

EQUIPO DE BAJO COSTE PARA LA DOCENCIA PRÁCTICA DE BUCLES DE CONTROL EN ENTORNOS INDUSTRIALES

SEBASTIÁN GARCÍA

Universidad de Sevilla, España

ANTONIO PAREJO

Universidad de Sevilla, España

1. INTRODUCCIÓN

En la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Sevilla se imparten distintos títulos de Grado en Ingeniería en los que las asignaturas “Automatización Industrial” y “Regulación Automática” son comunes a todas ellas.

Estas asignaturas comparten un marco común que, a veces, no es percibido por los estudiantes. Sin embargo, los dispositivos lógicos programables o PLCs por sus siglas en inglés (*programmable logic controllers*), los cuales son la base actual de la automatización industrial, son ampliamente usados en tareas de regulación de bucles de control en la industria (Valencia-Palomo & Rossiter, 2011). Tradicionalmente, los bucles de control han sido implementados usando dispositivos discretos. No obstante, con la proliferación de los PLCs, estos se han convertido en el estándar de facto gracias al menor coste de estos y el amplio soporte de los fabricantes a través de librerías y documentación (Alphonsus & Abdullah, 2016). Dada esta situación, es importante remarcar a los estudiantes la relación entre las dos citadas asignaturas: Automatización Industrial y Regulación Automática. Además, la implementación de bucles de control en dispositivos digitales como los PLCs tiene ciertas implicaciones y consideraciones que deben ser tenidas en cuenta para garantizar la correcta operación y estabilidad de los bucles de control.

Además, a veces a los alumnos les cuesta asimilar los conceptos teóricos de estas asignaturas. En estas situaciones, las sesiones de laboratorio en las que los alumnos aplican esos conceptos que se enseñan en las lecciones teóricas han probado ser una forma muy útil para que los alumnos terminen de adquirir y afianzar esos conceptos más fácilmente (Feisel & Rosa, 2005). Además, las sesiones prácticas les ayudan a adquirir capacidades como el trabajo en equipo o la habilidad para seguir instrucciones complejas (Edward, 2012).

En este sentido, en el ámbito de las citadas asignaturas, existe una importante carencia de equipamiento docente para el ajuste de bucles de control usando PLCs. Los entrenadores disponibles en el mercado son caros y voluminosos, por lo que se hace muy complicado el disponer de un equipo por puesto y alumno en los laboratorios docentes. Además, la gran mayoría de dispositivos suelen estar pensados para su uso con PCs (computadores personales, del inglés *personal computers*), no siendo posible su uso con PLCs.

Si bien es cierto que se dispone de varios equipos actualmente en el laboratorio, estos son únicamente usados a modo de demostradores, siendo imposible la realización de prácticas individuales (dada su voluminosidad y alto coste). Debido a esto, actualmente no se dispone de plataformas que permitan la realización de prácticas de bucles de control usando PLCs.

Para suplir la falta de estos equipos, actualmente se están usando simuladores software. Aunque los simuladores son de gran utilidad, estos son demasiado simples y no emulan correctamente las situaciones reales a las que se pueden encontrar los alumnos en la industria como el ruido, límites de operación, alinealidades, etc. Normalmente estos simuladores no suelen incorporar estos parámetros porque son difícilmente explicables si no se dispone de un equipo real con los que observarlos.

Dada esta situación, muchos docentes optan por el desarrollo de sus propios equipos para las sesiones de laboratorio (Riveros et al., 2016), los cuales suelen resultar más baratos y prácticos que los disponibles en el mercado (Pearce, 2013). Por ello, este trabajo presenta el desarrollo

de un dispositivo en forma de entrenador docente que solvete las carencias expuestas anteriormente.

2. OBJETIVOS

En primer lugar, resulta coherente definir los objetivos y requerimientos del entrenador docente. Con los problemas descritos en el apartado anterior acerca de los dispositivos actualmente existentes en el mercado, el dispositivo debe tener dos requisitos básicos:

- Ha de ser barato. Debe tener un coste de fabricación bajo que permita dotar los laboratorios docentes a un coste razonable.
- Su volumen ha de ser reducido. Un equipo de dimensiones reducidas que permita disponer de un equipo por cada puesto de trabajo en el laboratorio de prácticas
- Debe permitir su uso tanto con PLCs como con PCs.

3. METODOLOGÍA

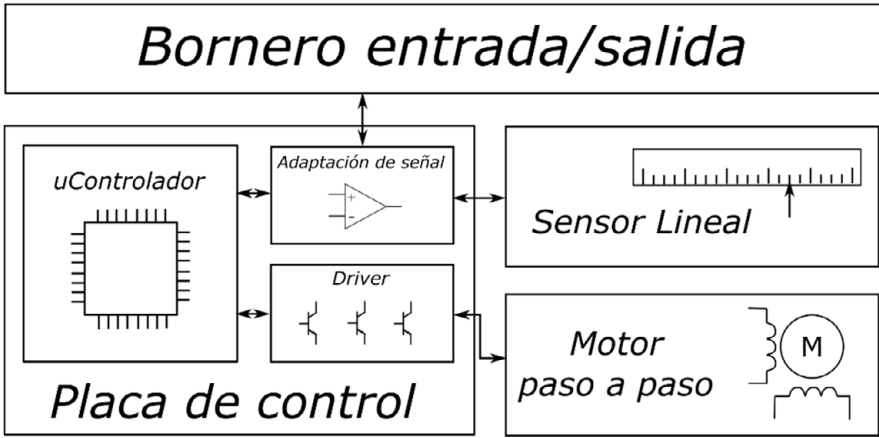
3.1. DESCRIPCIÓN CONCEPTUAL DEL EQUIPO PROPUESTO

Con los requisitos anteriores, se ha diseñado un entrenador docente para bucles de control de velocidad y posición. Todos los componentes usados están basados en materiales comerciales asequibles, lo que permite reducir su coste y facilitar su construcción y reparación.

En la Figura 1 se representa el esquema conceptual del equipo propuesto.

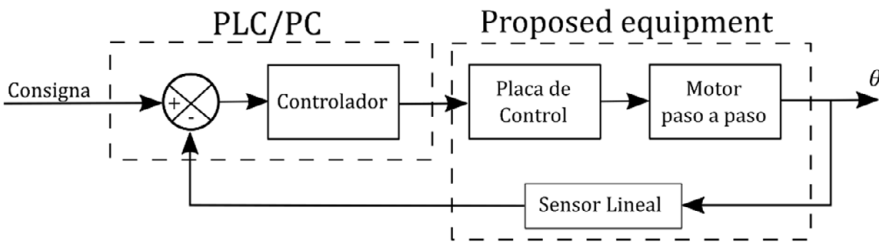
El equipo docente propuesto está concebido para ser usado en la enseñanza de bucles de control de posición y velocidad. Por tanto, el equipo actuaría en ese bucle de control como se muestra en la Figura 2.

FIGURA 1. Esquema conceptual del equipo docente propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2. Bucle de control conceptual usando el equipo propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver, el equipo está basado en tres componentes principales:

- Un motor, que ejerce como el actuador en el bucle de control. El motor está basado en un motor paso a paso, pero emula el comportamiento de un motor de corriente continua (DC).
- Un sensor lineal, que actúa como la realimentación del bucle de control. El sensor lineal está basado en un potenciómetro lineal.

- Una placa de control, que dispone de un microcontrolador, así como la electrónica necesaria para el funcionamiento del equipo.

El movimiento circular del motor se ha de convertir en lineal para permitir tanto el control de posición como el de velocidad. Además, como el actuador está basado en un motor paso a paso, para añadir complejidad y dar un enfoque más realista, el microcontrolador actuará sobre el motor emulando el comportamiento de un motor de DC. Con este esquema, se pueden implementar distintas dinámicas. Esta emulación de comportamiento puede parecer una contradicción con las afirmaciones realizadas sobre el uso de simuladores en la introducción. Sin embargo, se debe aclarar que, aunque se realiza una emulación de comportamiento de un motor de DC, el equipo no pretende simular un motor de DC, sino que pretende presentar un equipo en el que los alumnos vean directamente los efectos de sobre-disparo, errores en régimen permanente, etc. Los cuales no sería posible ver si no se realiza esta emulación.

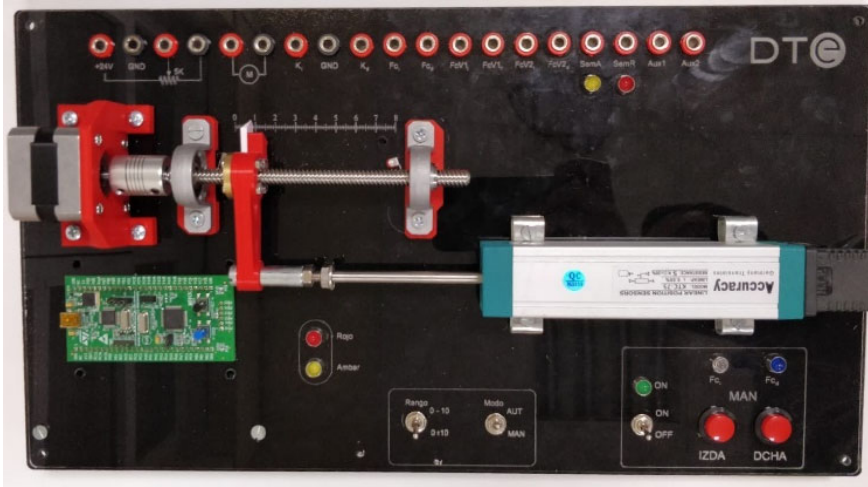
Además de lo anterior, el microcontrolador junto con la electrónica dedicada es también responsable de adquirir y adaptar las señales que entran y salen del equipo. El microcontrolador también es responsable de garantizar la seguridad del sistema con independencia de posibles ordenes extrañas que pudiesen usar los alumnos.

Las señales tanto de entrada como de salida están disponibles tanto físicamente en un bornero como digitalmente a través de una interfaz USB. Esto permite que el equipo pueda ser controlado directamente desde un PC o a través de un dispositivo de control externo como un PLC permitiendo su uso con ambos sistemas como era requisito.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE PRÁCTICAS PROPUESTO

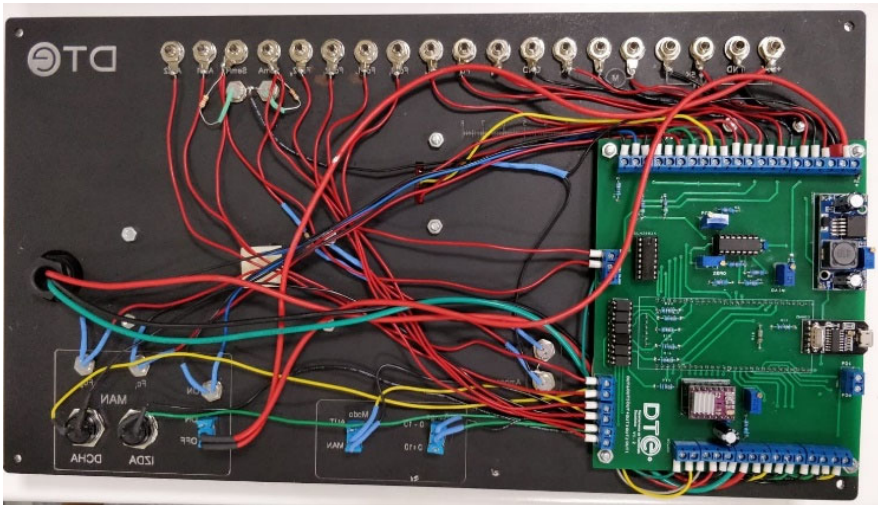
Con los requisitos y con las descripciones conceptuales anteriormente expuestas, se ha fabricado y testado un prototipo. El prototipo se muestra en las Figuras 3 y 4. La Figura 3 muestra el panel de usuario frontal y la Figura 4 muestra la parte trasera donde se encuentra el conexionado y la placa de control.

FIGURA 3. Panel de usuario del equipo docente propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4. Parte trasera con el conexionado y la placa de control del equipo docente propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Descripción del panel de usuario

Como se puede ver en la Figura 3, el equipo docente propuesto tiene tres partes: un bornero de conexiones, el dispositivo bajo control, así como botones, interruptores y señalizaciones para el usuario.

El dispositivo bajo control es un motor paso a paso que puede ser controlado tanto en velocidad como en posición. El motor está acoplado a un tornillo sin fin que se mueve en una dirección u otra dependiendo del sentido de giro del motor. Para confirmar la posición del puntero se ha serigrafiado una regla en el panel de metacrilato. El puntero está acoplado a un potenciómetro lineal el cual actúa como la realimentación del bucle de control.

Los botones e interruptores de usuario permiten la selección entre los modos automático y manual. Además, el usuario puede seleccionar con un interruptor dos rangos distintos de tensión funcionamiento para las entradas y salidas analógicas: 10V o $\pm 10V$.

El panel también tiene disponibles LEDs de indicación para indicar límites de operación o posiciones no seguras.

3.2.2. Señales disponibles en el bornero

Para controlar el dispositivo, todas las señales se encuentran disponibles en el bornero del panel. Este bornero tiene disponible las siguientes señales:

- Alimentación. El equipo debe ser alimentado por una fuente de alimentación externa de 24V.
- Salida del sensor lineal. Valor analógico de salida con la posición del cursor del potenciómetro lineal.
- Consigna del motor. Valor analógico de entrada que controla la tensión de excitación del motor.
- Entradas de control todo/nada. Además de la entrada analógica de consigna, el motor puede ser controlado usando dos entradas binarias todo/nada, una para cada dirección de giro.

- Señales de final de carrera. Los finales de carrera del dispositivo se encuentran disponibles como salidas en el bornero del dispositivo.
- Señales de final de carrera virtuales. En el dispositivo se pueden definir dos finales de carrera virtuales a través de la interfaz USB.
- Entradas/Salidas de expansión. Se han reservado dos entradas/salidas adicionales para futuras ampliaciones/aplicaciones del dispositivo.

El motor puede ser controlado a través de la señal analógica de excitación o a través de las entradas todo/nada. En el modo automático el dispositivo usa la señal analógica y en el modo manual el dispositivo usa las señales todo/nada.

Como se ha mencionado anteriormente, todas las entradas/salidas analógicas son operadas entre 0-10V o $\pm 10V$, esto es para que sean compatibles con equipos industriales (como los PLCs). De la misma forma, las señales digitales también trabajan en rango industrial, en este caso 0-24V.

3.2.3. Descripción de la placa de control

La placa de control dispone de un microcontrolador, una interfaz USB, así como toda la electrónica necesaria para operar el motor y la adquisición y procesamiento de las señales del equipo.

En este sentido, todas las entradas y salidas son convertidas a los rangos industriales: 0-10V o $\pm 10V$ para las señales analógicas y 0-24V para las señales digitales.

Además, el microcontrolador es responsable de implementar la dinámica del sistema. Como se ha dicho anteriormente, el sistema emula el comportamiento de un motor de DC, esto es posible gracias a que el microcontrolador adquiere las señales de actuación procedentes del exterior del equipo y actúa sobre el motor emulando el comportamiento que tendría un motor de DC ante esa señal. Este comportamiento será descrito con más detalle en la sección 4.

Con esta configuración, es fácil implementar distintas dinámicas en el microcontrolador, lo que permite disponer de distintos comportamientos con el mismo equipo de prácticas, evitando copias entre estudiantes en pruebas de evaluación.

Además, las señales inválidas y las situaciones inseguras se pueden evitar gracias al microcontrolador.

Adicionalmente, el microcontrolador gestiona la interfaz USB con la que el equipo de prácticas puede ser controlado también a través de un PC.

Como se ha comentado anteriormente, el dispositivo tiene dos modos de control: modo manual y automático. En modo manual, el motor puede ser posicionado a través de las botoneras disponibles en el panel de usuario o a través de las entradas disponibles en el bornero de conexiones. Este modo de funcionamiento puede ser usado por los alumnos para posicionar el eje en una localización concreta o para implementar controles del tipo todo/nada usando PLCs a través de las señales del bornero. En este sentido, el equipo podría ser usado no solo para implementar bucles de control, sino que también podría ser usado para la enseñanza de programación de PLCs usando modelos del tipo DES (Modelo de Eventos Discretos por sus siglas en inglés). En modo automático, el motor se controla a través de la entrada analógica disponible en el bornero. En este modo de funcionamiento, se pueden implementar bucles de control PID.

3.2.4. Interfaz USB

Gracias a la interfaz USB de que dispone el dispositivo, el entrenador docente es totalmente configurable y controlable a través de PC. Para ello, se ha diseñado una API con un conector a MATLAB.

Las tres funciones básicas de esta API son las siguientes:

- Recibir datos desde el entrenador. El equipo está constantemente actualizando los parámetros que adquiere: posición actual, valores de tensión, etc.

- Enviar datos hacia el entrenador. Las señales disponibles en el bornero de entrada se pueden modificar a través de esta función. De esta forma, el equipo puede ser totalmente controlado a través de la interfaz USB.
- Configurar parámetros. El comportamiento del sistema se puede parametrizar a través de esta función. Esta parte se extenderá más adelante.

3.2.5. Costes

Un factor esencial del diseño del equipo docente era el coste, para intentar obtener un dispositivo asequible que permitiese dotar los laboratorios.

Por ello, se han usado elementos comerciales en su amplia mayoría, lo que facilita la reducción de costes y la reparación del equipo. Incluso la placa de control se ha realizado usando componentes comerciales cuando ha sido posible.

En la Tabla 1 se muestra el coste del prototipo, así como una descripción detallada y el precio de todos los elementos que lo conforman. Es importante remarcar que los precios indicados son para una tirada corta de dispositivos. Fabricando un volumen mayor, los precios serían más económicos.

TABLA 1. Coste de cada uno de los elementos que conforman el equipo docente y del total del mismo.

Part	Notes	Price
Motor paso a paso	Actuador del bucle de control	8.20€
Sensor lineal	Realimentación del bucle de control	25.30€
Placa de control	Contiene toda la electrónica necesaria	40€
Partes mecánicas	Tronillo sin fin, rodamientos, etc.	18.60€
Piezas en 3D	Para ajuste mecánico y soportes	4€
Panel de metacrilato	Para el panel de usuario	11.60€
Montaje	Montaje del equipo por parte de un técnico	50€

Part	Notes	Price
Others	Buttons, LEDs, terminals, cables, etc.	15€
Total		172.7€

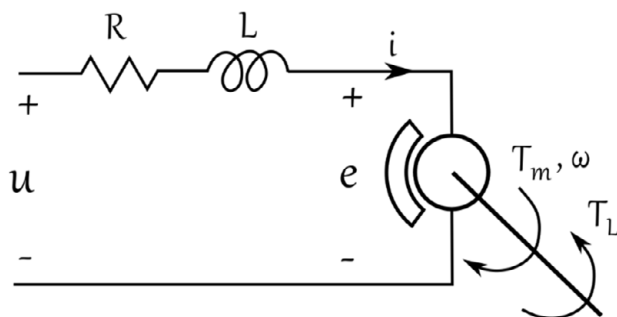
Fuente: elaboración propia

4. MODELADO DINÁMICO DE UN MOTOR DC

El actuador del bucle de control es un motor paso a paso, sin embargo, como se ha dicho anteriormente, se pretende que el sistema sea controlado como un motor de DC.

Por tanto, el microcontrolador debe actuar sobre el motor paso a paso para emular este comportamiento. Para este propósito, el modelo de un motor DC ha de ser conocido. Por tanto, en esta sección se analizará el modelo que será implementado en el microcontrolador para que, visto desde el PLC o el PC, el sistema se comporte como un motor de DC.

FIGURA 5. Modelo de un motor de corriente continua de imanes permanentes.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5 se muestra el modelo de un motor de DC de imanes permanentes donde: U es la tensión en bornes del motor, R y L son la resistencia e inductancia de la armadura respectivamente, e es la fuerza contra electromotriz (FCEM), T_m es el par motor, ω la velocidad en el eje del motor y T_L el par de la carga.

Este modelo puede ser descrito con tres tipos de ecuaciones: eléctricas, electromecánicas y mecánicas.

En primer lugar, las ecuaciones eléctricas se pueden obtener a partir del esquema de la Figura 5:

$$u = i R + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

En segundo lugar, como sabemos, el par motor es directamente proporcional a corriente en la armadura del motor y la FCEM es directamente proporcional a la velocidad en el eje del motor. De esto se obtienen las ecuaciones (2) y (3):

$$T_m = K_T i \quad (2)$$

$$e = K_V \omega \quad (3)$$

Donde K_T es la constante de par y K_V es la constante de velocidad. Si el motor no estuviera basado en imanes permanentes estas no serían constantes ya que la relación entre el par y la corriente dependería del flujo eléctrico, así como la relación entre la FCEM y la velocidad. Pero, en este caso, al ser el flujo constante gracias a los imanes permanentes, la relación entre estas variables es constante.

Finalmente, si consideramos la inercia y la fricción tanto del motor como de la carga, podemos obtener la ecuación mecánica (4).

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = T_m - T_L \quad (4)$$

Donde J es la inercia, B es la fricción y θ es la posición del eje del motor.

Para implementar un control de posición o velocidad, se debe obtener la función de transferencia entre la tensión de entrada y la posición del eje del motor usando las ecuaciones presentadas. Por tanto, en primer lugar, estas ecuaciones se obtienen en el dominio de Laplace:

$$U = IR + LI s + E \quad (5)$$

$$T_m = K_T I \quad (6)$$

$$E = K_V \theta s \quad (7)$$

$$J\theta s^2 + B\theta s = T_m - T_L \quad (8)$$

Operando en (5), para despejar la corriente y sustituyendo en (6), se puede obtener la siguiente ecuación:

$$T_m = K_T \frac{U-E}{R+Ls} \quad (9)$$

Con (9) y (8):

$$J\theta s^2 + B\theta s = K_T \frac{U-E}{R+Ls} - T_L \quad (10)$$

Operando con la ecuación (10) y usando (7):

$$\theta s((Js + B)(R + Ls) + K_V K_T) = K_T U - T_L(R + Ls) \quad (11)$$

Despejando la posición de la ecuación anterior:

$$\theta = \frac{K_T U - T_L(R + Ls)}{s((Js + B)(R + Ls) - K_V K_T)} \quad (12)$$

Como se puede ver, la posición depende de la tensión de entrada y del par de la carga. Aplicando el principio de superposición, la posición se puede descomponer en las funciones de transferencia (14) y (15).

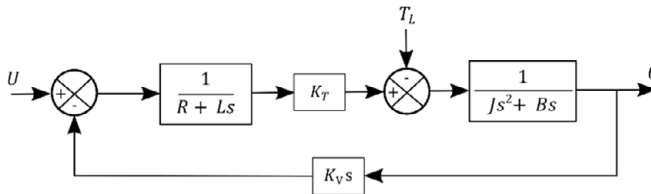
$$\theta = f(U, T_L) \quad (13)$$

$$\frac{\theta}{U} = \frac{K_T}{s((Js + B)(R + Ls) + K_V K_T)} \quad (14)$$

$$\frac{\theta}{T_L} = \frac{-T_L(R + Ls)}{s((Js + B)(R + Ls) + K_V K_T)} \quad (15)$$

Por tanto, el modelo del motor DC se puede expresar como los bloques funcionales representados en la Figura 6.

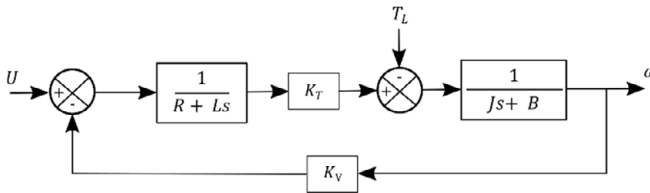
FIGURA 6. Modelo de la función de transferencia en posición de un motor dc.



Fuente: Elaboración propia.

Además, la velocidad se puede derivar de la posición. En el dominio de Laplace, la derivar implica multiplicar por el operador de Laplace. Por tanto, el modelo en velocidad también se puede obtener (Figura 7).

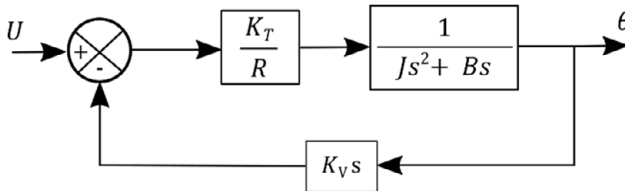
FIGURA 7. Modelo de la función de transferencia en velocidad de un motor dc.



Fuente: Elaboración propia.

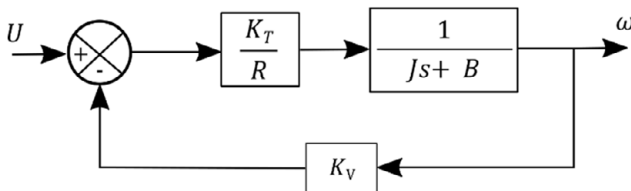
Considerando que el par de la carga es constante para el equipo propuesto y que la inductancia de la armadura es despreciable en la mayoría de los motores DC, estos modelos pueden simplificarse aún más (Figuras 8 y 9).

FIGURA 8. Modelo simplificado de la función de transferencia en velocidad de un motor dc.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 9. Modelo simplificado de la función de transferencia en velocidad de un motor dc.



Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, los modelos en posición y en velocidad de un motor de imanes permanentes son los mostrados en las ecuaciones (16) y (17).

$$\frac{\theta}{U} = \frac{1}{s} \frac{K}{\tau s + 1} \quad (16)$$

$$\frac{\omega}{U} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (17)$$

Donde $\tau = JR/(BR + K_T K_V)$ y $K = K_T/(BR + K_T K_V)$.

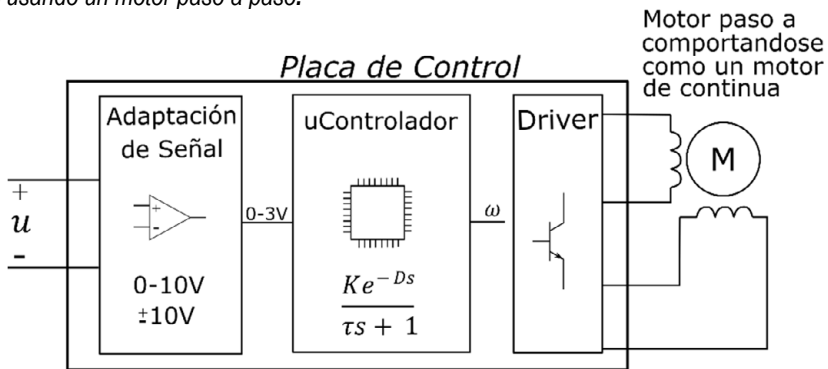
Como se puede apreciar, el modelo de un motor de DC de imanes permanentes es una función de transferencia de primer orden. Teniendo en cuenta que el actuador del equipo docente propuesto es un motor paso a paso, el microcontrolador será el responsable de actuar sobre el motor paso a paso para implementar este modelo.

Además, para dar más realismo al sistema, se le ha añadido un retraso a la implementación del modelo. Por tanto, el modelo final a implementar será el de la ecuación (18).

$$\frac{\omega}{U} = \frac{K e^{-Ds}}{\tau s + 1} \quad (18)$$

Donde D es el retraso del sistema. Por tanto, el sistema bajo control será el mostrado en la Figura 10. Para el usuario todo esto será transparente y el sistema se comportará de igual forma que un motor DC de imanes permanentes.

FIGURA 10. Modelo de bloques con la implementación de comportamiento de un motor de dc usando un motor paso a paso.



Fuente: Elaboración propia.

Este esquema de funcionamiento trae una importante característica al equipo docente: permite que el dispositivo no siempre se comporte

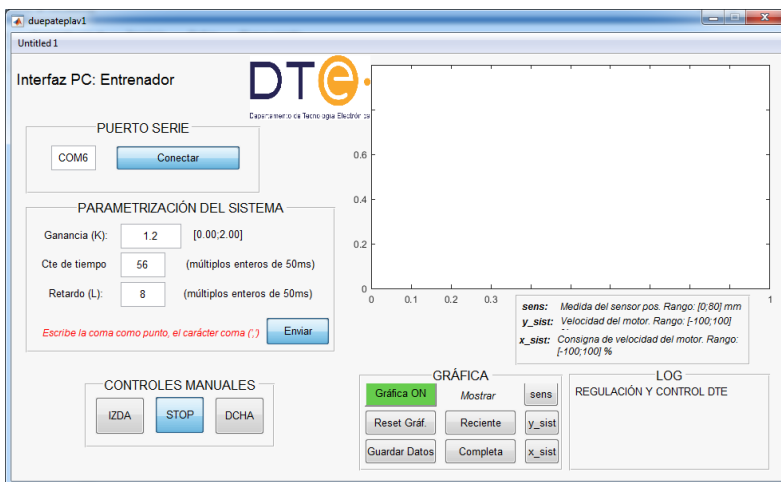
igual. Cambiando los parámetros de la función de transferencia (K y τ) el sistema se comportará de forma distinta. Por tanto, cada estudiante puede tener una función de transferencia distinta, evitando copias en sesiones de evaluación.

Las configuraciones de los parámetros del modelo se pueden cargar a través de la interfaz USB. Para este propósito, se ha diseñado una aplicación de PC específica que permite a los profesores modificar la configuración del equipo (Figura 11). Además, esta interfaz permite testear el correcto funcionamiento de los equipos.

5. ESCENARIOS DOCENTES

Basándonos en las características que tiene el equipo docente que se ha presentado, se han diseñado una serie de escenarios prácticos en los que poder usar el mismo en sesiones de laboratorio. Principalmente se pueden emplear dos escenarios: implementación de bucles de control de posición y bucles de control de velocidad. Para el control en posición el sistema debe ser modelado como un sistema de segundo orden y para el control en velocidad ha de ser modelado como un sistema de primer orden.

FIGURA 11. Interfaz del profesor para configurar los parámetros del equipo.



Fuente: Elaboración propia.

El equipo puede ser controlado de dos formas distintas: usando señales binarias tipo todo/nada o señales analógicas. Estos dos enfoques son descritos en las siguientes subsecciones 5.1 y 5.2.

Además de para las sesiones más puramente centradas en implementación de bucles de control, se puede usar el equipo para otro tipo de prácticas como por ejemplo para el modelado de sistemas dinámicos (sección 5.3) o para la docencia de programación de PLCs básica (sección 5.4).

5.1. CONTROL USANDO SEÑALES TIPO TODO/NADA

Además del control tradicional de motores DC basado en el ajuste de la tensión de en bornes del mismo, se puede usar otro tipo de control basado en señales discretas de tipo todo/nada. Para ello, el dispositivo tiene dos entradas disponibles: una para cada dirección. De esta forma, se puede realizar con control por dos puntos usando dos salidas digitales del PLC.

Las señales digitales procedentes del PLC serán convertidas por el microcontrolador a dos velocidades constantes en una dirección o la otra.

Además, como se ha descrito anteriormente, este control puede hacerse no solo usando PLCs sino también usando la API disponible a través de MATLAB en PC. Esto es especialmente útil para algunos grados en los que la asignatura de Regulación Automática se da antes que Automatización Industrial que es donde se enseñan los fundamentos de la programación de PLCs en entornos industriales.

5.2. CONTROL USANDO SEÑALES ANALÓGICAS

En contraposición al escenario anterior, un control basado en señales analógicas también puede ser realizado. En este escenario, la entrada analógica del entrenador docente será controlada por una salida analógica del PLC.

Igual que en el escenario anterior, este tipo de control también puede ser realizado a través del PC.

5.3. MODELADO DE SISTEMAS DINÁMICOS

Para obtener un controlador para un determinado sistema, es necesario conocer el modelo de ese sistema. Para ello, la interfaz de PC puede ser usada para adquirir datos del entrenador con los que posteriormente obtener un modelo experimental del sistema. De esta forma, los alumnos pueden inferir los parámetros cargados en el equipo.

5.4. OTROS

Además de sesiones relacionadas con el modelado y control de sistemas dinámicos, el equipo propuesto puede ser también usado para la docencia de programación de PLCs y microcontroladores.

Por ejemplo, se podría implementar el control de una barrera de paso usando modelos DES y PLC. Un extremo del sistema podría representar la barrera extendida y el otro la posición retraída. Además, con los finales de carrera virtuales, se podrían establecer tramos en los que la velocidad de la barrera podría variar.

Además, como el sistema cuenta con un microcontrolador, el entrenador podría también ser usado para la docencia en programación de microcontroladores. Por ejemplo, se podrían implementar prácticas en los que se programaran distintos tipos de control de motores paso a paso como el micro stepping.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un entrenador docente para ser usado en las asignaturas de Automatización Industrial y de Regulación Automática. Ambas asignaturas se encuentran en el marco de los grados en Ingeniería Industrial de la “Escuela Politécnica Superior” de la Universidad de Sevilla.

Se consiguió fabricar y validar un prototipo. Doce equipos más se han fabricado para ser usado en los laboratorios docentes. Por razones asociadas a la pandemia de COVID-19, estos equipos aún no han sido usados por los alumnos en sesiones prácticas. Se han desarrollado distintos modelos de prácticas que van desde el modelado de sistemas

dinámicos, pasando por la implementación de distintas estrategias de control en bucle abierto y cerrado hasta la docencia de programación de PLCs y microcontroladores.

Aunque se esperaba haber usado el equipo en las sesiones prácticas del curso 2020/2021 esto no pudo ser posible por las restricciones asociadas a la pandemia de COVID-19. Aunque no se han podido recoger resultados de su uso en entornos reales de docencia, el equipo se les dio a varios alumnos internos para que testearan y probaran el dispositivo. Los alumnos reportaron que el equipo era sencillo de usar y que les ayudaba a asimilar mejor los conceptos teóricos.

Hasta ahora, todos estos conceptos son cubiertos de forma teórica o, dado el coste, con un número reducido de entrenadores. Pero, el equipo propuesto y su reducido coste, lo hacen asequible y compacto como para tener un equipo por puesto de laboratorio. Esto es posible gracias a que la mayoría de los elementos están basados en componentes comerciales fácilmente asequibles y sustituibles.

Con el uso de este equipo se espera ayudar a los estudiantes a entender y asimilar mejor los conceptos teóricos de las citadas asignaturas: Automatización Industrial y Regulación Automática. Además, la relación entre estas asignaturas será más fácilmente percibida por los alumnos.

7. AGRADECIMIENTOS/APOYOS

A los autores les gustaría agradecer a Álvaro Ariel Gómez, Francisco Javier Molina, Diego Francisco Larios, Carlos León, Alejandro Gallardo Soto y Julián Rodríguez Galán por la ayuda desinteresada prestada en el diseño y construcción del equipo docente. Este proyecto ha sido financiado por el “*III Plan Propio de Docencia*” de la Universidad de Sevilla, número de concesión 22259.

8. REFERENCIAS

- Alphonsus, E. R., & Abdullah, M. O. (2016). A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1185-1205. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.025>
- Edward, N. S. (2012). The Role of Laboratory Work in Engineering Education: Student and Staff Perceptions: *International Journal of Electrical Engineering Education*. <https://doi.org/10.7227/IJEEE.39.1.2>
- Feisel, L. D., & Rosa, A. J. (2005). The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education. *Journal of Engineering Education*, 94(1), 121-130. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x>
- Pearce, J. M. (2013). *Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs*. Newnes.
- Riveros, L. F. R., Llanos, A. C., Hugo Bernal Trisancho, V., & Navarro, J. F. B. (2016). Educational module for laboratory practice in the areas of instrumentation, automation, control and industrial communications. ECCI university. 2016 *Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/TAEE.2016.7528240>
- Valencia-Palomo, G., & Rossiter, J. A. (2011). Programmable logic controller implementation of an auto-tuned predictive control based on minimal plant information. *ISA Transactions*, 50(1), 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2010.10.002>