

Jornadas de Automática

Plataforma *Ball and Beam* de bajo coste como apoyo a la enseñanza de conceptos introductorios de modelado y control automático

Fernando Cañadas-Aránega^{a,*}, Igor M.L. Pataro^a, Enrique Rodríguez-Miranda^a, Juan D. Gil^a, José L. Guzmán^a

^aUniversidad de Almería, Centro Mixto CIESOL, ceia3, Ctra.Sacramento s/n, 04120, Almería, España

To cite this article: Cañadas-Aránega, F., Pataro, I.M.L., Rodríguez-Miranda, E., Gil, J.D., Guzmán, J.L. 2026. A Low-Cost Ball and Beam Platform for Teaching Introductory Concepts of Modelling and Automatic Control. *Jornadas de Automática*, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13763>

Resumen

Este trabajo presenta una plataforma *Ball and Beam* de bajo coste junto con una metodología docente orientada a la enseñanza introductoria de ingeniería de control. La propuesta busca aumentar la motivación y el contacto temprano del alumnado con sistemas físicos reales, reduciendo la barrera asociada a enfoques puramente teóricos. La metodología adopta una aproximación progresiva, basada en la experimentación con la planta, antes de abordar el modelado y el diseño de controladores. Para ello, se desarrolla una maqueta *open-source*, replicable mediante impresión 3D y hardware de bajo coste, integrada con *Matlab/Simulink* mediante una arquitectura que permite el control en tiempo real. Como mejora técnica, se incorpora un sensor infrarrojo *Time-of-Flight* (ToF) en sustitución de sensores ultrasónicos convencionales, mejorando la adquisición de datos de la posición de la bola. Los resultados experimentales validan la implementación de actividades de modelado y control en la plataforma real, lo que favorece metodologías docentes basadas en el aprendizaje activo y la experimentación continua. La propuesta constituye un recurso educativo abierto, replicable y fácilmente integrable en cursos iniciales de automática y control.

Palabras clave: Educación en Control, Ingeniería de control, Recurso Educativo Abierto

A Low-Cost Ball and Beam Platform for Teaching Introductory Concepts of Modelling and Automatic Control

Abstract

This paper presents a low-cost Ball and Beam platform, together with a methodological proposal for the basic concepts of control engineering. The aim is to increase students' motivation and provide them with early exposure to real physical systems, thereby reducing the barrier associated with traditional theoretical approaches. The methodology proposes a progressive approach, based on experimental practice with the plant, before moving on to modelling and controller design. To this end, an open-source model is developed, replicable via 3D printing and low-cost hardware, integrated with Matlab/Simulink through a real-time control architecture. As a technical improvement, the ultrasonic sensor is replaced by an infrared sensor, increasing the accuracy of the ball's position. Experimental tests validate the implementation of modelling and control techniques applicable to teaching practices in automatic control. The proposal facilitates the conduct of practical activities in modelling, identification and control, promoting teaching methodologies based on active learning and continuous experimentation in introductory courses in automatic control.

Keywords: Control Education, Control Engineering, Open Educational Resource

*Autor para correspondencia: fernando.ca@ual.es

1. Introducción

La ingeniería de control es una disciplina transversal en la industria actual y resulta esencial en ámbitos que abarcan desde la regulación de procesos químicos hasta la navegación de sistemas autónomos (Stefanovic et al., 2011). Sin embargo, su enseñanza en las etapas iniciales de la formación universitaria suele verse obstaculizada por la dificultad de relacionar la abstracción y el análisis matemático de sistemas dinámicos con su interpretación física en plantas reales. Este proceso es aún más acentuado en los estudiantes de primer año o en la primera toma de contacto de los alumnos sin experiencia. Aunque los laboratorios en las universidades suelen estar compuestos por maquetas, plataformas didácticas comerciales y/o industriales, estas presentan barreras significativas, tales como su elevado coste de adquisición y mantenimiento, así como el de sus sistemas de control cerrados, lo que limita el acceso del alumnado a experiencias prácticas continuas y flexibles de modelado y control (Tran et al., 2022).

Para resolver esta limitación, en la última década ha emergido un movimiento orientado al desarrollo de recursos educativos y de hardware abierto, que abarca desde el diseño de maquetas con recursos interactivos (Guzmán et al., 2023; González-Hernández et al., 2024) hasta el diseño de ejercicios prácticos basados en la resolución de problemas (Cañadas-Aránega et al., 2025). Entre los diversos tipos de maquetas de laboratorio, el sistema *Ball and Beam* se ha consolidado como una de las más utilizadas en las universidades debido a su naturaleza intuitiva, su fácil construcción y desarrollo, y a que permite implementar de forma sencilla distintas estrategias de control sobre una planta real segura y compacta (Takács et al., 2021; Sutura et al., 2026).

En este contexto, el presente trabajo propone una plataforma *Ball and Beam* de bajo coste junto con una metodología docente orientada a fomentar la experimentación práctica en asignaturas de modelado y control dentro del área de Ingeniería de Sistemas y Automática, y cuyo desarrollo se enmarca dentro del proyecto CE2Labs (Unlocking the Development and Experiences of Control Education Labs) financiado por IFAC Activity Funds. La maqueta ha sido desarrollada mediante hardware abierto, impresión 3D y herramientas ampliamente accesibles en entornos universitarios, como *Arduino* y *Matlab/Simulink*, con el objetivo de ofrecer una solución accesible, replicable y fácilmente integrable en laboratorios docentes. Además, se incorporan mejoras de diseño e instrumentación respecto a las plataformas abiertas existentes, destacando el uso de un sensor láser de tiempo de vuelo (ToF) de bajo coste para reducir el ruido de medición y mejorar la precisión en la adquisición de la posición de la bola. Para facilitar la interacción con la maqueta, se emplea una interfaz gráfica en *Matlab/Simulink* conectada en tiempo real a la planta, lo que permite supervisar variables, aplicar señales de prueba e implementar estrategias de control en un entorno visual e intuitivo.

Por otro lado, la propuesta metodológica invierte parcialmente la secuencia tradicional empleada en numerosas asignaturas de automática, en la que el estudio del modelado y del

control suele preceder al contacto experimental con la planta. En este trabajo, se prioriza inicialmente la interacción directa del alumnado con la maqueta para que comprenda de forma intuitiva la dinámica del sistema antes de abordar su formulación analítica. Posteriormente, se desarrolla y valida un modelo basado en primeros principios, identificando limitaciones físicas asociadas a sensores y actuadores, como ruido, rozamiento o retardos (Ariza and Galvis, 2023). Finalmente, *Matlab/Simulink* permite implementar y ajustar distintas estrategias de control en un sistema real e inherentemente inestable, lo que favorece metodologías docentes basadas en el aprendizaje activo y la experimentación continua.

De esa manera, las principales contribuciones de este trabajo son: i) la propuesta de una plataforma *Ball and Beam* de bajo coste y alta replicabilidad; ii) la incorporación de un sensor ToF de bajo coste para mejorar la adquisición de datos de posición frente a soluciones convencionales basadas en ultrasonidos, iii) la integración de una arquitectura de control en tiempo real con interfaces y comunicación con *Matlab/Simulink* orientada a actividades docentes; iv) una metodología de enseñanza progresiva basada en la experimentación previa al modelado matemático.

El resto del trabajo está organizado como se indica a continuación. La sección 2 describe el diseño y el desarrollo de la maqueta. La propuesta metodológica para el modelado y el control del *Ball and Beam* se describe en la sección 3. La sección 4 expone la implementación y validación experimental de los resultados. Por último, en la sección 5 se presentan las principales conclusiones y trabajos futuros del trabajo.

2. Diseño y Desarrollo del Kit Educativo

En esta sección se describe la fabricación del modelo del *Ball and Beam*. Toda la información sobre la impresión, las dimensiones y el montaje para su debida replicación se encuentra en el repositorio oficial de GitHub¹.

2.1. Diseño y fabricación del *Ball and Beam*

El diseño del prototipo tomó como referencia la propuesta de OlegKor². Sin embargo, el modelo original requirió modificaciones por dos motivos principales: en primer lugar, para adaptar el hardware propuesto en este artículo, centrado en la mejora de la toma de medidas, y, en segundo lugar, para corregir deficiencias detectadas en la estabilidad física y las vibraciones de la plataforma. En particular, se optó por sustituir los enfoques tradicionales basados en sensores ultrasónicos debido al elevado nivel de ruido y variabilidad que estos suelen introducir en la medición de la posición. En su lugar, se ha decidido utilizar un sensor VL53L0X ubicado en el centro del soporte de tope final de la viga. Este sensor estima, mediante tecnología ToF, la distancia a la bola con un solo rayo infrarrojo. Para llevar a cabo esta implementación, se adaptó la pieza disponible en el repositorio mencionado previamente. Para la impresión, se utilizó el filamento de ácido poliláctico (PLA) 850 por su facilidad de impresión, su resistencia mecánica y su bajo coste. La maqueta con la que se realizará la propuesta se muestra en la Figura 1.

¹Repositorio oficial: https://github.com/FerCanAra/Ce2Lab_ball_and_beam

²Repositorio OlegKor: <https://www.thingiverse.com/thing:6387659>

Figura 1: Modelo real de la maqueta propuesta *Ball and Beam*

2.2. Hardware de adquisición y coste de fabricación

Con el objetivo de minimizar los costes de implementación sin comprometer la funcionalidad del sistema, se seleccionaron los siguientes componentes de hardware:

- Microcontrolador ATmega328P: Para el uso de esta propuesta, se requiere un microcontrolador que soporte el protocolo *Inter-Integrated Circuit* (I2C) para comunicarse con el sensor. Por ello, se empleó una placa de desarrollo *Arduino Nano* que integra el microcontrolador ATmega328P, manteniendo así prestaciones útiles para comunicación rápida serial y bajo costo de adquisición.
- Servomotor MG996R: Este actuador opera a 5 V y proporciona un par de torsión de 3.8 kg·cm, valor suficiente para manejar la inercia de la viga y de la bola. Presenta un rango de giro operativo de 0° a 180°.
- Sensor VL53L0X: Su tecnología ToF permite medir la posición de la bola con alta precisión en un rango operativo de 2 cm a 60 cm, superando las limitaciones de los sensores ultrasónicos convencionales en cuanto a resolución y cono de detección.

En la Figura 2 se detalla el esquema de interconexión del hardware, mientras que el desglose económico del sistema completo se presenta en la Tabla 1.

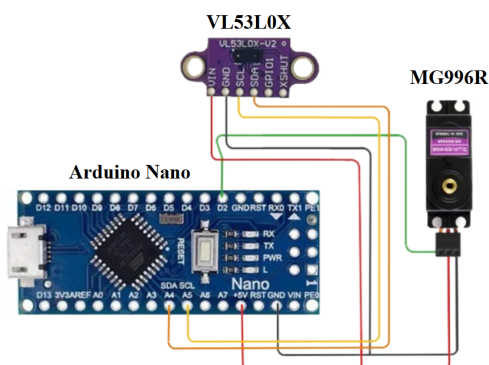


Figura 2: Conexión hardware

Tabla 1: Coste por maqueta

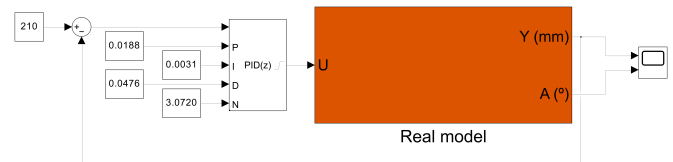
Componente	Precio (€)	Componente	Precio (€)
<i>Arduino Nano</i>	3.3	VL53L0X	1.0
MG996r	6.0	Cables	0.5
PLA 850 (341 g)	6.5	Comp. extra	0.5
Total	17.3 €		

2.3. Entorno de trabajo basado en Simulink

La integración con el entorno *Simulink* se basa en la implementación de la librería de comunicación por puerto serie de *MATLAB*, disponible en el gestor de complementos (*Add-On Explorer*). Esta interfaz se gestiona en *Simulink* mediante un bloque de configuración específico que actúa como puente de datos con el *Arduino*. El flujo operativo del sistema se estructura en las siguientes etapas:

1. Adquisición de datos del sensor: El firmware embebido en el microcontrolador utiliza la librería VL53L0X para determinar la distancia en milímetros y enviarla por el puerto serie.
2. Procesamiento de la acción de control: *Simulink* computa, en cada instante de tiempo, la ley de control necesaria para determinar el ángulo del actuador que cumpla con los requisitos de diseño en lazo cerrado.
3. Escritura en el actuador: La señal de control calculada se envía al microcontrolador por el puerto serie y se escribe en el actuador mediante la librería *Servo*.

El diagrama de bloques utilizado en *Simulink* se ilustra en la Figura 3, donde se detalla la arquitectura de control que se analizará en la sección posterior.

Figura 3: Esquema de control en *Simulink*

El proyecto desarrollado constituye una plataforma experimental de bajo coste (un total de 17.3 €) y elevada replicabilidad para laboratorios docentes de ingeniería, facilitando su implementación en universidades y centros educativos. En comparación con otras plantas didácticas convencionales, como sistemas de tanques interconectados o sistemas térmicos, la plataforma *Ball and Beam* presenta varias ventajas para la enseñanza de la automática: respuesta dinámica rápida, interacción visual inmediata y una implementación sencilla, entre otras. Además, al no requerir gestión de fluidos, elevadas potencias térmicas ni mantenimiento especializado, el sistema facilita su integración en actividades prácticas de laboratorio y favorece metodologías docentes basadas en experimentación continua. Su reducido coste y portabilidad permiten incluso que los estudiantes utilicen la maqueta fuera del laboratorio, ampliando el acceso a la experimentación práctica y favoreciendo entornos de aprendizaje más flexibles.

3. Metodología docente para el modelado y control usando la maqueta *Ball and Beam*

En esta sección se presenta la metodología docente propuesta para la enseñanza del modelado y del control mediante la plataforma *Ball and Beam* desarrollada en este trabajo. La metodología adopta un enfoque experimental e intuitivo, en el que el estudiante interactúa inicialmente con la planta física antes de abordar su formulación matemática. Gracias a la dinámica rápida y visual del sistema, la plataforma permite desarrollar actividades prácticas basadas en la interacción continua con la maqueta y en la observación directa de su comportamiento.

La propuesta metodológica se estructura en tres etapas principales para la práctica con la maqueta *Ball and Beam*:

1. *Caracterización experimental del sistema*: El alumno realiza ensayos con señales escalón, impulso y, principalmente, periódicas, para comprender intuitivamente la relación entre la acción de control aplicada y el movimiento de la bola.
2. *Validación mediante modelado basado en primeros principios*: A partir de las observaciones experimentales, el estudiante desarrolla un modelo simplificado del sistema y compara la respuesta teórica con los datos obtenidos en la planta real.
3. *Implementación de estrategias de control*: Finalmente, se diseñan e implementan controladores Proporcional, Integral y Derivativo (PID) en *Matlab/Simulink* y se evalúa experimentalmente el comportamiento del sistema en lazo cerrado.

3.1. Caracterización experimental del sistema

El primer paso de la práctica consiste en realizar experimentos guiados en *Matlab/Simulink* mediante la aplicación de señales escalón e impulso al sistema *Ball and Beam*. El objetivo es que el estudiante comprenda experimentalmente la relación entre la acción de control aplicada y la respuesta física observada antes de abordar el modelado matemático del sistema.

Inicialmente, se aplica una señal escalón al servomotor para analizar el efecto de la variable manipulada sobre la inclinación de la viga. Posteriormente, se estudia cómo el ángulo de inclinación, $\alpha(t)$, modifica la dinámica de la bola, relación que puede representarse de forma simplificada como

$$u(t) \rightarrow \alpha(t) \rightarrow \ddot{x}_b(t) \rightarrow \dot{x}_b(t) \rightarrow x_b(t).$$

donde $\ddot{x}_b(t)$, $\dot{x}_b(t)$ y $x_b(t)$ representan la aceleración, la velocidad y la posición de la bola, respectivamente. De este modo, el alumnado observa el comportamiento inestable del sistema en lazo abierto y comprende intuitivamente la dinámica integradora del *Ball and Beam*. Esta etapa motiva al estudiante a experimentar con diferentes señales de excitación, como impulsos o señales periódicas, a fin de analizar las respuestas dinámicas dentro del rango operativo de la maqueta. Todos los experimentos se complementan con la adquisición y visualización en tiempo real de señales mediante la comunicación entre *Matlab/Simulink* y la plataforma *Arduino*, lo que permite combinar la observación física del sistema con el análisis cuantitativo de su comportamiento dinámico.

3.2. Modelado basado en primeros principios

Tras la caracterización experimental, el alumnado desarrolla un modelo simplificado del sistema con el objetivo de relacionar la respuesta observada en la planta con su formulación analítica. Tómese como base el esquema representado en la Figura 4.

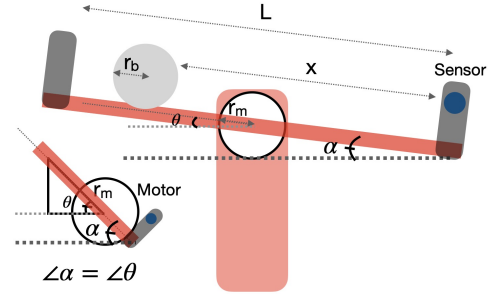


Figura 4: Esquema para modelado del sistema *Ball and Beam*

Aplicando las ecuaciones de Newton-Euler a una bola que rueda sin deslizamiento sobre una viga inclinada, y considerando despreciables la fricción y la resistencia a la rodadura, el movimiento de la bola viene gobernado por

$$\left(\frac{I_b}{r_b^2} + m \right) \ddot{x}(t) = m g \sin(\alpha(t)) \quad (1)$$

donde m y r_b son la masa y el radio de la bola, I_b su momento de inercia, g la aceleración de la gravedad y α el ángulo de inclinación de la viga. Para una esfera maciza ideal, $I_b = \frac{2}{5} m r_b^2$, lo que permite simplificar la ecuación (1) a $\ddot{x}(t) = K_b \sin(\alpha(t))$, $K_b = \frac{5g}{7} \approx 7,01$, donde K_b agrupa las constantes físicas asociadas a la dinámica de la bola sobre la viga. Utilizando la aproximación de pequeños ángulos, $\sin(\alpha(t)) \approx \alpha(t)$, el modelo linealizado en el dominio de Laplace queda expresado como

$$\frac{X(s)}{\alpha(s)} = \frac{K_b}{s^2} \quad (2)$$

La formulación anterior permite identificar, teóricamente, el comportamiento de doble integrador característico del sistema *Ball and Beam* y relacionar el modelo matemático con las observaciones experimentales previamente realizadas.

3.3. Métodos para el control del sistema

Una vez validado el modelo dinámico, el alumnado aborda el diseño de controladores clásicos para el sistema *Ball and Beam*. Debido al comportamiento integrador de la planta, se implementan reguladores PID orientados al cumplimiento de especificaciones en lazo cerrado, como el tiempo de establecimiento, la sobreoscilación y el error estacionario.

Inicialmente, el controlador se diseña y evalúa en *Matlab/Simulink* utilizando únicamente el modelo del sistema. Posteriormente, se implementa en la maqueta física para comparar la respuesta simulada con el comportamiento real de la planta mediante la comunicación con el *Arduino*.

Aunque la metodología se centra en controladores PID por su relevancia en cursos introductorios, la plataforma puede extenderse a asignaturas más avanzadas mediante técnicas como el Control Lineal Cuadrático (LQR), el Control Predictivo (MPC) u otras estrategias de control digital.

Las etapas propuestas en esta metodología docente se implementarán y se validarán experimentalmente en la maqueta presentada en la Sección 2.

4. Implementación y validación experimental

En esta sección se presenta la validación experimental de la plataforma desarrollada. Para ello se han realizado dos campañas de ensayos sobre el sistema físico: una primera de caracterización en lazo abierto, destinada a la identificación de los parámetros del modelo, y una segunda en lazo cerrado, para evaluar el desempeño del controlador PID diseñado. En ambas se ha registrado simultáneamente la respuesta de la planta real y la de los modelos teóricos lineal y no lineal simulados en *Matlab/Simulink*, lo que permite cuantificar el grado de representatividad de los modelos teóricos.

4.1. Ajuste y validación del modelo del sistema

Para disponer de un modelo dinámico representativo de la maqueta, se aplicaron ensayos de escalón en lazo abierto. Partiendo de la viga horizontal con la bola en reposo cerca del centro, se introdujo una variación brusca del ángulo α del servomotor y se registró la trayectoria de la bola hasta alcanzar un extremo de la viga. Los ensayos se realizaron con escalones de distintas magnitudes y signos para excitar al sistema en ambos sentidos y dotar a la identificación de información suficiente para discriminar tanto la ganancia K_b como el ángulo de equilibrio real del servomotor.

El ajuste de los parámetros se ha planteado como un problema de optimización no lineal en el que se minimiza el error cuadrático entre la trayectoria medida y la simulada por el modelo lineal sobre el conjunto de experimentos. Los dos parámetros identificados son la ganancia efectiva del modelo K_b , que engloba la inercia rotacional de la bola y la gravedad, y el ángulo inicial del servo θ_{off} , que corrige el desalineamiento entre el cero teórico del motor (a depender del montaje del servomotor en la maqueta) y la posición física en la que la viga queda realmente horizontal. La optimización se ha resuelto con la función `fmincon` de *Matlab*, partiendo del valor teórico $K_b = \frac{5g}{7} \approx 7.01$ y refinando hasta converger.

En la figura 5 se muestran seis de los ensayos empleados en la identificación, comparando la respuesta real con las predicciones de los modelos lineal y no lineal una vez calibrados. Puede observarse que ambos modelos reproducen con elevada precisión la dinámica de la bola en los tres experimentos en sentido positivo (Experimentos 1-3) y en los tres en sentido negativo (Experimentos 4-6). El solapamiento entre el modelo lineal y el no lineal es prácticamente total en todos los casos, lo que confirma que en el rango de ángulos empleado ($\pm 5^\circ$ respecto al equilibrio) el término no lineal $\sin(\alpha)$ y el término centrífugo $m \times \dot{\alpha}^2$ aportan una contribución despreciable frente al término dominante. Esta observación justifica el uso del modelo lineal para el diseño posterior del controlador.

Los valores identificados fueron $\theta_{off} = 85^\circ$ y $K_b = 4.7854$. Nótese que K_b es sensiblemente inferior al valor teórico $5g/7 \approx 7.01$, que asume una esfera maciza ideal rodando sin pérdidas. Dos factores explican esta discrepancia: por un lado, la bola utilizada es hueca, por lo que su momento de inercia es mayor que el de una esfera maciza de la misma masa, lo que reduce la aceleración efectiva; por otro lado, la fricción de rodadura entre la bola y la viga disipa energía, contribuyendo también a una respuesta más lenta que la predicha por el modelo idealizado.

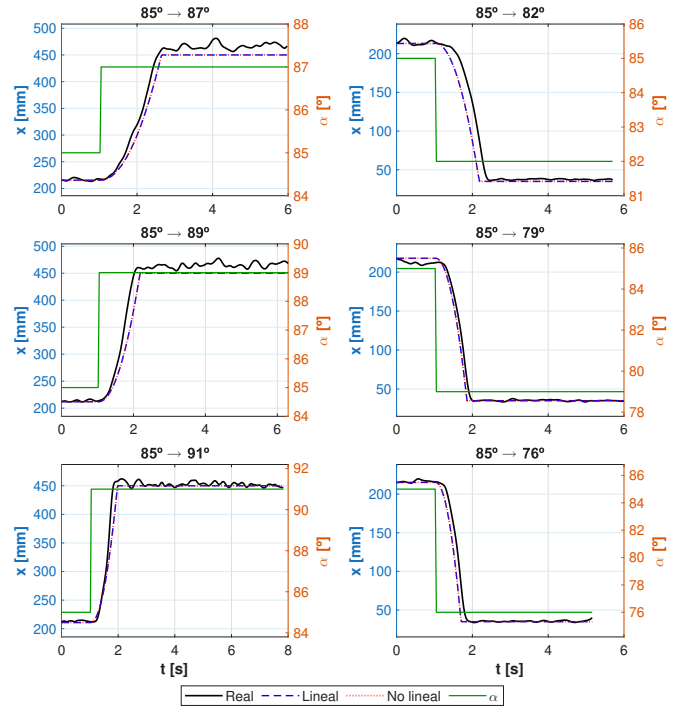


Figura 5: Ensayo de escalón y calibración de los modelos lineales y no lineales a partir de $\theta_{off} = 85^\circ$.

4.2. Implementación de controladores tipo PID

Una vez identificada la dinámica de la planta, se diseñó un controlador PID para estabilizar la posición de la bola en torno a una referencia deseada. Dado que la planta linealizada corresponde a un doble integrador con ganancia K_b , las ganancias del PID se obtienen de forma analítica mediante asignación de polos en lazo cerrado, parametrizando el diseño en términos de la frecuencia natural ω_n y el coeficiente de amortiguamiento ζ . Esta formulación, implementada mediante una función de *Matlab*, sustituye la sintonía manual de K_p , K_i y K_d por dos parámetros con interpretación física directa.

Para los ensayos presentados se han utilizado los parámetros de diseño $\omega_n = 0.32$ rad/s y $\zeta = 0.8$, junto con la ganancia identificada $K_b = 4.7854$. Los valores moderados de ω_n vienen impuestos por las limitaciones físicas del actuador, ya que un ancho de banda mayor obliga al servo a operar permanentemente en saturación. Las ganancias resultantes son $K_p = 0.0188$, $K_i = 0.0031$, $K_d = 0.0476$ y un filtro derivativo con coeficiente $N = 3.0720$. El controlador incluye además anti-windup basado en *back-calculation* para gestionar los periodos en los que la acción de control satura el rango admisible del servo, siendo el coeficiente de seguimiento $bc = 0.1649$.

La Figura 6 muestra el comportamiento del sistema en un ensayo representativo, donde se compara la respuesta de la planta real con la de los modelos teóricos lineal y no lineal sometidos a la misma secuencia de referencias. El ensayo consta de tres fases. En la primera, entre $t \approx 2$ s y $t \approx 5$ s, se introduce manualmente una perturbación únicamente al sistema real, desplazando la bola del punto de equilibrio para evaluar la capacidad de rechazo del controlador. Una vez liberada la bola, el sistema la reconduce al *setpoint* inicial de 210 mm en aproximadamente 4 segundos. En la segunda fase, en $t \approx 10$ s, se aplica un cambio de referencia a 150 mm, y en la tercera, en $t \approx 17$ s, se vuelve al valor inicial de 210 mm.

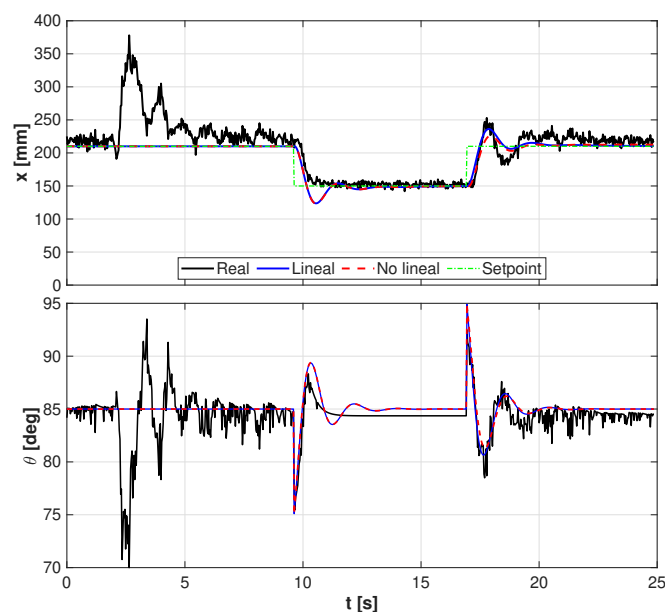


Figura 6: Ensayo de control y comparativa en simulación.

Los modelos simulados predicen con precisión la respuesta ante los cambios de *setpoint*, incluyendo el ligero sobrepaso inicial y el tiempo de establecimiento. Sin embargo, en la señal real se aprecia un ruido de medida significativo procedente del sensor VL53L0X, que el controlador propaga hacia la señal de actuación del servo. Este efecto es especialmente visible en la fase de perturbación manual, donde las pequeñas oscilaciones de la bola se amplifican en el comando del servo a través de la rama derivativa del PID. Pese a ello, el lazo mantiene la estabilidad y converge al *setpoint* en todos los casos, lo que valida tanto el procedimiento de identificación como el diseño analítico del controlador.

La comparación entre la planta real y los modelos demuestra además el valor pedagógico de la plataforma. El alumno puede contrastar directamente la respuesta teórica con la experimental, identificar las fuentes de discrepancia (ruido de sensor, fricción no modelada, holguras mecánicas) y comprender que el diseño de un sistema de control no se reduce al cálculo de ganancias sobre un modelo ideal, sino que requiere considerar las limitaciones físicas del sistema real.

5. Conclusiones

El presente trabajo demostró la viabilidad de desarrollar una plataforma *Ball and Beam* de bajo coste para la enseñanza experimental de modelado y control mediante impresión 3D, hardware abierto y herramientas accesibles como *Arduino* y *Matlab/Simulink*. Asimismo, la integración del sensor láser ToF permitió mejorar la calidad de las medidas de posición respecto a soluciones basadas en sensores ultrasónicos convencionales.

Desde el punto de vista docente, la metodología propuesta prioriza la interacción experimental con la planta física antes del modelado y del diseño de controladores, lo que permite al alumnado relacionar de forma intuitiva el comportamiento observado con los modelos dinámicos y las estrategias de control implementadas. Además, la comparación entre la simulación y la planta real facilita la identificación de limitaciones prácticas asociadas a sensores, actuadores y dinámicas no modeladas.

Finalmente, la plataforma desarrollada constituye un recurso docente abierto, replicable y fácilmente integrable en cursos introductorios de automática y control. Como trabajo futuro, se plantea extender la plataforma a técnicas de control avanzado y validar experimentalmente su impacto docente en asignaturas del Grado en Ingeniería.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto C2Labs-Unlocking the Development and Experiences of Control Education Labs, financiado por el IFAC Activity Fund. El primer autor, Fernando Cañadas-Aránega, es beneficiario de una beca FPI (PRE2022-102415) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España.

Referencias

- Ariza, J. Á., Galvis, C. N., 2023. Raspycontrol lab: A fully open-source and real-time remote laboratory for education in automatic control systems using raspberry pi and python. *HardwareX* 13, e00396.
- Cañadas-Aránega, F., Barrientos, A., Berenguel, M., Moreno, J. C., Rodríguez, F., 2025. Aprendizaje basado en problemas para enseñanza de sistemas de tiempo real con ada. *Jornadas de Automática* (46).
- González-Hernández, J., Cañadas-Aránega, F., Hoyo, Á., Otálora, P., Pataro, I., Vergel, J. D. G., 2024. Escape room en ingeniería de control: Una aventura gamificada desarrollada en la universidad de almería. *Jornadas de Automática* (45).
- Guzmán, J. L., Costa-Castelló, R., Berenguel, M., Dormido, S., 2023. Automatic control with interactive tools.
- Stefanovic, M., Cvijetkovic, V., Matijevic, M., Simic, V., 2011. A labview-based remote laboratory experiments for control engineering education. *Computer Applications in Engineering Education* 19 (3), 538–549.
- Sutera, G., Guastella, D. C., Cancelliere, F., Muscato, G., 2026. Design and implementation of a ball and beam control system using a pid controller. *IEEE Transactions on Education*.
- Takács, G., Mikuláš, E., Vargová, A., Konkoly, T., Šíma, P., Vadovič, L., Bíró, M., Michal, M., Šimovec, M., Gulán, M., 2021. Bobshield: An open-source miniature “ball and beam” device for control engineering education. In: *2021 IEEE Global Engineering Education Conference (EDU-CON)*. IEEE, pp. 1155–1161.
- Tran, L. Q., Radcliffe, P., Wang, L., 2022. A low budget take-home control engineering laboratory for undergraduate. *The International Journal of Electrical Engineering & Education* 59 (2), 158–175.