL EQUIPO DÉDALO

Sin duda son muchos los aspectos prácticos que intervienen en el control de motores que pueden ser ensayados utilizando el entrenador DÉDALO. Así se pueden abordar aspectos relacionados con los drivers, modos de excitación de éstos, diferentes estructuras de control (comportamientos en lazo cerrado y abierto, controles en modo tensión y corriente), efectos de los diferentes parámetros del lazo de control, controles en velocidad y posición, circuitos de protección, identificación de la dinámica de motores, características de las señales más importantes, etc. Dentro de este amplio abanico de posibilidades, en la experiencia docente que se ha llevado a cabo se han desarrollado una serie de prácticas suficientemente significativas para dar una idea bastante real de las posibilidades, ventajas e inconvenientes que supone la utilización de un equipo de estas características.

Las prácticas que se han desarrollado con el entrenador, en distintos laboratorios, y que dan una idea de las posibilidades [3] del mismo, han sido:

- 1.- Manejo del software de interfaz
- 2.- Programación de los controladores HCTL1100 y LM628
- 3.- Medida de la velocidad y posición de un motor
- 4.- Interfaz lineal de tensión para excitación de un motor DC
- 5.- Interfaz lineal de corriente para excitación de un motor DC
- 6.- Servocontrol en corriente para excitación de un motor DC
- 7.- Puente en H para excitación de un motor DC
- 8.- Control digital de velocidad en lazo cerrado de motores DC
- 9.- Control en modo tensión de motores "brushless"
- 10.- Control en modo corriente de motores "brushless"
- 11.- Control de velocidad de motores paso a paso
- 12.- Control de posición de motores paso a paso
- 13.- Control de motores paso a paso en micropaso
- 14.- Identificación de planta en motores DC y "brushless"
- 15.- Motores DC de media potencia: limitación de corriente.

Con el equipo reseñado, todas estas prácticas se han podido llevar a cabo de manera cómoda, disponiendo el alumno del PC como interfaz para realizar las modificaciones pertinentes, a la vez que se visualiza información del estado de los motores (corriente y tensión en los devanados, velocidad de giro, etc.). Por otro lado, el manejo del osciloscopio sobre la propia tarjeta (en los puntos de test al efecto) permite un mejor estudio de los aspectos relativos al "hardware".

3. EXPERIENCIAS DOCENTES CON EL EQUIPO DÉDALO Y RESULTADOS DE LAS MISMAS

Este sistema se viene utilizando, desde la finalización de su desarrollo, por el Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, en el laboratorio de la asignatura "Control Electrónico Digital" de la titulación Ingeniería en Electrónica y en el curso de postgrado: "Identificación, diseño e implementación de sistemas electrónicos para el control de motores", en el que se utilizó de manera intensiva este equipo. Por otro lado, fruto de un convenio de colaboración con el Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad de Oriente (Santiago de Cuba), también en ese Departamento se ha comenzado a emplear un prototipo de este equipo didáctico con alumnos de 4º año de Ingeniería Eléctrica (asignatura Electrónica de Potencia). En lo que sigue se van a realizar algunos comentarios sobre los resultados de esta experiencia en cada uno de los casos.

Asignatura optativa "Control Electrónico Digital" del plan de estudios de Ingeniero Electrónico

Dentro de la asignatura optativa "Control Electrónico Digital" (6 créditos teóricos y 4,5 créditos prácticos) del plan de Estudios de Ingeniero Electrónico, una parte de los objetivos es la adquisición de conocimientos teóricos y prácticos sobre control en tiempo discreto, tanto desde el punto de vista entrada-salida como en el espacio de estados, y dispositivos específicos comerciales para control de movimiento.

Las prácticas de laboratorio se llevan a cabo paralelamente a las clases teóricas, con el desfase suficiente para evitar repeticiones de conceptos y optimizar el rendimiento del tiempo dedicado a trabajar con los equipos e instrumentación. Entre los objetivos propuestos para la formación práctica del alumno en esta asignatura, a cuya consecución contribuye el equipo DÉDALO, cabe destacar:

- a) Modelado en tiempo discreto e identificación de plantas continuas cuyo comportamiento se puede linealizar en un amplio rango de su zona de trabajo. A este grupo pertenecen el sistema de accionamiento de ruedas activas de muchos de los vehículos autónomos, tanto en el campo industrial como en el de investigación. Sistema de accionamiento basado en motores de continua (con y sin escobillas) junto al correspondiente encoder óptico incremental y reductora, además de la etapa de potencia o de excitación electrónica del motor.
- b) Diseño de controladores de posición y/o velocidad, a partir de circuitos específicos comerciales para control de motores. En una primera fase se analiza y modela el filtro digital con función de controlador y se ajustan sus parámetros de acuerdo con las especificaciones fijadas por el diseñador (tiempo de respuesta, perfiles de velocidad y/o posición, etc.). En una segunda fase se estudian efectos secundarios como: periodo de muestreo, resolución de los registros de variables internas y parámetros del controlador, número de pulsos por vuelta del encoder, etc. Para ello se dispone de la herramienta de diseño de sistemas de control asistida por ordenador integrada en el entorno Matlab/Simulink.
- c) Ensayo de control de velocidad y/o posición de motores con circuitos integrados específicos. Para ello se cuenta con el entrenador DÉDALO que permite al alumno la programación de consignas y trayectorias de movimiento (posición, velocidad, aceleración), por otra la programación (a nivel de variables absolutas - por ejemplo velocidad en revoluciones por minuto- y de registros internos del controlador - por ejemplo el HCTL1100 cuenta con 64 registros de 8 bits-) de los parámetros del controlador, y, por último, realizar un balance crítico del grado de concordancia entre la previsión de la etapa de diseño y simulación y la etapa de control real de la planta bajo estudio.

Desarrollo de las prácticas con el equipo DÉDALO y resultados: El equipo DÉDALO, concretamente su tarjeta principal y las específicas de motores DC con y sin escobillas, junto a su interfaz software, permite desarrollar en torno a tres cuartas partes de los créditos prácticos de la asignatura de Control Electrónico Digital.

La configuración del equipo, especialmente pensado para el ámbito docente, facilita la ejecución real de tareas típicas en control digital, desde el registro en lazo abierto para la identificación del conjunto *driver-motor-tacómetro* hasta el control de movimiento de acuerdo a unos perfiles de posición, velocidad y aceleración predefinidos. De modo que ofrece la posibilidad de formar al futuro ingeniero en control electrónico en tareas propias del diseñador que conoce los efectos y aplicaciones de los diferentes registros del circuito específico que actúa como controlador del eje de un motor, así como las características de las interfaces: *controlador-host*, *controlador-driver* y *controlador-encoder*.

Las prácticas en laboratorio están pensadas para incrementar progresivamente el grado de implicación del alumno en los ensayos a realizar. Se parte de unas clases, más bien guiadas por el profesor, donde se agiliza el aprendizaje de las componentes hardware y software del DÉDALO y del modelado de los controladores LM628 y HCTL1100 con herramientas de diseño asistido por ordenador (Matlab/Simulink). Se finaliza con el diseño del control de movimiento del eje de un motor, de acuerdo

a unas especificaciones fijadas por el profesor, para cada grupo de alumnos. Éstos han de justificar: el tipo de motor elegido, el periodo de muestreo, el tipo de controlador digital, y los posibles desajustes entre los resultados simulados y experimentales.

Además el alumno ha de resolver unas cuestiones complementarias sobre limitaciones del dispositivo de control utilizado, precisión de las variables de movimiento y de los parámetros de control, y modificaciones para trasladar su experiencia en laboratorio con el equipo DÉDALO a una aplicación real como el control de tracción y/o dirección de un vehículo autónomo.

Resultados y conclusiones: Los resultados de la utilización del entrenador DÉDALO como herramienta del laboratorio de Control Electrónico Digital han sido claramente satisfactorios por las siguientes razones:

- 1) El alumno cuenta con un prototipo real para ensayos de control digital de motores, con todos sus elementos: motor, encoder, tacómetro digital, circuitos comerciales específicos para control de movimiento asociado a un microcontrolador (host), encargado de realizar tareas que no son las del control del motor, y etapa de excitación electrónica del mismo.
- 2) El equipo permite evaluar aspectos fundamentales de control digital como el efecto del periodo de muestreo en la estabilidad absoluta y relativa del sistema en lazo cerrado, la influencia de ganancia, ceros y polos del controlador en la respuesta del sistema realimentado, o la relación entre variables absolutas de movimiento y la información digitalizada que contienen los correspondientes registros del circuito integrado que actúa de generador de consignas intermedias (actualizadas cada periodo de muestreo) y de controlador.
- 3) El desarrollo de la asignatura con este sistema contribuye a la formación del alumno en materias de teoría de control y la electrónica asociada a estos sistemas, exigiéndole una implicación creciente en los ensayos realizados.
- 4) El alumno aprende a elegir qué utilidades, tarjetas e incluso circuitos concretos de todo el conjunto que forma el equipo didáctico DÉDALO, le resolverían un problema concreto de control de actuadores de movimiento basados en motores de continua.

En definitiva, este entrenador, además de cubrir una amplia parte del programa de laboratorio de la asignatura, consigue la conjunción directa de aspectos teóricos y prácticos, y establece una relación inmediata entre problemas reales de control y las soluciones electrónicas disponibles en el mercado.

Curso de postgrado "Identificación, diseño e implementación de sistemas electrónicos para el control de motores"

Este curso, de 200 horas de duración, incluía como una parte de sus objetivos el estudio y experimentación sobre control de motores DC, con y sin escobillas, y motores paso-paso. Las conclusiones que se han obtenido de la utilización del equipo DÉDALO son similares a las enumeradas en el párrafo anterior, si bien en este caso se puede hacer una valoración más objetiva ya que se realizó una encuesta entre los alumnos en la que se incluían preguntas directamente relacionadas con el desarrollo de las prácticas y su opinión sobre el equipo DÉDALO en diferentes aspectos. El resultado

de dicha encuesta. en relación con el material empleado para las prácticas fue 4,36 puntos en una escala de 1 a 5 (desviación típica 0,67).

Electrónica de Potencia (Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad de Oriente)

Dentro del Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad de Oriente también se ha comenzado a emplear este equipo didáctico con alumnos de 4º año de Ingeniería Eléctrica en la asignatura de Electrónica de Potencia. En relación con esta experiencia, tanto profesores como alumnos han manifestado su alto grado de satisfacción en la utilización de este equipo. Es de destacar la alta valoración que han merecido las prestaciones que ofrece el equipo en lo referente a su fácil manejo y a la posibilidad de abordar diferentes niveles de aprendizaje.

5. CONCLUSIONES

Las experiencias de utilización del equipo DÉDALO ponen de manifiesto un alto grado de satisfacción en su contribución, no sólo a facilitar el aprendizaje, sino también a ampliar y profundizar en los temas teóricos y prácticos de control de motores. Los usuarios de este equipo han valorado muy positivamente las características altamente didácticas, niveles de conocimientos, facilidad de manejo, integración de software y hardware, y manejo de circuitos actuales y ampliamente utilizados en la industria. A partir de los resultados de la experiencia a nivel de estudios de ingeniería, creemos que los resultados en otros niveles más bajos de la enseñanza serían muy similares, si no superiores, ya que el grado de profundidad que se puede alcanzar con este equipo está en función de las demandas de los usuarios. Con este equipo se pueden hacer prácticas que van desde aspectos muy generales y básicos sobre control de motores hasta otras en las que se aborden temas mucho más específicos y que requieran un estudio más profundo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Manuel Mazo, Jesus Ureña, Fco. Javier Rodríguez, J. J. García, José L. Lázaro, E. Santiso, Felipe Espinosa, R. García, P. Revenga, Juan Carlos García, E. Bueno and R. Mateos. "Teaching Equipment for Training in the Control of DC, Brushless, and Stepper Servomotors". *IEEE Transactions on Education*, Vol 41, nº 2, pp 146-158, May 1998.
- [2] M. Mazo, J. Ureña, F. J. Rodríguez, J. J. García, J. L. Lázaro, E. Santiso, F. Espinosa, R. García, P. Revenga, J.C. García, R. Mateos y E. Bueno. "Equipo Didáctico para el Control de Motores DC, Brushless y Paso-paso". *TAAE'96*, Vol II, pp 183-197. Sevilla 1996.
- [3] M. Mazo, J.J. García, J. Ureña, F. Espinosa, F.J. Rodríguez, J. L. Lázaro, J.C. García, R. García, E. Bueno, P. Revenga, E. Santiso, R. Mateos. "Control de Motores paso-paso, DC con escobillas y Brushless". *Ed. Servicio de publicaciones de la Universidad de Alcalá*. ISBN:84-8138-217-5.