

Laboratorio autoconstruido para el aprendizaje del control automático

**Efraín Alcorta García, David Alejandro Díaz Romero,
Ernesto Zambrano Serrano, Miguel Ángel Platas Garza,
Jesús Daniel Garza Camarena**

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
david.diazrr@uanl.edu.mx, ernesto.zambranos@uanl.edu.mx, miguel.platasgrz@uanl.edu.mx,
jesus.garzacmn@uanl.edu.mx, Autor de correspondencia: efrain.alcortagr@uanl.edu.mx

RESUMEN

Una forma accesible y de bajo costo para complementar mediante experimentos el aprendizaje del control automático es abordada en el presente trabajo. Guiados por la idea de construir un laboratorio portátil, de bajo costo y hecho por uno mismo se propone un prototipo que además proporciona varias vías para visualizar el comportamiento de un sistema dinámico. El prototipo cuenta con la posibilidad de definir plantas usando interconexiones de resistencias y capacitores, adquisición de señales, selección manual mediante potenciómetro del valor de referencia, además de poder operar en lazo abierto. La entrada y/o el controlador son procesados mediante un microcontrolador (Tarjeta de desarrollo Arduino UNO Rev 3). La entrada al sistema es proporcionada por una señal mediante modulación por ancho de pulso. Los resultados pueden ser visualizados utilizando una pantalla OLED y/o a través de un programa externo. El laboratorio está respaldado por una serie de programas e información proporcionada a los interesados mediante un repositorio en GitHub.

PALABRAS CLAVE

Control, aprendizaje, tarjeta, Arduino UNO, sistema lineal.

ABSTRACT

An accessible and low-cost way to complement automatic control learning through experiments is addressed in this work. Guided by the idea of building a portable, low-cost, do-it-yourself laboratory, a prototype is proposed that also provides several ways to visualize the behavior of a dynamic system. The prototype allows the definition of plants using interconnections of resistors and capacitors, signal acquisition, manual selection of the reference value through a potentiometer, and the ability to operate in open loop. The input and/or the controller are processed by a microcontroller (Arduino UNO Rev 3 Development Board). The system input is provided by a signal through pulse-width modulation. The results can be visualized using an OLED display and/or through an external program. The laboratory is supported by a series of programs and information made available to interested users through a GitHub repository.

KEYWORDS

Control, learning, board, Arduino UNO, linear system.

INTRODUCCIÓN

El control automático es una disciplina fundamental en la ingeniería moderna, presente en aplicaciones que van desde los electrodomésticos hasta los sistemas industriales y robóticos. Sin embargo, su aprendizaje suele estar acompañado de dificultades, especialmente cuando el acceso a laboratorios equipados es limitado debido a su alto costo o complejidad. Frente a este desafío, surge la necesidad de alternativas didácticas que permitan a los estudiantes experimentar de forma práctica, económica y flexible. En este contexto han surgido dispositivos¹ como una alternativa innovadora y

compacta que permite a los estudiantes realizar experimentos de control fuera del entorno convencional del laboratorio en las universidades.² Esos prototipos portátiles están diseñados para que los estudiantes puedan experimentar desde su propio hogar, promoviendo la autonomía, estimulando la creatividad y aumentando su nivel de participación. La interacción directa con el sistema permite ajustar libremente los parámetros de control y observar el comportamiento del sistema en tiempo real, lo que contribuye a una comprensión más profunda de los fenómenos estudiados.² Estos son especialmente valiosos para reforzar conceptos fundamentales del control automático, tales como la respuesta en el dominio del tiempo, el análisis en frecuencia, la dinámica de observadores y el desempeño de sistemas en lazo cerrado. La posibilidad de contrastar los modelos teóricos con resultados experimentales reales favorece un aprendizaje más significativo y mejor aplicado.

En los últimos años, diversos estudios han explorado y validado este enfoque educativo. Por ejemplo, en ² y ³ se reportan implementaciones exitosas de kits para llevar a casa basados en sistemas de regulación de temperatura y en plataformas electromecánicas, evidenciando su efectividad como herramientas didácticas. Asimismo, en ⁴ se desarrolló un laboratorio portátil capaz de realizar tanto regulación en lazo cerrado como identificación en lazo abierto, empleando actuación mediante modulación por ancho de pulso (PWM) y adquisición de datos asistida por Python para implementar un sistema de control de temperatura basado en calentamiento por transistor y realimentación mediante un termistor.

Adicionalmente, plataformas educativas como TCLab y URLab demuestran que los sistemas térmicos pueden ser controlados y modelados de manera eficaz mediante soluciones simples y accesibles, consolidándose como bancos de prueba relevantes tanto en contextos educativos como de investigación.^{5,6} En conjunto, estas experiencias ponen de manifiesto el potencial de los laboratorios para llevar a casa como una herramienta clave para modernizar la enseñanza del control automático en el ámbito universitario.

En este trabajo se presenta una propuesta orientada a complementar el aprendizaje del control automático mediante el desarrollo de un laboratorio portátil, de bajo costo y construido por el propio usuario. Mediante el prototipo propuesto es posible realizar experimentos de respuesta en el tiempo, implementación de estrategias de control (ya se encuentran disponibles el control de regulación, control integral y seguimiento de trayectoria). Los resultados pueden ser visualizados a través de una pantalla OLED integrada al prototipo, o bien, mediante la utilización de un programa de Python. Este enfoque no solo facilita el acceso a la experimentación, sino que también promueve una comprensión más profunda de los conceptos teóricos a través de la práctica directa, facilitando el alcanzar las etapas más altas en la taxonomía de Bloom (analizar, evaluar y crear).

En el trabajo previo de los autores¹ se presenta una versión anterior del presente prototipo. Adicional a lo presentado en,¹ se agregó la visualización mediante la pantalla OLED, se incluye la planta como un módulo intercambiable que permite eventualmente integrar otras plantas diferentes a la utilizada por default.

UN LABORATORIO HECHO POR UNO MISMO

La idea central del proyecto es la construcción de un prototipo experimental compacto que pueda utilizarse fuera de un laboratorio tradicional, incluso en el hogar. El dispositivo está diseñado para permitir la experimentación con sistemas dinámicos sencillos, ofreciendo múltiples formas de observar y analizar su comportamiento. El esquema general del prototipo se puede apreciar en la figura 1.

El dispositivo cuenta con un módulo independiente e intercambiable donde se encuentra la planta además de una plataforma base que equipa al usuario con botones de inicio y paro de experimento, interruptores de selección para distintas configuraciones disponibles desde software, un potenciómetro para asignación de referencia y una pantalla OLED para visualizar la evolución de la salida. Lo anterior está controlado por un microcontrolador para hacer la adquisición de las señales y calcular la entrada al sistema. El microcontrolador seleccionado fue el Atmega328P contenido en la

tarjeta de desarrollo Arduino UNO Rev 3⁷ y el prototipo desarrollado se diseñó como una placa de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés *Printed Circuit Board*) que se ensambla directamente al Arduino UNO, ver figura 2.

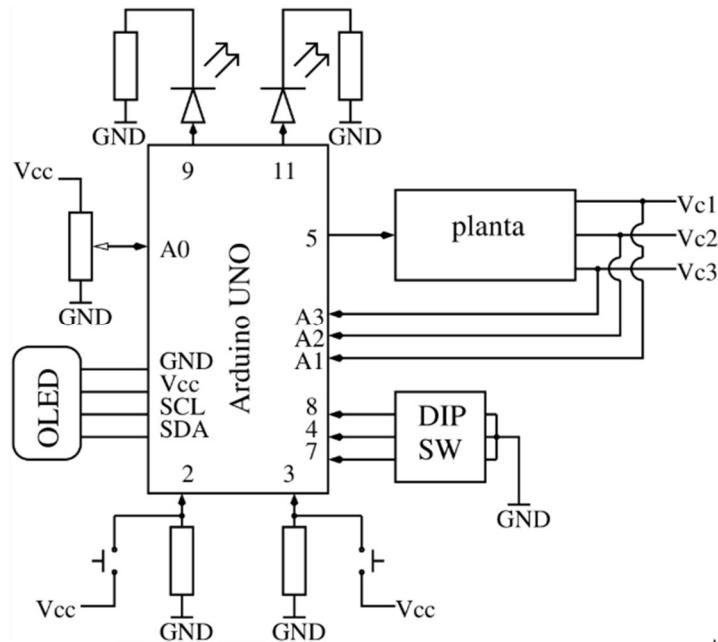


Fig. 1. Esquema general del prototipo THL para aplicaciones de control.



Fig. 2. Placa de circuito impreso (PCB) para el laboratorio portátil de control.

El Arduino UNO fue seleccionado debido a que es muy popular y se utiliza como parte de diferentes unidades de aprendizaje (lo cual implica que muchos de los estudiantes ya disponen de una). Además, es de bajo costo y permite que el prototipo desarrollado pueda ser insertado evitando con esto falsos contactos.

La tarjeta desarrollada es llamada laboratorio para llevar a casa o bien THL por las siglas en inglés de Take-Home Labs. La THL fue diseñada considerando dos partes: la tarjeta principal mostrada en la parte superior de la figura 2, y una tarjeta desmontable de la primera donde se encuentra la planta a ser utilizada, la cual se muestra en la parte inferior de la figura 2. Note que mediante el uso de pequeños puentes (jumpers) es posible seleccionar una planta de primer orden, si no se coloca ningún puente en la tarjeta; una de segundo orden si se coloca el puente en J1; una de tercer orden si se colocan tanto J1 como J2 y finalmente una de segundo orden con distintos parámetros si se colocan todos los puentes, J1, J2 y J3.

Alternativamente el circuito propuesto puede ser ensamblado en una placa de pruebas conocida como protoboard y conectado mediante cables al Arduino UNO, ver figura 3.

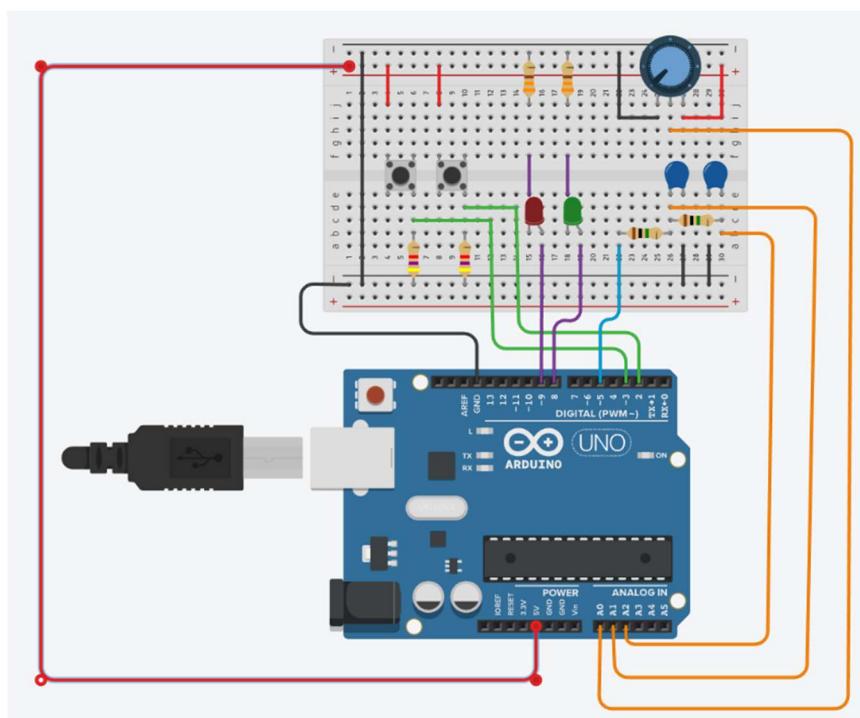


Fig. 3. Esquema propuesto implementado en placa de pruebas para un sistema de segundo orden.

El prototipo permite definir diferentes plantas (modelos físicos del sistema a controlar) mediante la interconexión de resistencias y capacitores, lo que posibilita representar sistemas de primer, segundo o tercer orden. Esta flexibilidad resulta especialmente útil para ilustrar conceptos clave como la respuesta transitoria, el estado estacionario y la estabilidad.

OPERACIÓN

El uso de la tarjeta requiere primeramente la conexión con un Arduino UNO, considerando que la tarjeta denominada Take-Home-Labs (THL) está diseñada como un shield,⁸ para ser colocado en las terminales del Arduino UNO. Adicionalmente se requiere cargar un programa al Arduino UNO, el cual se puede realizar mediante la IDE de Arduino.

Diferentes programas fueron preparados y puestos a disposición en el repositorio público de GitHub con la dirección <https://github.com/UANL-CA-170>. Dicho repositorio cuenta con material

asociado al proyecto THL, tal como: un README.md que describe aspectos generales de la THL, un directorio mcu_src/ donde se tiene acceso a programas tanto para el instructor (Instructor_resources/Case_b_10X), como para el estudiante (Student_resources/) y un directorio con un programa en Python (monitor/) para visualizar las variables medidas, así como para guardar estas en un archivo con formato csv.

Para mostrar la operación, coloquemos los puentes J1 y J2 en la tarjeta de la planta (mostrada en la parte inferior de la figura 2), considere el programa para el instructor denominado plantilla.ino, el cual se encuentra en el directorio mostrado a continuación: mcu_src/Instructor_resources/Case_b_10X/Plantilla/plantilla.ino, dentro del repositorio. Este programa debe de ser compilado y cargado a la tarjeta de Arduino UNO (use, por ejemplo, Arduino IDE, VS-Code, etc.).

El programa ofrece el código para resolver el problema de regulación a un valor constante, el cual es conocido en la literatura de control como problema de set point. Las opciones que presenta el programa pueden ser seleccionadas con la ayuda de un DIP switch (marcado con 4, 7 y 8 sobre el PCB, pero referenciado como DS1, DS2 y DS3 respectivamente), ver figura 2.

Se tienen programadas dos posibles soluciones de control, una mediante el uso de una estrategia de cambio de coordenadas y regulación y otra basada en control integral. Para seleccionar la primera estrategia (mediante cambio de coordenadas) se coloca el interruptor marcado con un 4 en el PCB (DS1) del DIP switch en OFF. Si este interruptor es colocado en ON se aplica el enfoque basado en control integral.⁹

Por otro lado, el interruptor marcado con 7 sobre el PCB (DS2) del DIP switch considera una retroalimentación de estado (en el tipo de control seleccionado previamente con el primer interruptor DS1) si se coloca en OFF y usa un observador para retroalimentar el estimado de los estados si se coloca en ON. El interruptor marcado con 8 sobre el PBC (DS3) del DIP switch está relacionado con la información presentada en la pantalla OLED: si el interruptor es colocado en OFF, la pantalla muestra la evolución de la salida (voltaje del capacitor 2) así como el valor de referencia obtenido del ajuste que proporciona el potenciómetro, si se coloca en ON, la pantalla muestra los valores numéricos de la referencia, la salida y la señal de control aplicada a la planta. Adicionalmente se tiene un potenciómetro mediante el cual es posible ajustar el valor de la referencia utilizada en el lazo de control.

Una vez seleccionados la posición de los interruptores que forman el DIP switch, se oprime el primer botón pulsador (push button), marcado sobre la PCB como SW2, el cual inicia la aplicación de la señal de control al lazo de control. Para interrumpir la aplicación de la entrada de control a la planta se debe oprimir el segundo botón pulsador, el cual está marcado con SW3 sobre el PCB.

En el caso del repositorio para estudiantes (Student_resources/) existen diferentes programas que abarcan las distintas situaciones (primer, segundo y tercer orden, etc.) En estos casos el programa no cuenta con el control diseñado, sino que solamente proporciona un espacio donde se requiere escribir el control, la ganancia del observador, entre otros aspectos.

CONTROL Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES

El núcleo del sistema está basado en un microcontrolador Arduino UNO, ampliamente utilizado en entornos educativos debido a su bajo costo y facilidad de programación. Este microcontrolador se encarga de calcular la señal de entrada al sistema y/o el controlador, permitiendo implementar estrategias tanto en lazo abierto como en lazo cerrado.

La señal de control se aplica al sistema mediante modulación por ancho de pulso (PWM), una técnica común en sistemas digitales que permite aproximar señales analógicas de forma eficiente. Además, el prototipo incluye un potenciómetro que posibilita la selección manual del valor de referencia, facilitando la interacción directa del usuario con el sistema.

El dispositivo también cuenta con capacidades de adquisición de señales, lo que permite medir la respuesta del sistema en tiempo real y analizar su comportamiento ante distintos escenarios. La tarjeta THL tiene la adquisición de datos prevista para los valores de los voltajes en cada uno de los

capacitores: el voltaje en el capacitor 1, V_{c1} , está conectado a la terminal A1 de Arduino UNO, el voltaje del capacitor 2, V_{c2} , está conectado a la terminal A2, así como el voltaje del capacitor 3, V_{c3} , está conectado a la terminal A3 de Arduino. Adicionalmente, el patín central del potenciómetro está conectado a la terminal A0.

La salida de control utiliza la terminal D5 del Arduino, la cual es una salida con modulación por ancho de pulso (PWM). Dadas las plantas utilizadas (circuitos RC), estas operan como filtro pasa bajos que ayudan a promediar la forma de la señal.

VISUALIZACIÓN Y APOYO DIGITAL

Uno de los aspectos más destacados del laboratorio portátil es la variedad de opciones disponibles para la visualización de resultados. La respuesta del sistema puede observarse directamente a través de una pantalla OLED integrada, lo que hace posible un análisis inmediato sin necesidad de equipos adicionales.

De manera complementaria, el proyecto incluye un programa informático que permite visualizar y analizar los datos desde una computadora, ampliando las posibilidades de estudio y registro de resultados. También es posible visualizar los datos directamente desde la plataforma Arduino-IDE, siempre y cuando se incluya la palabra “arduino” dentro de la función pantalla () del programa plantilla.ino antes mencionado. Si en la función pantalla () se coloca la palabra “python”, entonces las variables declaradas pueden ser procesadas y mostradas en pantalla mediante un programa llamado monitor.py. El programa requiere que algunos parámetros sean proporcionados correctamente, un ejemplo de conjunto de parámetros a ser aplicados es: Port:/dev/ttyAMC0 (en Linux) o bien Port:COM3; Baudrate:9600; Samples:1000; Sampling_ms:100; Min_Value_Plot:0; Max_Value_Plot:5. Ejemplo de una gráfica que se puede visualizar usando el programa monitor.py puede ser encontrado en la figura 4.

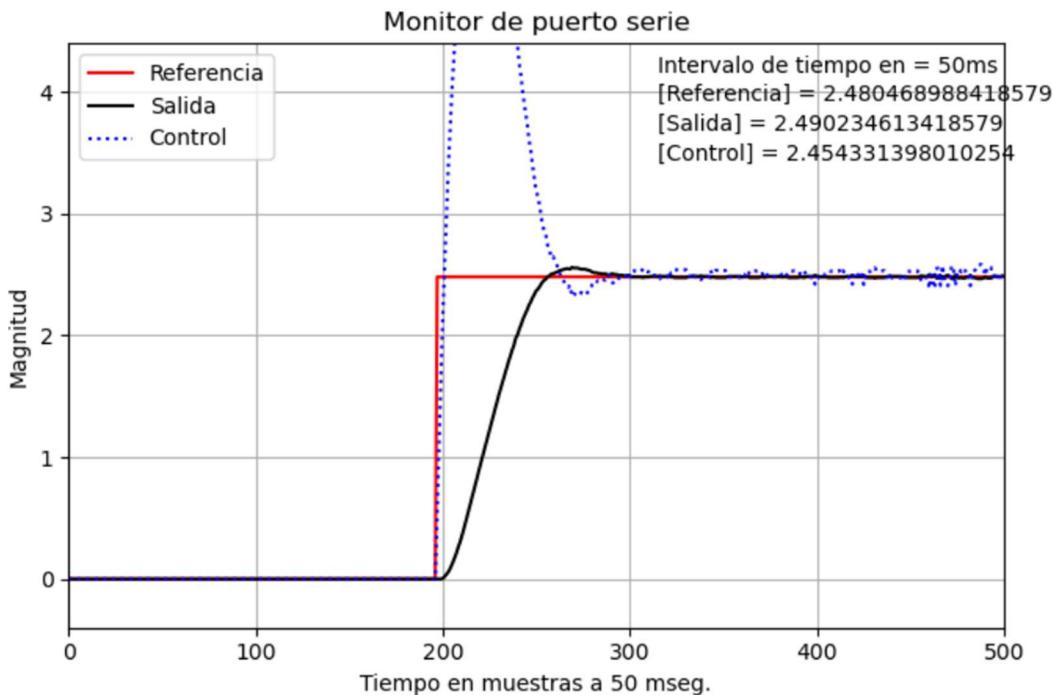


Fig. 4. Respuesta de un sistema de segundo orden con control integral.

CONCLUSIONES

La propuesta presentada demuestra que es posible expandir el acceso a la experimentación en control automático mediante soluciones simples, económicas y abiertas. El laboratorio portátil no solo complementa la formación teórica, sino que también incentiva el aprendizaje activo, la curiosidad y la creatividad.

Una de las ideas introducidas respecto a desarrollos previos de los autores, es que eventualmente se puede incluir sistemas con dos entradas y tres salidas, pueden tener amplificadores operacionales en donde las entradas-salidas operen con voltaje en un intervalo de 0 a 3.3 v. Otra de las ideas es la utilización de una pantalla OLED para previsualizar la evolución del voltaje del capacitor 2 con respecto al tiempo comparado con la señal de referencia.

Este tipo de iniciativas representa una valiosa herramienta educativa, especialmente en contextos donde los recursos son limitados, y abre la puerta a nuevas formas de enseñar y aprender ingeniería de manera práctica y accesible.

REFERENCIAS

1. Alcorta-García, E., Zambrano-Serrano, E., M. A. Platas-Garza, Diaz-Romero, D. A.: A Microcontroller-Based Take-Home Lab for Low-Cost Automatic Control Education, En Latin American Control Conference, Cancún, Q. Roo, México, oct. 15-17, 2025.
2. Durfee, W., Li, P., Waletzko, D.: Take-home lab kits for system dynamics and controls courses. In: Proceedings of the 2004 American control conference. vol. 2, pp. 1319–1322. IEEE (2004).
3. Rossiter, J., Pope, S., Jones, B.L., Hedengren, J.: Evaluation and demonstration of take-home laboratory kit. IFAC-PapersOnLine 52(9), 56–61 (2019).
4. Alcorta-García, E., Platas-Garza, M. Á., Diaz-Romero, D. A.: Identification and control design for an experimental setup to take home. In: 2023 20th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE). pp. 1–4. IEEE (2023).
5. Azagra, J.R., Martínez, M.G., Canal, S.N.: Nueva plataforma de control de temperatura de bajo coste para la educación en ingeniería de control. Jornadas de Automática (45) (2024).
6. Rico-Azagra, J., Gil Martínez, M.: Rediseño de una plataforma de control de temperatura de bajo coste para la educación en ingeniería de control. In: XLII Jornadas de Automática. pp. 275–281. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións (2021).
7. Arduino WEB page: <https://arduino.cc> , consultada el 15 de diciembre del 2025.
8. WEB page: <https://arduino.cc/que-es-un-shield/>, consultada el 15 de diciembre del 2025.
9. Domínguez, S., Campoy, P., Sebastián, J. M., Jiménez A.: Control en el espacio de estado. Pearson Educación S.A., Madrid, segunda edición, (2006).