

Equipos de laboratorio para modelado, análisis, diseño e implementación de sistemas de control de ingeniería

Julio Urbano, Jose Ramirez-Scarpetta, Esteban Rosero

Resumen—Equipos de laboratorio permiten el desarrollo de habilidades técnicas en la educación de ingeniería. En sistemas de control, se requieren equipos asequibles, portables y de fácil uso que permitan realizar prácticas sobre todo el currículo. Este artículo presenta el desarrollo y validación de equipos físicos portables para la educación en sistemas de control de ingeniería. Estos recursos tienen como objeto apoyar el desarrollo de actividades prácticas. Los equipos son un prototipo de péndulo y un prototipo de un sistema térmico que permiten obtener un sistema de segundo orden y uno de primer orden con tiempo muerto. Los prototipos se construyen utilizando elementos de fácil acceso y de fácil uso. Estos recursos se validaron funcionalmente de acuerdo con requerimientos definidos concernientes a: modelado donde la respuesta temporal de los prototipos se utilizó con éxito para encontrar una representación entrada-salida y espacio de estados, análisis donde se identificó la respuesta en frecuencia y se comparó con resultados analíticos, diseño e implementación de algoritmos de control básicos y avanzados incluyendo un Proporcional-Integral-Derivado (PID), y de realimentación de estados donde los prototipos se configuraron para su implementación. Los prototipos se utilizaron en el desarrollo de actividades de proyectos en los cursos de sistemas de control del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle en el último y primer semestre de 2022 y 2023, respectivamente. Se recogieron opiniones de los estudiantes para abordar la usabilidad y pertinencia de estos recursos evidenciando pertinencia para la enseñanza de los sistemas de control de ingeniería.

Palabras clave—educación en control, educación de ingeniería, equipo de laboratorio, evaluación de usabilidad.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de recursos de apoyo para la enseñanza de la Ingeniería se presenta como un área de alto aporte investigativo. Existe variedad de reportes con diferentes tipos de recursos como aplicaciones web [1], laboratorios remotos [2], recursos físicos locales [3], libros interactivos [4], cuadernos computacionales [5] y recursos multimedia [6]. Se ha demostrado que estos recursos pueden contribuir al desarrollo de habilidades tanto blandas como técnicas [7].

En los sistemas de control, dada su complejidad de enseñanza-aprendizaje, se requieren equipos de laboratorio para realizar actividades prácticas [8]. Se han reportado recursos basados en plataformas de bajo costo como la tarjeta Arduino. En [9], por ejemplo, se utiliza un módulo basado en un sistema térmico para el apoyo de actividades de identificación y diseño de controles. En [10] se presenta un módulo basado en un motor usado para la implementación de controles PID. En [11], usando MATLAB® [12], se usan componentes electrónicos básicos para introducir los conceptos de los sistemas de control. La placa Raspberry Pi se ha utilizado en la construcción de prototipos de experimentación con dinámica no lineal como el presentado en [13]. Se han utilizado dispositivos de adquisición de datos como la tarjeta

MyDAQ® y módulos Quanser®; por ejemplo, en [14] se presenta un equipo vibracional para la implementación de controles digitales que utiliza la tarjeta MyDAQ, en [15] se construye un equipo basado en el módulo Quaser Qube y se utiliza en el desarrollo de actividades de experimentación.

Aunque se tienen reportados diferentes recursos de experimentación, el alcance de uso de estos no cubre todas las actividades revisadas en cursos de control de ingeniería donde, según [16], existen elementos de modelado, análisis, diseño e implementación de controles tanto en el dominio continuo como en el discreto. Aunque estos recursos implementan dinámicas de control como el PID, que es un algoritmo de control ampliamente utilizado en la industria, otros elementos dentro del aprendizaje de los sistemas de control incluido el análisis en los dominios de tiempo y frecuencia, el estudio de dinámicas de control más avanzadas como la realimentación de estados, el modelado, el análisis y la implementación de dinámicas de control en el dominio discreto, no se consideran o se ven limitadas.

Este artículo presenta el desarrollo de equipos de laboratorio como recursos prácticos para actividades de aprendizaje en los cursos de sistemas de control de ingeniería. El objetivo de estos recursos es permitir que los estudiantes apropien conceptos de los sistemas de control mediante la práctica. Los equipos se proponen para realizar actividades en múltiples elementos de la educación de control, a saber, modelado, análisis, diseño e implementación de sistemas de control en dominios continuos y discretos. Los equipos fueron desarrollados considerando requisitos de uso relacionados con el estudio de los sistemas de control como el tiempo de respuesta, especialmente de los sistemas de primer y segundo orden; análisis en los dominios del tiempo y frecuencia; el diseño de compensadores en los dominios continuo y discreto, y su implementación para el control de variables de interés. Los recursos se propusieron, como caso de estudio para validación de usabilidad y pertinencia, para su uso en las actividades de proyectos de los cursos de control del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle en el segundo período de 2022 y el primer período de 2023.

El resto de este documento se estructura de la siguiente manera: en la sección II se resumen las características de la enseñanza de control en ingeniería y su contraste con el programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle. En la sección III se presenta el diseño y desarrollo de los equipos de laboratorio. En la sección IV se detalla la validación funcional de los recursos de experimentación. La validación usabilidad y pertinencia se presenta en la sección V y en la sección VI se concluyen los resultados del trabajo.

II. EDUCACIÓN EN CONTROL DE INGENIERÍA

Motivados por las nuevas necesidades de la industria y sociedad, impulsadas por los cambios tecnológicos, donde se

requieren habilidades blandas como el autoaprendizaje y la alfabetización digital, es deseable que la enseñanza de los sistemas de control contribuya al desarrollo de competencias transversales en la misma medida en que aporta al conocimiento teórico [8], lo que ayuda a abordar los nuevos desafíos de la industria donde los profesionales se sitúan en entornos cambiantes y se requiere experiencia en múltiples áreas de ingeniería. Como área transdisciplinaria, el estudio de los sistemas de control permite fortalecer las habilidades de abstracción junto con la resolución de problemas; además, combinado con una técnica didáctica como el Aprendizaje basado en proyectos, permite el desarrollo de habilidades transversales como el trabajo en equipo [8].

De acuerdo con [16], las carreras con fuerte enfoque en los cursos de control pueden extender su desarrollo teórico sobre los elementos: conceptos básicos y problema de control; modelado; análisis y diseño. El modelado de sistemas de control tiene como objeto comprender los sistemas lineales y no lineales e introducir aspectos de sistemas más complejos como los sistemas basados en eventos, sistemas ciber físicos, híbridos, entre otros. Temas como la respuesta en frecuencia y la representación en espacio de estados se mencionan como adecuados para tratarse usando herramientas informáticas como MATLAB®. Se dispone de recursos de apoyo como recursos de experimentación y herramientas de análisis y simulación para el desarrollo técnico.

La carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle cuenta con dos cursos de sistemas de control. Un curso inicial de nombre "Fundamentos de control de sistemas lineales" y un segundo curso de nombre "Análisis y compensación de sistemas lineales". Estos cursos se toman en semestres consecutivos siendo el curso de Fundamentos el primero. A cada asignatura se le asigna un curso de laboratorio donde se desarrollan diversas sesiones experimentales para llevar los contenidos teóricos a la práctica. La estrategia pedagógica utilizada en el desarrollo de los cursos es el Aprendizaje basado en proyectos. Las actividades que se realizan en los cursos, principalmente en los laboratorios, están orientadas al desarrollo de un proyecto.

TABLA. I. CONTENIDOS Y OBJETIVOS DE LOS PROYECTOS PARA EL CURSO DE FUNDAMENTOS DE CONTROL.

Contenidos	Objetivos del proyecto
Identificación del problema de control	Identificación del problema de control
Modelado y representación de un sistema	Modelado y representación en función de transferencia y espacio de estados
Análisis de la respuesta transitoria y estacionaria	
Características de los sistemas realimentados	
Diseño, implementación, y ajuste de un controlador PID	Análisis temporal del sistema sujeto a una acción de control PID

Las sesiones prácticas permiten el desarrollo de competencias técnicas en la implementación de compensadores. Se dispone de recursos de experimentación para las actividades prácticas que son módulos didácticos basados en servomotores. También hay módulos para el desarrollo de actividades de proyectos como prototipos físicos portables y procesos de control de nivel, temperatura y presión. Los contenidos y objetivos del proyecto del curso de

Fundamentos se listan en la TABLA. I [17], [18]. Cada objetivo del proyecto se desarrolla en una etapa separada. Cada una de las etapas se desarrolla bajo la guía del docente quien valora su desarrollo a través de actividades de evaluación. Previo al curso de Fundamentos de control, el estudiante ha adquirido conocimientos matemáticos en cursos como Ecuaciones diferenciales, Álgebra lineal y Cálculo, así como conocimientos básicos de procesamiento de señales. Los temas desarrollados en el curso de Fundamentos comienzan con la identificación del proceso de control. El alumno aprende la terminología de los sistemas de control e identifica los diferentes elementos y señales que intervienen en el proceso. Posteriormente se introducen las herramientas matemáticas para la representación de un sistema dinámico. Se presenta el análisis temporal de un sistema donde se estudian conceptos como respuesta transitoria y estacionaria, velocidad de respuesta, estabilidad y robustez. Finalmente, se presentan las acciones de control proporcionales, integrales y derivadas, sus combinaciones y su ajuste heurístico.

TABLA. II. CONTENIDOS Y OBJETIVOS DE LOS PROYECTOS PARA EL CURSO DE ANÁLISIS Y COMPENSACIÓN.

Contenidos	Objetivos del proyecto
Análisis de estabilidad de un sistema	Análisis de un sistema usando lugar de las raíces y respuesta en frecuencia
Análisis del lugar de las raíces	Diseño de un controlador PID
Análisis de la respuesta en frecuencia	
Diseño para representación entrada-salida	Diseño de estructuras distintas a serie y controladores por realimentación de estados
Diseño para representación en espacio de estados	

Los contenidos y objetivos del proyecto de la asignatura Análisis y compensación de sistemas lineales se recogen en TABLA. II [19]. El curso comienza con el modelo de un sistema y su representación de entrada-salida o espacio de estados. Inicialmente se presentan las herramientas de análisis en los dominios temporal y de frecuencia para definir su estabilidad y robustez frente a perturbaciones externas. Posteriormente se analiza la estabilidad del sistema introduciendo el concepto de estabilidad interna y finalmente se presentan diversas estructuras de control como el control RST, la retroalimentación de estado, entre otras.

Los proyectos propuestos a los estudiantes, en los dos cursos, tienen dos orientaciones: por un lado, se ofrece al estudiante trabajar sobre un problema real relacionado con el entorno industrial de la región o relacionado con el programa académico. Por otro lado, se ofrecen problemas didácticos predefinidos para los cuales los estudiantes utilizan los recursos físicos de la universidad como plantas o prototipos de laboratorio. Se destaca las estructuras de los cursos de sistemas de control de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle como cursos de enfoque fuerte lo que presenta a estos cursos como escenarios adecuados para la validación de relevancia y usabilidad de equipos de laboratorio para actividades prácticas.

III. DISEÑO Y DESARROLLO DE LOS EQUIPOS DE LABORATORIO

El desarrollo de los equipos de laboratorio se propuso de acuerdo con la metodología: 1) identificación de necesidades

didácticas para la enseñanza de sistemas de control considerando las actividades enumeradas en la sección 0; 2) definición de los recursos de experimentación y requerimientos funcionales de acuerdo con las necesidades didácticas definidas; 3) selección de componentes, teniendo en cuenta los requerimientos funcionales, para construir los recursos; 4) diseño de los montajes físicos; 5) construcción de los recursos de experimentación, y 6) validación funcional de acuerdo con los requerimientos funcionales. Los puntos 3) a 6) se realizaron de forma iterativa para cumplir con los requerimientos funcionales.

Se definieron los casos de uso: un sistema de primer orden con dinámica de tiempo muerto y un sistema oscilatorio de segundo orden. Los casos de uso definidos permiten cubrir aplicaciones de gran parte de los contenidos temáticos desarrollados en los cursos de control. Como recursos de laboratorio se propusieron: un prototipo de sistema térmico que, con un adecuado ensamblaje físico, permite cumplir con el caso de uso de un sistema de primer orden con tiempo muerto, y un prototipo de sistema de péndulo que permite cumplir con el caso de uso de un sistema oscilatorio de segundo orden; además, el prototipo de péndulo presenta una dinámica no lineal que es importante en el estudio de los sistemas de control. La construcción de los prototipos se realizó a partir de elementos de fácil uso y fácil adquisición por parte de los estudiantes.

A. Prototipo de sistema térmico

Fig. 1 muestra el esquema de elementos que componen el prototipo del sistema térmico. Para la adquisición de datos de los prototipos se utilizó la placa de adquisición de datos MyDAQ® [20] y el software MATLAB®. Se construyó un circuito generador PWM para interconectar la tarjeta con el prototipo. El circuito PWM recibe una señal de analógica en el rango de [0,10] V desde la tarjeta MyDAQ y genera una señal modulada. Tanto el prototipo de péndulo como el de sistema térmico utilizan el generador PWM para controlar los actuadores.

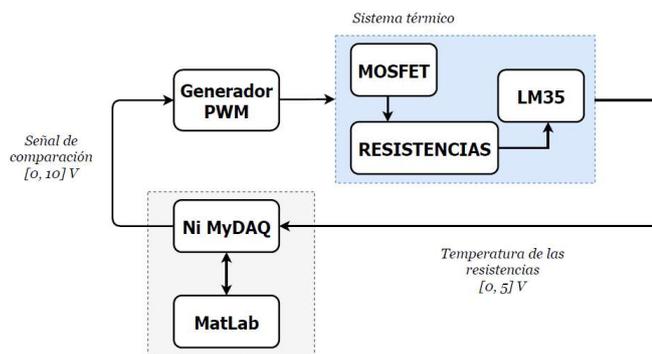


Fig. 1. Esquema de elementos del prototipo térmico.

Para la construcción del sistema térmico se utilizaron los elementos: resistencias electrónicas, un sensor de temperatura analógico de referencia LM35, un transistor Mosfet de referencia IRF730 y una fuente de tensión continua de 15 V, 3 A. En el sistema térmico, las resistencias electrónicas funcionan como fuente de calor. La conmutación del transistor permite variar la cantidad de energía que se les entrega y cambiar su temperatura. Para generar la dinámica de tiempo muerto, el sensor de temperatura se separó 16 cm de las resistencias a través de un conductor de aluminio. Fig. 2 muestra el diseño 3D del sistema térmico. El lado izquierdo del montaje es donde se ubica el sensor de temperatura.

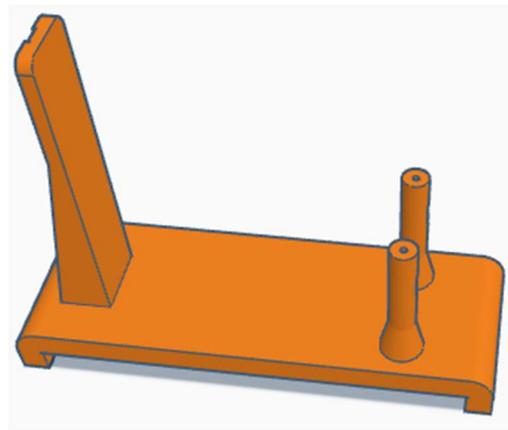


Fig. 2. Diseño del montaje del prototipo térmico.

Los orificios que se muestran en el montaje se utilizan para cablear las resistencias con el transistor y el circuito PWM. La dinámica de cambios de temperatura del sistema térmico se puede modelar, en representación de la función de transferencia, con un sistema de primer orden más un tiempo de retardo de transporte de la forma

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-t_m s}, \quad (1)$$

donde τ es el tiempo de sistema, k la ganancia y t_m es el retardo de transporte con τ y t_m dados en segundos. A partir de la identificación experimental, la función de transferencia que representa de la dinámica de calor en las resistencias es

$$T(s) = \frac{0.47}{97s + 1} e^{-53s}. \quad (2)$$

Aunque la dinámica térmica de las resistencias es la dominante en el sistema térmico, también se tiene en cuenta la dinámica asociada al sensor. A partir de la identificación de la dinámica del sensor se obtuvo la siguiente función de transferencia

$$S(s) = \frac{1}{20s + 1}, \quad (3)$$

donde no se asume ningún retraso de transporte lo cual es válido ya que puede integrarse completamente en la dinámica de calor de las resistencias. Adicionalmente, para obtener una señal más limpia, se propone utilizar un filtro de medición de la forma

$$F(s) = \frac{1}{0.5s + 1}. \quad (4)$$

La función de transferencia total del sistema térmico es:

$$P(s) = \frac{0.47}{970s^3 + 1999s^2 + 117.5s + 1} e^{-53s}.$$

Con un tiempo de muestreo de 11 s, permitiendo al menos 5 muestras para el tiempo de retardo y suficiente para la respuesta transitoria dado el τ del sistema, la función de transferencia discreta del sistema térmico es:

$$P(z) = \frac{0.0003z^3 + 0.0141z^2 + 0.0069}{z^3 - 1.47z^2 + 0.5151z} z^{-5}.$$

Fig. 3 se muestra la respuesta del sistema para una entrada de valor 4 desde SimuLink.

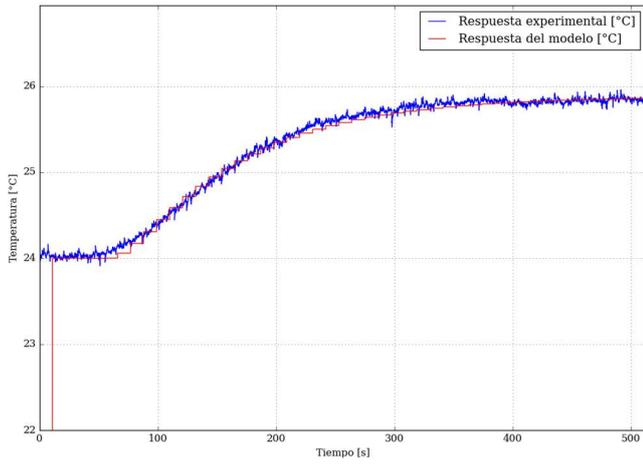


Fig. 3. Respuesta del sistema térmico con entrada de valor 4 desde MATLAB.

La curva de color rojo en la figura Fig. 3 muestra la respuesta del modelo propuesto para el sistema térmico.

B. Prototipo del sistema de péndulo

Fig. 4 muestra el esquema de los elementos que componen el prototipo del péndulo. Se utilizaron motores de corriente continua con reguladores de velocidad y una polarización máxima de 12 V que, equipados con hélices, permiten generar pares de movimiento angular, una fuente de voltaje de 12 V y un sensor de orientación de principio magnético para obtener baja fricción en el movimiento. Los motores de corriente continua también introducen una banda muerta que, como no linealidad, debe tenerse en cuenta en el funcionamiento y control del prototipo. En el caso del sistema de péndulo, el circuito PWM está conectado a los controladores de los motores para manejar directamente la velocidad y, en consecuencia, los pares angulares generados.

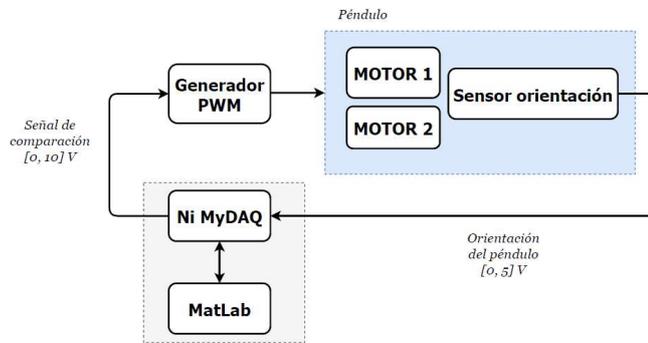


Fig. 4. Esquema de elementos del prototipo de péndulo.

El diseño del montaje físico del sistema de péndulo es el que se muestra en la figura Fig. 5

El sistema de péndulo es no lineal ya que uno de sus estados depende de un término sinusoidal. Para una representación lineal de entrada-salida, se supone que los cambios de ángulo están restringidos a un pequeño rango en donde se puede tratar como un sistema lineal. La dinámica general del péndulo está dada por

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + Lmg \sin(\theta) = F, \quad (5)$$

con J la inercia angular, b la constante de fricción, L la posición del péndulo, m la masa suspendida en el péndulo, g la constante de gravedad F la entrada de torque [21].

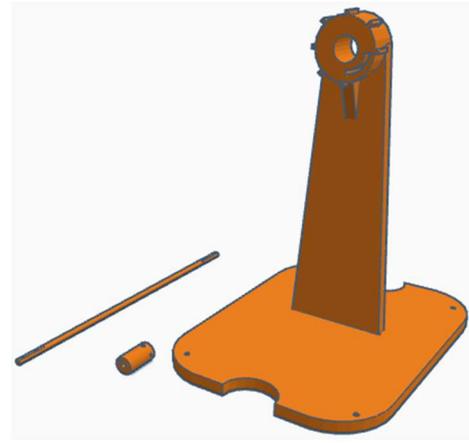


Fig. 5. Diseño del montaje del prototipo de péndulo.

En la ecuación (5), L y m están referenciados al centro de masa.

Con entrada de torque F nula y para pequeñas variaciones angulares, la ecuación (5) se puede aproximar a la forma

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + Lmg\theta = 0, \quad (6)$$

cuya solución está dada por

$$\theta(t) = A_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{b}{J} t\right) \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

con

$$\omega = \frac{1}{2} \sqrt{4 \left(\frac{Lmg}{J}\right) - \left(\frac{b}{J}\right)^2}, \quad (8)$$

y A_0 , φ dados por las condiciones iniciales. En la ecuación (6) se asume que

$$\left(\frac{b}{J}\right)^2 < 4 \left(\frac{Lmg}{J}\right).$$

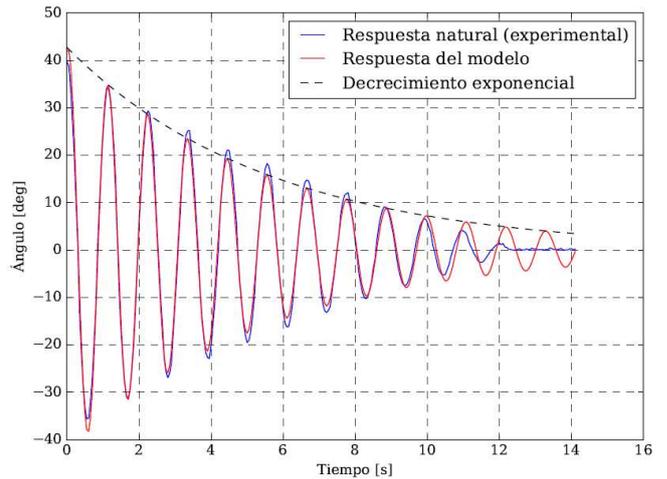


Fig. 6. Respuesta del péndulo con entrada nula y posición inicial 40°.

Fig. 6 muestra la respuesta del péndulo del prototipo con una condición inicial de 40 grados y con entrada nula. Los datos de orientación tienen un tiempo de muestreo de 50 ms.

En Fig. 6 la curva punteada marca el decrecimiento exponencial de la dinámica oscilatoria amortiguada del

péndulo. El decrecimiento exponencial está determinado por los parámetros b y J como se muestra en la ecuación (7). Los parámetros de la dinámica del péndulo, J , b se pueden obtener a partir de los datos experimentales de la curva de Fig. 6 lo que es conveniente dado que la derivación de un modelo analítico del péndulo depende de la robustez física del prototipo. Con un ajuste por mínimos cuadrados a la curva experimental en Fig. 6, asumiendo $L = (L_1 - L_2)$, con $L_1 = 19 \text{ cm}$ y $L_2 = 9 \text{ cm}$ donde L_1 se refiere a la distancia del pivote al motor 1 y L_2 a la distancia del pivote al motor 2, $m = 12 \text{ g}$ y $g = 9.8 \text{ ms}^{-2}$, se obtuvo los valores $9.053\text{e-}5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ y $2.5416\text{e-}4 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$ para b y J respectivamente.

Se puede ver en Fig. 6 que, para ángulos pequeños, el prototipo exhibe un movimiento no lineal con respecto al modelo. El rango $[-3, 3]$ grados es donde la fricción es más evidente. La fricción se puede compensar aumentando la distancia desde el pivote a los motores y sus pesos lo que también aumenta el tamaño del prototipo. Este comportamiento no afecta en mayor medida el uso del prototipo en aplicaciones de control.

Dados los parámetros del modelo, se tiene la ecuación no lineal de estados del sistema péndulo

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = f(x_1, x_2, u) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{Lmg}{J} \sin x_1 - \frac{bx_2}{J} + \frac{u}{J} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

donde los estados corresponden a $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta} = \dot{x}_1$ (el ángulo y la velocidad de rotación, respectivamente) y u la entrada de torque generada por los motores. Aplicando la linealización

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{x}_1 \\ \delta \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}_{(x_1^0, x_2^0, u^0)} \delta x + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{bmatrix}_{(x_1^0, x_2^0, u^0)} \delta u,$$

donde

$$f(x_1, x_2, u) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, u) \\ f_2(x_1, x_2, u) \end{bmatrix},$$

sobre el punto de operación $[x_1^0, x_2^0, u^0]$, se tiene la ecuación de estados

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{x}_1 \\ \delta \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{Lmg}{J} \cos x_1^0 & -\frac{b}{J} \end{bmatrix} \delta x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} \delta u, \quad (10)$$

con ecuación de salida

$$\delta y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Con el sistema en espacio de estados dado por las ecuaciones (10) y (11) se pueden obtener distintas dinámicas dependiendo del punto de operación x_1^0 , es decir, múltiples orientaciones del péndulo en el prototipo. Con $x_1^0 = 10 \cdot (\pi/180)$ (10 deg), dirección vertical hacia abajo del péndulo, se obtiene la siguiente ecuación de estados

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{x}_1 \\ \delta \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -45.57 & -0.357 \end{bmatrix} \delta x + \begin{bmatrix} 0 \\ 3934.5 \end{bmatrix} \delta u. \quad (12)$$

El sistema mostrado en la ecuación (12) representa el modelo del prototipo de péndulo sin considerar la dinámica de

los actuadores, en este caso los motores. Los motores utilizados en el prototipo presentan cambios lentos de velocidad por lo que es necesario considerar la dinámica de velocidad en el modelo prototipo; además, el mapeo de salida en el rango $[0, 10]$ dado por MATLAB® al rango $[0, 100\%]$ en señal PWM maneja una ganancia que también debe ser considerada. Por lo tanto, se tiene la función de transferencia del sistema de péndulo

$$P(s) = K_f \cdot M(s) \cdot G(s), \quad (13)$$

donde K_f corresponde con la ganancia final del sistema, $M(s)$ se refiere a la velocidad de los motores y $G(s)$ corresponde con la dinámica de oscilación del péndulo. Para la dinámica de velocidad de los motores, se proponer un filtro de la forma

$$M(s) = \frac{1.6}{0.27s + 1}. \quad (14)$$

El valor de estado estacionario del sistema de péndulo, para una entrada de tipo escalón permite calcular la ganancia final obteniendo un valor de $k_f = 7.73\text{e-}4$. Para el caso $x_1^0 = 10 \cdot (\pi/180)$ la función de transferencia $G(s)$ representando la oscilación del péndulo, está dada por

$$G(s) = \frac{3935}{s^2 + 1.495s + 45.57}$$

y la dinámica total del sistema, en función de transferencia, está dada por

$$P(s) = \frac{18.47}{s^3 + 5.356s^2 + 47.35s + 227.8}$$

Con un tiempo de muestreo de 100 ms, relevante dada la frecuencia natural del péndulo, se da la función de transferencia discreta del sistema

$$P(z) = \frac{0.002641z^2 + 0.009079z + 0.002025}{z^3 - 2.141z^2 + 1.895z - 0.5853}$$

Fig. 7 muestra la respuesta del péndulo a una entrada de valor 2 introducida desde Simulink.

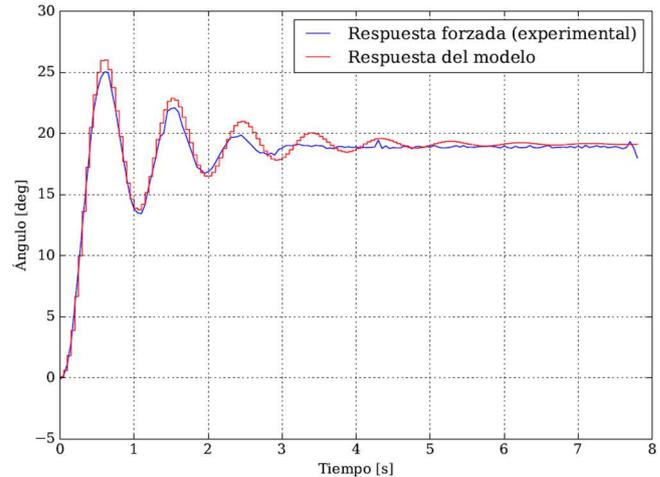


Fig. 7. Respuesta del péndulo con entrada de valor 2 desde MATLAB.

Se puede observar en Fig. 7 que la respuesta del modelo se ajusta a la respuesta experimental en la parte principal del transitorio lo cual es suficiente para calcular un modelo

experimental. Fig. 8 muestra los montajes físicos de los prototipos.



Fig. 8. Montajes físicos de los prototipos ubicados en el Laboratorio de Automática de la Universidad del Valle.

Actualmente, los montajes se encuentran en el Laboratorio de Automática de la Universidad del Valle.

IV. VALIDACIÓN FUNCIONAL

La validación funcional permitió determinar la idoneidad de los equipos de laboratorio para su uso en la enseñanza del control de ingeniería, esto se realizó utilizando los prototipos para el desarrollo de las actividades listadas en la sección 0.

Las actividades de modelado no presentan ningún inconveniente en su desarrollo. La obtención de la representación entada-salida de la dinámica de los prototipos depende de la correcta identificación de los elementos que componen cada uno de ellos, y de los tiempos de muestreo. En el caso del péndulo, la representación en espacio de estados y de función de transferencia se obtuvieron a partir de la ecuación diferencial general. El sistema de péndulo es no lineal lo que se considera como una propiedad del sistema. Las representaciones para el prototipo de péndulo tienen en cuenta su naturaleza no lineal. La lenta respuesta del sistema térmico, por otro lado, es una limitación que implica experimentos de larga duración y podría resultar en una pobre experiencia de usabilidad. El alcance de las actividades de modelado resultó amplio incluyendo representaciones de tiempo discretas para los prototipos lo cual no se considera en trabajos reportados previamente como [9], [10].

Las actividades de análisis permiten identificar el comportamiento del sistema a diferentes señales de entrada y a la variación de ciertos parámetros del sistema. En el caso del análisis del lugar geométrico de las raíces, la variación se realiza en una ganancia proporcional, como controlador, en lazo cerrado. Las figuras Fig. 9 y Fig. 10 muestran los diagramas de Bode obtenidos para los prototipos. En las figuras Fig. 9 y Fig. 10 las líneas de color rojo representan las curvas obtenidas experimentalmente mientras que las líneas de color negro representan las curvas obtenidas de los modelos. Para ambos casos, las curvas están ajustadas con pequeñas desviaciones. Los recursos permiten realizar el análisis de respuesta en frecuencia. Se puede mencionar que, dada la lentitud del sistema térmico, la adquisición de datos para bajas frecuencias requiere un tiempo considerable; sin embargo, las medidas se pueden tomar sin inconvenientes. Las

mediciones para el análisis del lugar de las raíces se toman en respuestas de lazo cerrado. Como se muestra a continuación, las respuestas de lazo cerrado a diferentes algoritmos de control permiten identificar fácilmente los indicadores de desempeño. Aunque las actividades de análisis son importantes en la teoría de control [16], los equipos reportados previamente, a comparación de este, no incluyen estas actividades como parte de su uso.

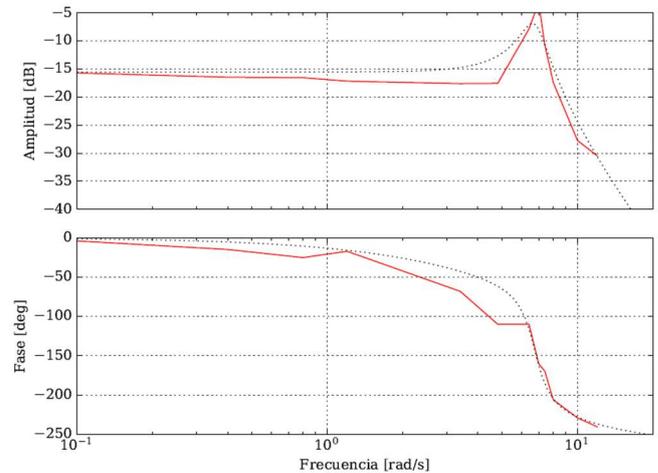


Fig. 9. Sistema de péndulo. Respuesta en frecuencia.

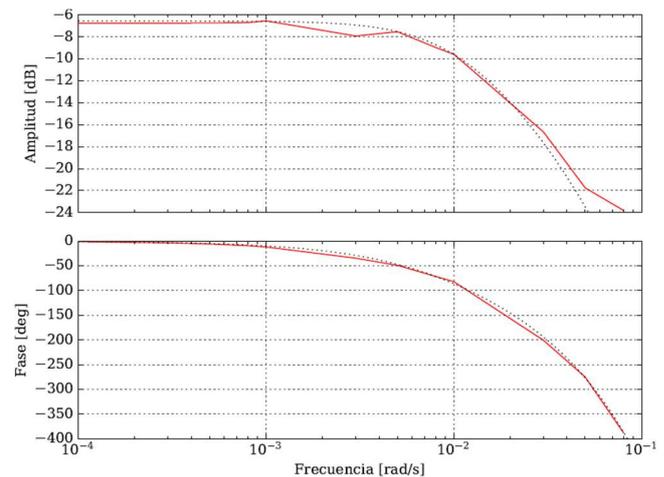


Fig. 10. Sistema térmico. Respuesta en frecuencia.

El objetivo de las actividades de implementación de algoritmos de control es utilizar los prototipos para desplegar y probar un controlador. Los prototipos se prueban con una implementación discreta para cada algoritmo, que en este caso son PID y realimentación de estados. Los prototipos evidenciaron facilidad de uso e implementación de un control PID. Las figuras Fig. 11 y Fig. 12 muestran las respuestas de seguimiento y regulación de los prototipos con un control PI. Asimismo, los prototipos permiten implementar una dinámica de control de realimentación de estados (ver Fig. 13 y Fig. 14) que se considera avanzada en comparación con el control PID. Para el caso del sistema de péndulo, la estructura de realimentación de estados incluye un observador de tercer orden. Las figuras Fig. 15 y Fig. 16 muestran las estructuras de control de realimentación de estados para el péndulo y el prototipo térmico, respectivamente. Para el caso del sistema térmico se utilizó un predictor de Smith. Ambos controladores, PID y realimentación de estados utilizan un esquema de anti embalamiento para manejar el comportamiento de la acción integral.

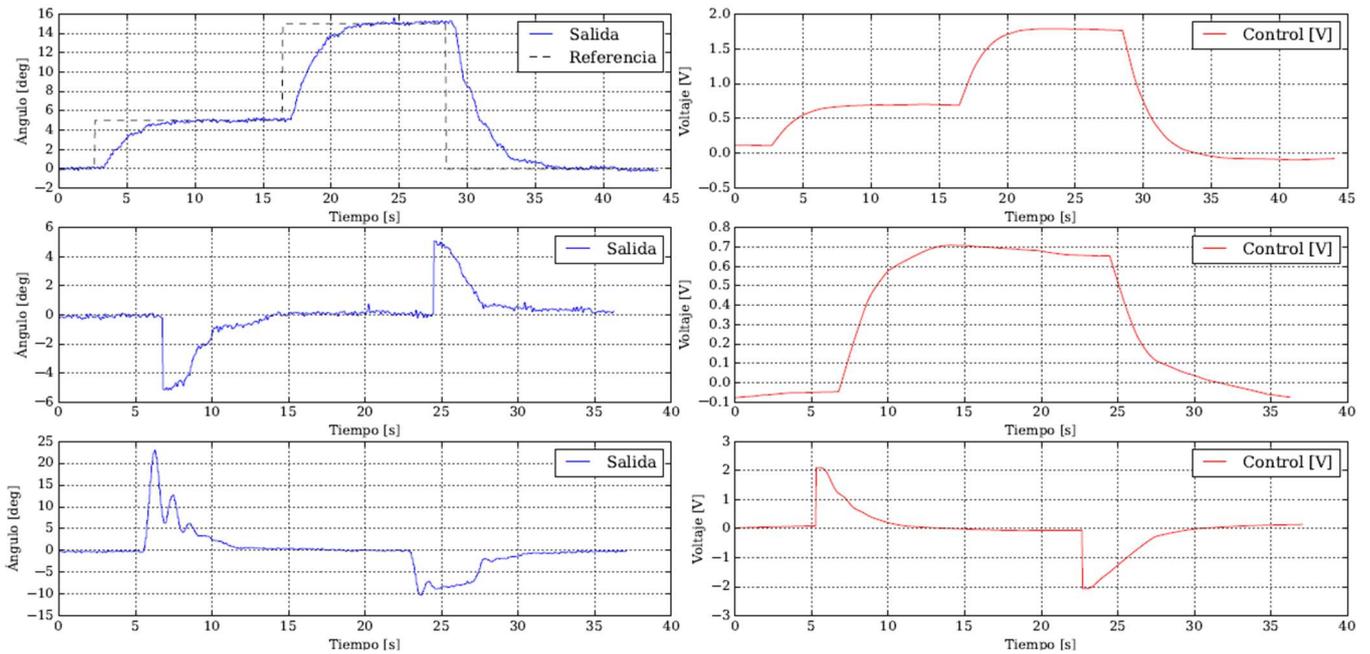


Fig. 11. Respuesta del sistema de péndulo con un control PID. Señal de salida en la columna izquierda, señal de control en la columna derecha. Respuesta en seguimiento (superior). Regulación con disturbio a la salida (medio). Regulación con disturbio a la entrada (inferior).

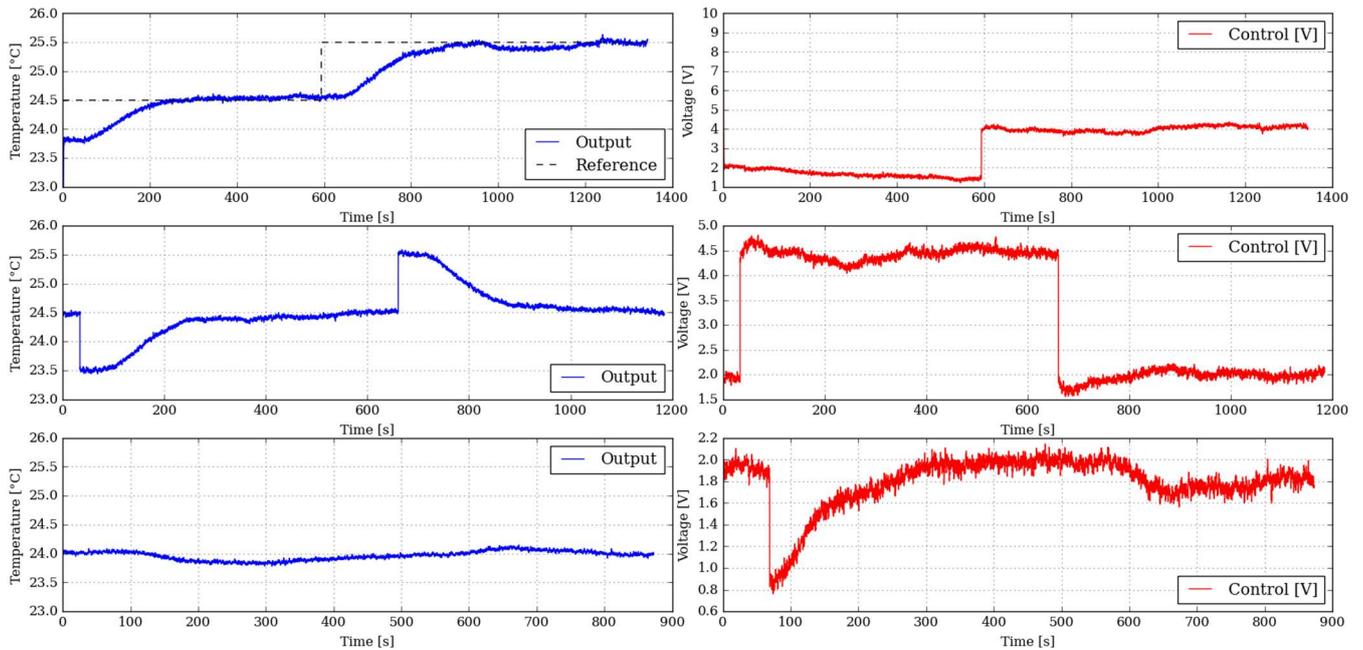


Fig. 12. Respuesta del sistema térmico con un control PID. Señal de salida en la columna izquierda, señal de control en la columna derecha. Respuesta en seguimiento (superior). Regulación con disturbio en la salida (medio). Regulación con disturbio en la entrada (inferior).

V. VALIDACIÓN DE USABILIDAD

Los recursos presentados se utilizaron para el desarrollo de actividades de proyectos en los cursos de sistemas de control del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle. Estos recursos se utilizaron en el segundo semestre de 2022 y el primer semestre de 2023. Se recogieron opiniones de los estudiantes para tener un acercamiento de usabilidad y relevancia. Las opiniones se recogieron a través de encuestas anónimas. La TABLA. III lista las preguntas presentadas en la encuesta. Las preguntas de TABLA. III son preguntas de calificación donde 1 corresponde a la calificación más baja y 5 a la más alta; además, se agregó un campo para comentarios donde se le solicitó al estudiante que reportara cualquier

apreciación o inquietud sobre los prototipos. Se obtuvo un total de 26 respuestas de las cuales 19 se referían al prototipo de péndulo y 7 al prototipo térmico.

La TABLA. IV muestra los promedios de las respuestas obtenidas en la encuesta. La última fila de TABLA. IV corresponde a la media global de las respuestas de cada prototipo. En la TABLA. IV, los aspectos de las filas 10 y 2, se destacan en su orden de prioridad para la mejora de la usabilidad. Nótese que las preguntas 6, 7 y 8, que están relacionadas con el aprendizaje de control, tienen una apreciación relativamente alta en comparación con las otras preguntas, esto demuestra que los prototipos son bien recibidos para su uso en la enseñanza de sistemas de control.

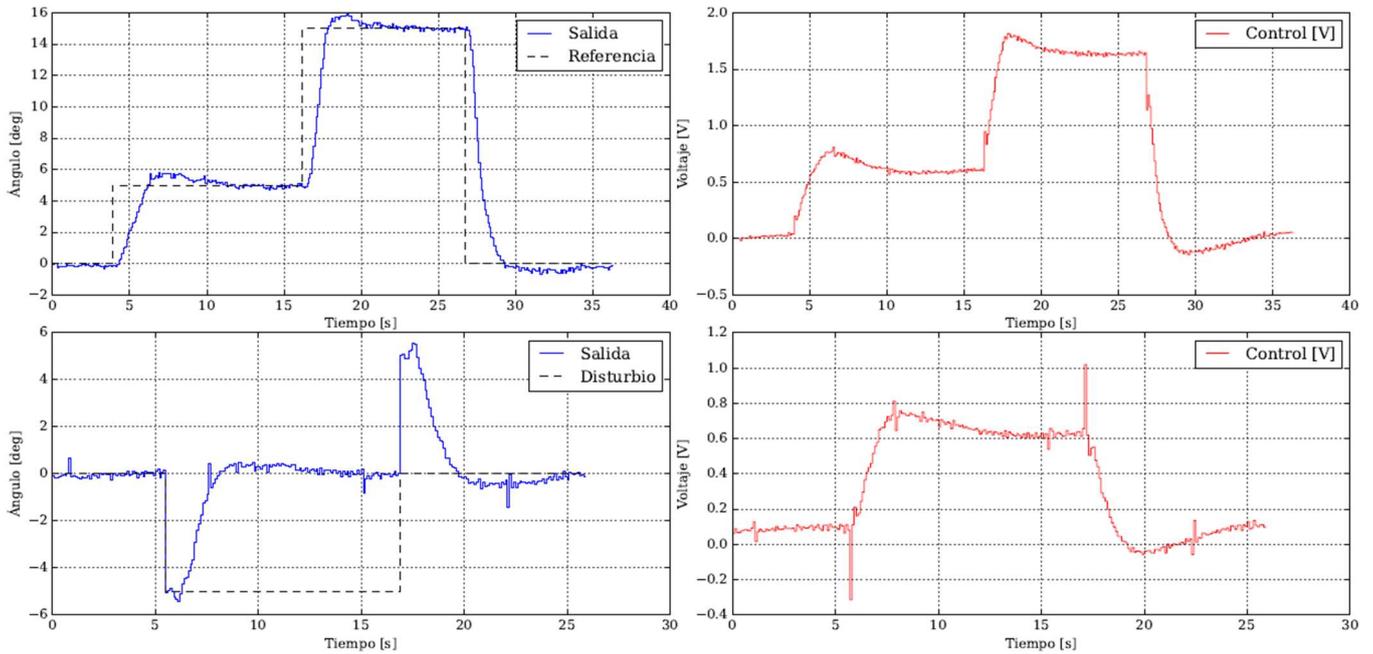


Fig. 13. Respuesta del sistema de péndulo con control por realimentación de estados. Señal de salida en columna izquierda. Señal de control en columna derecha. Respuesta en seguimiento (superior). Regulación con disturbio a la salida (inferior).

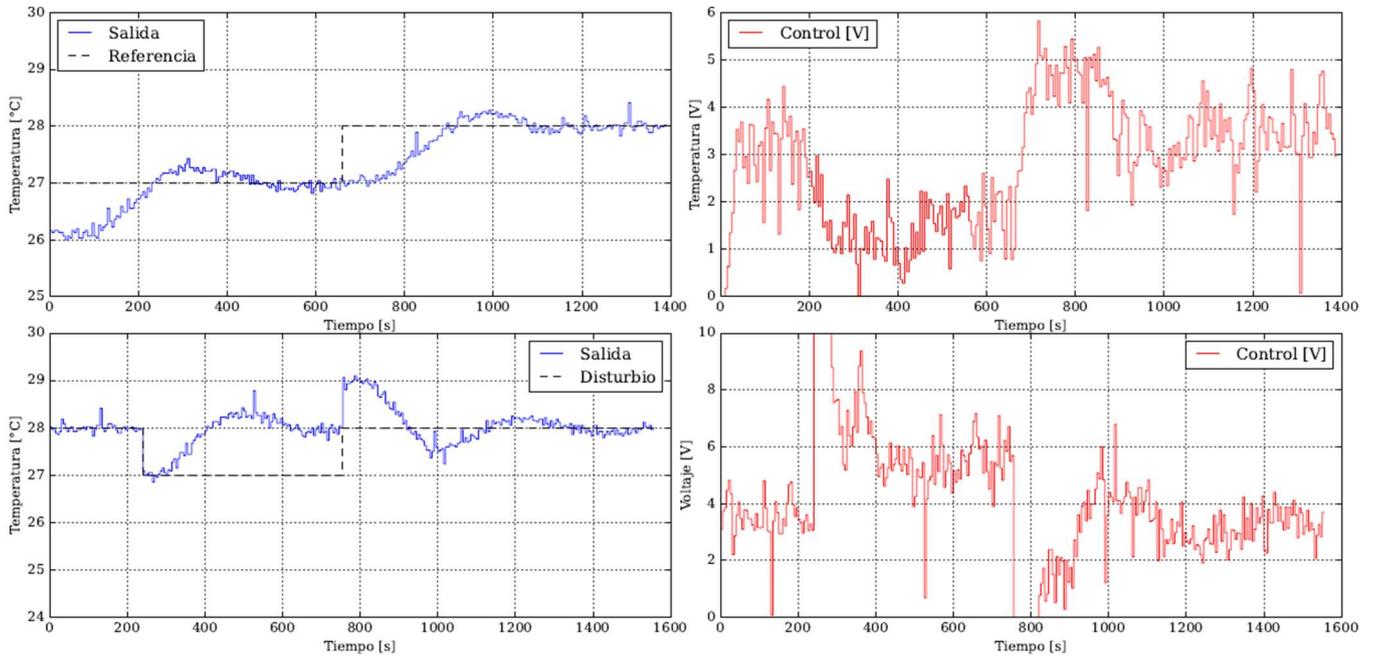


Fig. 14. Respuesta del sistema térmico con control por realimentación de estados. Señal de salida en columna izquierda. Señal de control en columna derecha. Respuesta en seguimiento (superior). Regulación con disturbio a la salida (inferior).

De la TABLA. IV se observa que los estudiantes tuvieron dificultades para familiarizarse con los prototipos y realizar experimentos con poca disponibilidad de tiempo. Según las medias de la fila 10 de TABLA. IV se puede señalar que se es necesario un tiempo considerable para familiarizarse con el uso de los prototipos, siendo el prototipo de péndulo el más difícil de usar; asimismo, como se puede observar en la quinta fila, el tiempo requerido para realizar experimentos sobre el prototipo térmico es inconveniente para los estudiantes ya que las respuestas necesitan hasta ocho minutos para completarse.

A partir de las filas 6, 7 y 8, se puede afirmar que los estudiantes encuentran más atractivo el prototipo de péndulo; y, como se muestra en la fila 9, el prototipo térmico ha permitido visualizar mejor la teoría de sistemas de control

donde están presentes dinámicas especiales como el tiempo muerto. La fila 12 de la TABLA. IV representa el apoyo de los prototipos a la capacidad de resolver problemas siendo el prototipo de péndulo el más significativo ya que se encontró como el más desafiante de modelar y controlar.

A partir de los comentarios obtenidos es posible mencionar el interés por el uso de los equipos ya que presentan una experiencia innovadora en comparación con los utilizados anteriormente en los cursos. También se menciona la necesidad de realizar algunos ajustes para mejorar la usabilidad como la adición de un interruptor en el adaptador de corriente del prototipo de péndulo para dejarlo sin movimiento en momentos en los que se producen rotaciones bruscas.

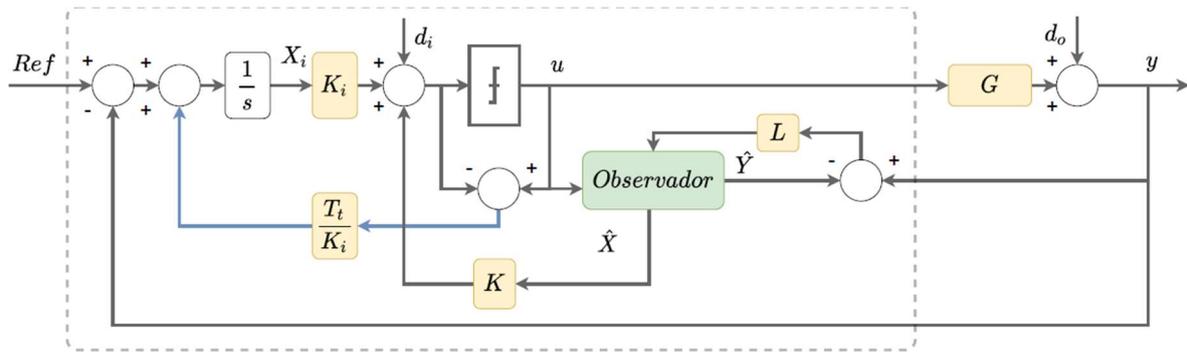


Fig. 15. Sistema de péndulo. Esquema de control por realimentación de estados con observador.

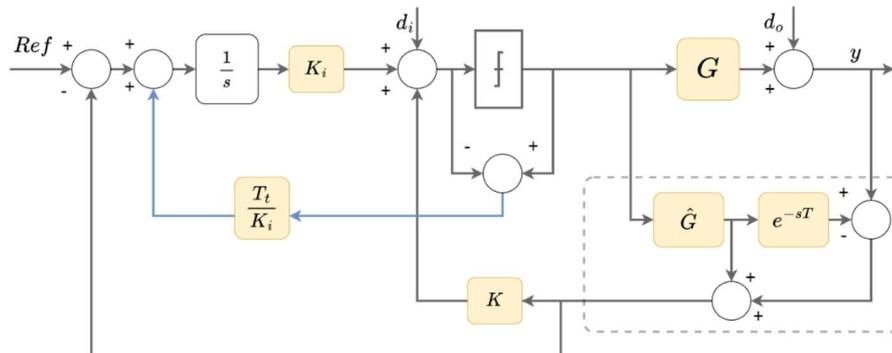


Fig. 16. Sistema térmico. Esquema de control por realimentación de estados con predictor de Smith.

TABLA. III. PREGUNTAS: ENCUESTA DE OPINIÓN.

#	Pregunta
1	El espacio de trabajo para usar el prototipo es adecuado
2	El prototipo trabajó correctamente durante la actividad
3	El prototipo fue fácil de usar
4	La adquisición y visualización de los datos fue adecuada
5	El tiempo de respuesta del prototipo fue adecuada considerando el tiempo disponible para la actividad
6	El prototipo es pertinente para el aprendizaje de los sistemas de control
7	El prototipo permite contextualizar un problema de control real en el laboratorio
8	El prototipo facilitó la comprensión de las temáticas de los sistemas de control
9	El prototipo permite fortalecer la habilidad de aplicar la teoría a la práctica
10	El prototipo permite fortalecer la habilidad del manejo del tiempo
11	El prototipo permite fortalecer la habilidad del manejo de la información
12	El prototipo permite fortalecer la habilidad de resolver problemas

En cuanto al prototipo térmico, se ha mencionado que, si bien es fácil de manejar y muy didáctico en comparación con otros recursos de práctica, los experimentos tardan un tiempo considerable en realizarse lo que representa una dificultad dadas las restricciones de tiempo y acceso a los prototipos.

Si bien han sido pocos los profesores a cargo de los cursos de control mencionados en la sección 0 que han propuesto utilizar el equipo de laboratorio con sus estudiantes, su

posición sobre la experiencia de uso de los prototipos fue consultada a través de una encuesta con preguntas abiertas y cerradas. Las preguntas fueron guiadas para contrastar el desempeño de los recursos de experimentación comparándolos con otros recursos disponibles para desarrollar las actividades del proyecto en los cursos.

TABLA. IV. RESULTADOS: ENCUESTA DE OPINIÓN.

#	PROM. Péndulo	PROM. Térmico
1	3.9	3.9
2	3.6	3.6
3	4.1	3.4
4	3.7	3.6
5	3.8	3.0
6	4.3	4.1
7	4.1	3.8
8	4.0	3.8
9	3.7	3.9
10	3.3	3.2
11	3.9	3.7
12	4.1	3.9
G	3.8	3.7

Las respuestas corresponden a elementos de dificultad identificados por los docentes en diferentes aspectos de usabilidad y pertinencia en el uso de los recursos de experimentación. La TABLA. V muestra los resultados de la revisión con los profesores.

En la TABLA. V, los aspectos numerados corresponden a 1) *desempeño en el desarrollo de las actividades del proyecto*, 2) *desempeño en la calidad de las señales*, 3) *no linealidades*

presentes, 4) *dinámica muy rápida o lenta*, 5) *facilidad de operación*, 6) *seguridad de operación* y 7) *confiabilidad de los equipos*.

TABLA. V. RESULTADOS OPINIONES PROFESORES.

#	Péndulo	Térmico
1	Implementación de controladores	Respuesta lenta. Implementación de controladores.
2	--	--
3	Presencia de zona muerta	--
4	--	Respuesta lenta
5	Switch necesario para cortar corriente	--
6	Switch necesario para cortar corriente	--
7	--	Protección de contacto

Los profesores han manifestado que, en comparación con los diferentes equipos que se han utilizado anteriormente, los recursos de experimentación desarrollados han tenido una respuesta considerablemente buena.

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el desarrollo y validación de equipos de laboratorio portables y de bajo costo como recursos de apoyo a la educación en sistemas de control de ingeniería.

Estos recursos desarrollados fueron un prototipo basado en un péndulo y un prototipo basado en un sistema térmico. Los prototipos fueron fáciles de usar y adquirir, además de didácticos y llamativos para los estudiantes. Los recursos se validaron funcionalmente utilizándolos para el desarrollo de actividades de cursos de sistemas de control de ingeniería, actividades en las cuales demostraron competencia. Estos recursos potencian la práctica, permitiendo el apoyo tanto a las habilidades técnicas; por ejemplo, reforzar la comprensión y la aplicación práctica de los sistemas de control modernos; y habilidades blandas como la resolución de problemas y el trabajo en equipo. La validación de las actividades de análisis y la implementación de algoritmos de control avanzados, como realimentación de estados discreto con observadores y anti embalamiento, se presenta como un aporte adicional en comparación con trabajos reportados previamente.

Como caso de estudio, los prototipos fueron utilizados en las actividades de proyectos de los cursos de control del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle. Como enfoque de usabilidad y pertinencia, se evaluó la aceptación del uso del equipo por parte de estudiantes y profesores a través de encuestas de opinión. La evaluación de usabilidad mostró que los recursos son relevantes para su uso en actividades de educación en cursos de control de ingeniería.

Para trabajos futuros se propone: equipar el sistema de péndulo con un interruptor de encendido y reducir el tiempo de respuesta del sistema térmico para mejorar la usabilidad. Además, para aumentar la accesibilidad, se podrían explorar dispositivos de adquisición modernos y de bajo costo.

REFERENCIAS

[1] José Luis Guzmán, Manuel Berenguel, Sebastián Dormido, and Ramon Costa-Castelló. Using interactive tools to connect theory and practice. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2):9606–9611, 2023.

[2] Jurgen Anders Guerra Ramos, Bruno Albertini, and Javier Solis-Lastra. A Systematic Literature Review on Laboratory as a Service (LaaS). In 2022 IEEE XXIX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), pages 1–4. IEEE, aug 2022.

[3] P. B. de Moura Oliveira, Filomena Soares, and Alberto Cardoso. Pocket-Sized Portable Labs: Control Engineering Practice Made Easy in Covid-19 Pandemic Times. *IFAC-PapersOnLine*, 55(17):150–155, 2022.

[4] Linda S. DeBrunner and Victor DeBrunner. Engaging Students in an Introductory Circuits Course. In 2023 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pages 1–5. IEEE, may 2023.

[5] Fulvio Corno, Luigi De Russis, and Juan Pablo Sáenz. Computational notebooks to support developers in prototyping IoT systems. *International Journal of Human-Computer Studies*, 165:102850, sep 2022.

[6] M.D. Abdulrahman, N. Faruk, A.A. Oloyede, N.T. Surajudeen-Bakinde, L.A. Olawoyin, O.V. Mejabi, Y.O. Imam-Fulani, A.O. Fahm, and A.L. Azeez. Multimedia tools in the teaching and learning processes: A systematic review. *Heliyon*, 6(11):e05312, nov 2020.

[7] V. Hayashi, J. Dutra, F. Almeida, R. Arakaki, E. Midorikawa, S. Canovas, P. Cugnasca, and W. Ruggiero. Implementation of PjBL With Remote Lab Enhances the Professional Skills of Engineering Students. *IEEE Transactions on Education*, 66(4):369–378, aug 2023.

[8] John Anthony Rossiter, Christos G. Cassandras, Joao Hespanha, Sebastian Dormido, Luis de la Torre, Gireeja Ranade, Antonio Visioli, John Hedengren, Richard M. Murray, Panos Antsaklis, Francoise Lamnabhi-Lagarigue, and Thomas Parisini. Control education for societal-scale challenges: A community roadmap. *Annual Reviews in Control*, mar 2023.

[9] P.B. de Moura Oliveira, John D. Hedengren, and J.A. Rossiter. Introducing Digital Controllers to Undergraduate Students using the TCLab Arduino Kit. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2):17524–17529, 2020.

[10] Dömény, M. F., Szűcs, T. D., Drexler, D. A., & Kovács, L. (2023). Mastering Control: A Digital Toolkit for Understanding PID Controllers. 2023 IEEE 23rd International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI), 000019–000024. <https://doi.org/10.1109/CINTI59972.2023.10381906>.

[11] Katarina Zakova and Richard Balogh. Control Engineering Home Learning Kit. *IFAC-PapersOnLine*, 55(4):310–315, 2022.

[12] Inc. The MathWorks. Matlab, general description, 2023. [Online; retrieved on november 28, 2023].

[13] Christian Nomesqui Galvis, Harold Chavarro Medina, and Jonathan Alvarez Ariza. Design and implementation of a low-cost remote tank control system for engineering and technology education. In 2021 International Symposium on Accreditation of Engineering and Computing Education (ICACIT), pages 1–4. IEEE, nov 2021.

[14] Tran, K., Nguyen, T., Ramirez, R., Utschig, T., Tekes, C., & Tekes, A. (2023). Two New Open Source Devices for Project-Based Learning in Controls. *SoutheastCon 2023*, 341–347. <https://doi.org/10.1109/SoutheastCon51012.2023.10115159>.

[15] Young, V., Cho, S., Talley, C., Voicu, R. C., Tekes, C., & Tekes, A. (2024). A Modular Control Lab Equipment and Virtual Simulations for Engineering Education. *SoutheastCon 2024*, 717–721. <https://doi.org/10.1109/SoutheastCon52093.2024.10500097>.

[16] Anthony Rossiter, Atanas Serbezov, Antonio Visioli, Katarina Zakova, and Mikulas Huba. A survey of international views on a first course in systems and control for engineering undergraduates. *IFAC Journal of Systems and Control*, 13:100092, sep 2020.

[17] N.A. Kheir, K.J. Astrom, D. Auslander, K.C. Cheok, G.F. Franklin, M. Masten, and M. Rabins. Control systems engineering education. *Automatica*, 32(2):147–166, feb 1996.

[18] Grupo de investigación en Control (GICI) Industrial. Fundamentos de control de sistemas lineales, guía del estudiante, 2012.

[19] Grupo de investigación en Control (GICI) Industrial. Análisis y compensación de sistemas lineales, guía del estudiante, 2012.

[20] National Instruments Corp. What is MyDAQ, 2023. [Online; retrieved on november 28, 2023].

[21] Omer Saleem, Mohsin Rizwan, Agha Ali Zeb, Abdul Hannan Ali, and Muhammad Ahmad Saleem. Online adaptive PID tracking control of an aero-pendulum using PSO-scaled fuzzy gain adjustment mechanism. *Soft Computing*, 24(14):10629–10643, jul 2020.