

Jornadas de Automática

Diseño de un Plóter para el aprendizaje del modelado y control de motores CC

Bauzano, E.^a

^a Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga, C/ Arquitecto Francisco Peñalosa, nº 6, 29071, Málaga, España.

To cite this article: Bauzano, E. 2024. A Plotter design for learning of the modeling and control of DC motors. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10900>

Resumen

Este artículo presenta la adaptación a la metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) de la asignatura de Servoaccionamientos del Máster de Ingeniería Mecánica Avanzada, cursada en la Universidad de Málaga. Para ello, se propone como proyecto controlar el desplazamiento cartesiano en el plano de un instrumento de delineado mediante dos motores CC. Dichos motores están instalados en una estructura mecánica que permite la transmisión de su giro en desplazamiento del instrumento de delineado. Para ello, debe aplicarse los conocimientos teórico-prácticos de teoría de control estudiados durante el curso. En primer lugar, se obtiene y valida un modelo en velocidad de cada motor CC mediante un procedimiento de identificación. A continuación, se resuelve el problema de regulación mediante variables de integración, buscando una reubicación adecuada de los polos. Por último, se plantea resolver el seguimiento en velocidad para trayectorias de perfil trapezoidal. Todos los cambios realizados sobre la asignatura se evaluación en función de los resultados obtenidos por los estudiantes.

Palabras clave: sistemas invariantes en el tiempo, regulación, sistemas de control de movimiento, identificación y métodos de control, educación en control.

Learning space-state model and control of DC motors of a plotter machine

Abstract

This paper introduces the appliance of the Project-Based Learning (PBL) methodology to Servoaccionamientos subject of the Master's program in Advanced Mechanical Engineering at the University of Málaga. For this purpose, the project involves controlling the Cartesian displacement in the plane of a drafting instrument using two DC motors. Such devices are installed in a mechanical structure that allows the transmission from rotation to displacement movement of the drafting instrument. To achieve this, all the control theory knowledge acquired during the course must be applied. First, a speed model for each DC motor is obtained and validated through a system identification procedure. Next, the regulation problem is solved using integration variables, aiming for an appropriate pole relocation. Finally, the speed tracking for trapezoidal profile trajectories is addressed. All changes made to the subject are eventually evaluated based on the results obtained by the students.

Keywords: time-invariant systems, regulation, motion control systems, identification and control methods, control education.

1. Introducción

El Máster de Ingeniería Mecánica Avanzada (MIMA) inició su docencia el curso 2022/2023. La creación de una nueva titulación siempre supone un nuevo reto para los docentes, ya que deben diseñar el material de aprendizaje necesario para que los alumnos adquieran las competencias

requeridas en el programa del máster. En concreto, la asignatura Servoaccionamientos es la única que plantea el aprendizaje de competencias pertenecientes al área de Ingeniería de Sistemas y Automática. La mayoría de alumnos matriculados han cursado titulaciones relacionadas con el área de Mecánica, por lo que los conocimientos adquiridos relativos sobre automática y control suelen ser limitados. Esto

supone un reto aún mayor, ya que la asignatura debe abordar este problema antes de comenzar con la enseñanza de sus propias competencias.

Para minimizar la dificultad del estudiante para adquirir los conocimientos planteados por la asignatura, se plantea la aplicación del método de ABP (Soria, 2015). Este método consiste en resolver un problema teórico de gran envergadura, como el caso de un proyecto. A diferencia del aprendizaje únicamente teórico, con el ABP se construye un prototipo con una utilidad real, lo que motiva al estudiante a resolver el problema. También permite centrar los objetivos de la tarea, así como establecer los conocimientos que se pretenden transmitir. A su vez, el trabajo a nivel de proyecto abre las puertas al aprendizaje activo del alumno o “learning-by-doing”, que consiste en aprender nuevos conceptos de sus propias experiencias o de los problemas que le surjan durante el trabajo (Hackathorn, 2011).

Existen multitud de aplicaciones prácticas que se pueden plantear como proyecto de la asignatura. Sin embargo, deben considerarse algunos requisitos previos a la selección del proyecto. Uno de los más importantes es el económico, ya que se debe proveer del material necesario a los estudiantes para poder realizar todas las tareas. Esto implica que el prototipo de desarrollo debe ser replicable (poder adquirir material para construir varias copias) sin exceder el presupuesto. También debe ser una plataforma accesible, de manera que pueda ser programable y construible sin accesos restringidos.

Existen máquinas prediseñadas pensadas para su uso en proyectos de asignaturas de grado y/o máster. Uno de los kits de desarrollo más extendidos es el de Lego Mindstorms (Afari, 2017). Este producto comercial facilita el diseño mecánico de cualquier proyecto por su gran flexibilidad en cuanto a montaje, y además ofrece piezas especiales para el control como actuadores y sensores. Otro ejemplo puede ser la plataforma TriFinger, consistente en un robot open-source con 3 dedos articulados para el desarrollo de manipulación de precisión (Wuthrich, 2021). También se destaca el iArm, un kit de desarrollo de brazos manipuladores enfocado a inspirar la imaginación de los estudiantes (Chengze, 2022).

Sin embargo, algunos problemas que suelen aparecer en estos kits de desarrollo son, precisamente, los enumerados anteriormente como condiciones de diseño del proyecto de la asignatura: falta de versatilidad tanto mecánica como electrónica y de software, no suelen incluir motores CC (precisamente los estudiados en la asignatura), y altos precios.

Por ello, en este artículo se propone el desarrollo de un proyecto diseñado a medida para construir y controlar una máquina de delineado (en adelante Plotter), que permita realizar trazos sobre una superficie plana. Para ello, se introduce en primer lugar los conocimientos teóricos de control (Martínez-Rodríguez, 2016) necesarios en la sección 2, tal y como se le presenta el estudiante durante la asignatura. Una vez desarrollada la parte teórica y realizados los ejercicios prácticos tanto de simulación como de laboratorio, en la sección 3 se presenta el proyecto Plotter que el estudiante debe desarrollar durante el resto de la asignatura. Tras exponer el contenido de la asignatura, en la sección 4 se explican los cambios realizados desde el curso

2023 al 2024. Por último, en la sección 5 se hace una reflexión sobre el estado actual de la asignatura y posibles mejoras futuras.

2. Estudio teórico de control y modelado

Esta sección resume el contenido teórico presentado en la asignatura en orden cronológico, correspondiendo cada subsección a un tema independiente. Como ya se ha comentado, al estar los alumnos poco familiarizados con la teoría de control, el curso comienza con un tema introductorio a esta área de conocimiento. Esto permite abordar en temas posteriores el estudio de las estrategias de control con las herramientas matemáticas necesarias, tanto para problemas de regulación como de seguimiento. Aunque no se incluyen en este artículo, hay que destacar que la docencia de los conceptos teóricos va acompañada de ejercicios de ejemplo en simulación y prácticas de laboratorio, realizadas en este caso con un motor CC de la marca Alecop (Figura 1) para reforzar los conocimientos de cada tema. Este equipo consiste en un motor CC instalado sobre una bancada fija, sobre cuyo eje se encuentran instalados los sensores empleados por esta asignatura: un sensor potenciométrico con reductora y un tacómetro.

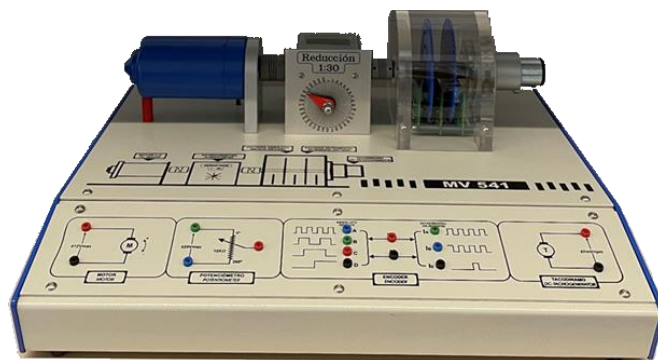


Figura 1: Plataforma de prácticas Alecop MV-541.

2.1 Modelos matemáticos e identificación de sistemas

Inicialmente el estudio se centra en los modelos de sistemas lineales invariantes en el tiempo (o LTI del inglés Linear Time Invariant) con una sola actuación, enfocados tanto en el dominio de tiempo continuo como discreto (este último suele ser el más empleado en Servoaccionamientos). Debe presentarse tanto las ecuaciones diferenciales o en diferencias, que derivan en funciones de transferencia o en el espacio de estados según se emplee la descripción externa (1) o interna (2), respectivamente:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^b + b_1 s^{b-1} + \dots + b_b}{a_0 s^a + a_1 s^{a-1} + \dots + a_a} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2)$$

En (1), $G(s)$ representa la función de transferencia o relación entre la respuesta medida $Y(s)$ y la actuación $U(s)$

como relación de polinomios de grado b en el numerador y a en el denominador, cuyas raíces se denominan ceros y polos, respectivamente. A su vez, (2) denota el espacio de estados o variación del vector de estados x respecto del tiempo y la actuación u , siendo y la respuesta medida. Al ser el espacio de estados LTI, las matrices A (dinámica), B (control), C (salida) y D (influencia directa) no dependen del tiempo. Sin embargo, tendrán una expresión diferente en función de si el espacio de estados está representado en el dominio de tiempo continuo o discreto.

También se recuerda otra manera de representar los modelos matemáticos mediante representación gráfica en forma de diagrama de bloques. Se hace especial hincapié en diferenciar claramente la descripción de un modelo del comportamiento real del sistema, cuestión que los alumnos suelen confundir. Esto puede explicarse con mayor claridad con el método de identificación para sistemas dinámicos de primer y segundo orden. En el caso de la identificación de primer orden con retardo, se propone como método que la respuesta real debe coincidir con el modelo en dos puntos característicos del transitorio. Estos puntos corresponden con los instantes en los que la respuesta alcanza el 25% y el 75% del valor de equilibrio o régimen permanente, denotados t_{25} y t_{75} , respectivamente. La función de transferencia de este modelo viene dada por (3):

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\lambda s} \quad (3)$$

De esta expresión deben obtenerse los parámetros de ganancia K , constante de tiempo τ y retardo λ . La ganancia $K = \Delta Y / \Delta U$ es la variación de la salida tácométrica respecto a la variación de actuación aplicada, ambas en voltios. En cuanto a los parámetros temporales τ y λ , estos pueden obtenerse a partir de las expresiones (4) en función de los instantes de tiempo t_{25} y t_{75} :

$$\tau = 0.910(t_{75} - t_{25}) \quad , \quad \lambda = 1.262t_{25} - 0.262t_{75} \quad (4)$$

Una vez obtenidos los parámetros de la función de transferencia, se presenta el método de conversión al espacio de estados en tiempo discreto, ya que esta representación será la que principalmente se emplee durante el resto de la asignatura.

Este tema termina aclarando que, en la realidad, suelen aparecer efectos no lineales que modifican el comportamiento lineal del servoactuador en ciertas zonas de trabajo como son la zona muerta y la saturación.

2.2 El problema de regulación

El objetivo del problema de regulación consiste en mantener el sistema en el punto de equilibrio correspondiente a las salidas deseadas, independientemente de perturbaciones externas y de las condiciones iniciales. Para ello, previamente se explican algunas propiedades básicas de los sistemas LTI representados en el espacio de estados, como son: controlabilidad, observabilidad, estabilidad, formas canónicas, irreductibilidad y puntos de equilibrio.

Con estos conceptos, se propone controlar el sistema mediante una ley de control en la que se realimenta linealmente el vector de estados según la expresión (5):

$$u = -Hx + r \quad (5)$$

Siendo u la actuación, H la ganancia de realimentación, x el vector de estados y r un vector con las referencias deseadas a alcanzar. Esta ley de control permite reubicar los polos del modelo del sistema con precisión. Existen multitud de métodos para obtener la ganancia de realimentación H . En el curso inicial, se propuso emplear la formulación de Ackermann o la de Bass-Gura para sistemas de una actuación y su extensión a varias actuaciones, así como el método lineal óptimo cuadrático para cualquier cantidad de actuaciones. Para ello, se debe establecer una ubicación para los nuevos polos del sistema. Se facilita al estudiante algunos criterios de selección para reubicar los polos como garantizar la estabilidad, fijar un tiempo de establecimiento, limitar la actuación máxima... Por último, también debe conocerse la forma de obtener la señal de referencia a partir de las ganancias estáticas o, como alternativa, mediante el cambio de origen del espacio de estados. Este último método resulta especialmente útil, ya que permite cambiar la consigna de la referencia al valor del estado en el equilibrio, siempre que se conozca su actuación en el equilibrio correspondiente.

La aplicación de esta ley de control mediante la ganancia H calculada como se ha expuesto presenta un inconveniente importante. En efecto, el cálculo de H permite una reubicación de los polos del modelo. Sin embargo, el sistema real normalmente no coincidirá con el modelo. Así, si se aplica la misma realimentación sobre el sistema real, no se alcanzará la referencia con error nulo en el equilibrio. Para resolver este problema, se propone el uso de variables de integración (VI) que anulen el error en régimen permanente. El método consiste en añadir una variable de estado v mediante la expresión (6), cuya expresión es el error entre la salida y actual y la de equilibrio y_d , según el dominio de tiempo sea continuo o discreto.

$$\dot{v} = y_d - y \quad , \quad v(k+1) = v(k) + y_d - y(k) \quad (6)$$

Con esta nueva VI, el vector de ganancias H puede recalcularse siguiendo el mismo procedimiento que se ha explicado anteriormente. Como salvedad, hay que reubicar el polo asociado a la VI en función de cómo quiera afectarse al comportamiento del sistema. En concreto, si el polo está muy alejado del polo dominante, la VI prácticamente no afectará a la dinámica del sistema, pero el error tardará en corregirse. Al contrario, si el polo de la VI se ubica cerca del polo dominante, el error se corrige más rápido, a costa de variar la dinámica escogida con el polo dominante de la variable de estado del sistema original.

2.3 El problema de seguimiento

A diferencia del problema de regulación, el problema de seguimiento consiste en hacer evolucionar las salidas en el tiempo (o muestreo) conforme a las trayectorias deseadas, las cuales no tienen que estar necesariamente ligadas a puntos de

equilibrio. En este caso, la ley de control empleada se presenta en (7), y consiste en realimentar el error entre el estado actual x del sistema y el deseado x_d mediante el vector de ganancias H y la contribución de una señal de referencia r :

$$u = -H(x - x_d) + r \quad (7)$$

En el problema de seguimiento, el vector de estados deseado se obtiene del modelo directo del sistema, y la referencia r a partir del modelo inverso del sistema. A su vez, el modelo inverso debe recibir como consigna la salida deseada, que corresponde a la trayectoria con la secuencia de estados a los que se desea ir guiando al sistema. Existe una gran variedad de posibles trayectorias, pero en esta asignatura se emplea el perfil trapezoidal, al ser el más simple y ampliamente utilizado en los Servoaccionamientos.

3. Prototipo de la máquina de delineado

Como novedad del presente curso, el prototipo del Plotter que debe ser construido por los alumnos corresponde a la que aparece en la Figura 3. Consiste en una estructura de 2 ejes, cada uno de los cuales sirve de guía para que sendos motores CC con encoders diferenciales desplacen un carro con una transmisión de correa dentada. La detección de fin de carrera se detecta mediante sensores infrarrojos. Un microservo permite la elevación del instrumento de delineado para decidir si pintar durante un desplazamiento. Todo el control se realiza a través de una placa compatible con Arduino. El software empleado para programar la placa es Simulink. La elección de esta herramienta se basa en que permite el diseño gráfico de las estrategias de control de forma gráfica, lo que facilita al alumno la adaptación de las estrategias de control estudiadas en la parte teórica de la asignatura. Tanto la construcción mecánica como el conexionado eléctrico no forma parte de las principales competencias que deben adquirirse en la asignatura, por lo que se ofrece al alumno tutoriales para completar estos pasos.

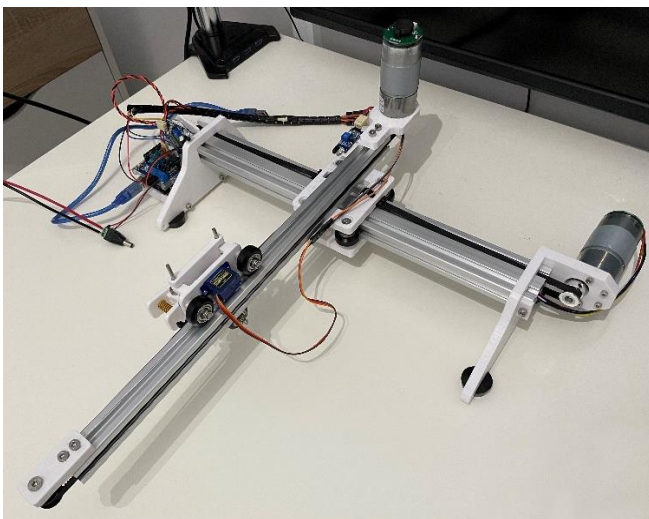


Figura 3: Proyecto final de la asignatura: máquina Plotter.

La selección de los componentes hardware se ha hecho en base a cumplir las especificaciones necesarias para que la máquina realice la tarea objetivo, pero intentando minimizar los costes, ya que debe ofrecerse material para varios puestos de trabajo con un presupuesto limitado.

El estudiante debe aplicar toda la experiencia adquirida durante la asignatura para realizar una estrategia de control de seguimiento de trayectorias con perfil trapezoidal. Cada una de estas trayectorias angulares combinando ambos motores deberá corresponder a un desplazamiento lineal del instrumento de delineado, cuyo trazo podrá ser pintado o no. Así, a partir de una secuencia de posiciones en el plano junto a un valor binario, determinará una secuencia de trazos rectilíneos que conforman el dibujo completo. Debido a la complejidad de combinar esta secuencia de puntos, se facilita al estudiante plantillas tanto este algoritmo como la conversión angular-cartesiana. Así, las tareas a resolver se centran en los objetivos especificados por la asignatura.

A modo ilustrativo, se propone como ejemplo delinear el dibujo esquematizado en la Figura 4. Por un lado, puede observarse la planificación de la secuencia de puntos que va a seguir el delineador. Por otro lado, se presenta el resultado de los trazos que serán dibujados sobre el papel.

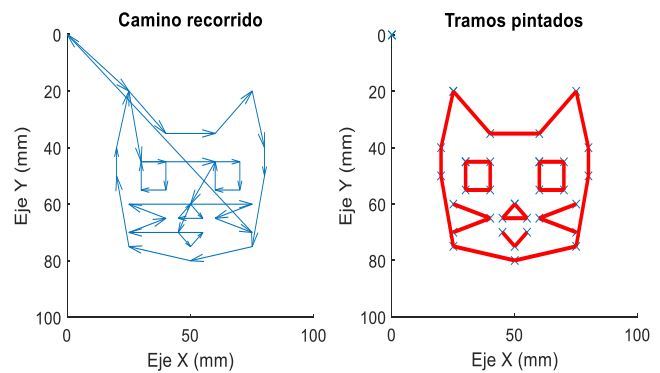


Figura 4: Ejemplo de camino recorrido y delineado final.

Para resolver el problema, se debe aplicar la estrategia de control de seguimiento explicada en la subsección 2.3. Sin embargo, el estudiante debe añadir a dicha estrategia una VI para garantizar un error lo más pequeño posible durante la ejecución de las trayectorias. Para ello, se debe recalcular la ganancia H tal y como se detalló en la subsección 2.2. Como resultado, en la Figura 5.a y 5.b se muestra la secuencia de trayectorias planificadas junto con las realmente ejecutadas por los motores. Esta secuencia ha generado un error en la trayectoria cartesiana como el que aparece en la Figura 5.c. Como puede observarse, el error medio cometido se encuentra en torno a 0.14 mm, lo que puede considerarse un resultado aceptable teniendo en cuenta los materiales utilizados. El aumento en la señal de error hasta los máximos de cada trayectoria trapezoidal se debe a la dinámica impuesta por el polo de la VI, la cual trata de seguir el perfil, pero con cierto retardo por la diferencia de respuesta respecto al polo del estado en velocidad.

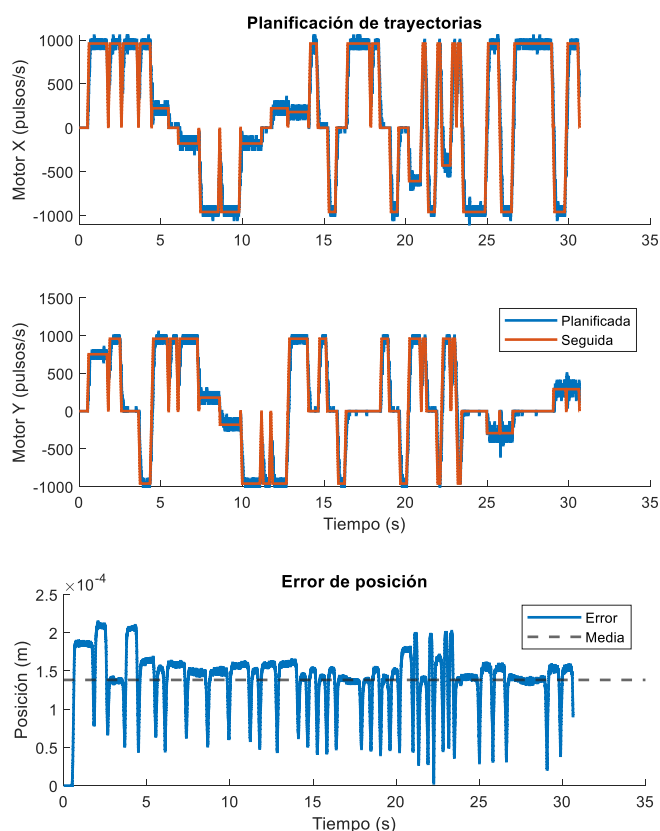


Figura 5: (a) y (b) Secuencia de trayectorias planificada y seguida para cada motor; (c) Evolución del error de la posición cartesiana.

4. Comparativa de cursos y resultados

Como ya se ha comentado, el proyecto Plotter ha sido integrado en la asignatura en el presente curso 2024. El primer curso oficial del MIMA de 2023 se centró en diseñar el material docente necesario para adquirir las competencias marcadas por el plan de ordenación docente. Al tener que incluir una introducción a las competencias relativas a la automática, hubo que reducir el tiempo disponible para los objetivos de la asignatura. Por ello, se propuso una combinación de clases teóricas con ejemplos realizados en simulación, junto con una serie de sesiones prácticas en laboratorio en las que los estudiantes pudieron validar los conocimientos adquiridos en motores CC. Los detalles sobre la presentación de los contenidos teóricos inicialmente establecidos para la asignatura se han presentado en la sección 2. En cuanto a la evaluación, ésta se dividió en: *asistencia* y *participación activa* (30%), *memoria de prácticas* (40%) y *examen final* (30%).

Al finalizar el curso 2023, se realizó una encuesta a los alumnos para que dieran su opinión sobre la metodología de aprendizaje. Las conclusiones principales fueron:

- Dificultad al adquirir los conocimientos teóricos por el cambio de competencias respecto a su formación
- Las prácticas de laboratorio, diseñadas en torno a un motor instalado en una bancada no ofrecían una visualización clara de los resultados que obtenían, al no aplicar el par obtenido del motor sobre ninguna tarea práctica.

c) El peso del contenido teórico era relativamente elevado respecto a las prácticas.

Con esta información, se convocó una reunión del profesorado para abordar los problemas comentados por los alumnos de cara al siguiente curso del MIMA 2023/2024. Se decidió enfocar el aprendizaje a la realización de proyectos, lo que resultó en la inclusión del proyecto Plotter en la asignatura. De esta manera, los alumnos trabajan conociendo claramente y desde un principio cuáles son los objetivos de la asignatura y los conocimientos que deben adquirir. Además, el estudio teórico se ha reducido y coordinado exactamente con los pasos que deben seguir para completar el proyecto. Esto facilita la comprensión, ya que aplican directamente los conceptos aprendidos en teoría sobre el trabajo práctico. En concreto, se ha replanteado la hipótesis del número de actuaciones, de tal manera que sólo se contempla una actuación. La simplificación de los métodos de cálculo de la ganancia de realimentación permite omitir el método lineal óptimo cuadrático.

En cuanto al método de evaluación, el presente curso sigue una división en porcentajes similar a la del curso anterior. Sin embargo, los objetivos evaluados son diferentes:

- La *participación activa* (30%) se evalúa en función de la resolución de los ejercicios de clase y de unos cuestionarios que deben responder al finalizar la explicación de cada tema teórico. Esto aumenta la atención del alumno durante la sesión y refuerza las cuestiones en las que haya fallado. Además, tras esta evaluación se propone un ejercicio de ejemplo con el que aplicar el aprendizaje teórico.
- La *realización de prácticas* (30%) consta de la elaboración de una memoria práctica al igual que el curso anterior. Como novedad, se intercala la sesión de cada práctica justo después de su correspondiente sesión teórica. Esto permite validar y reforzar los conocimientos adquiridos más recientemente en un sistema real.
- El *proyecto final* (40%) consiste en la construcción de la máquina de delineado, integración de las estrategias de control aprendidas en el curso y la defensa del trabajo al finalizar la asignatura. Esta tarea asocia las técnicas de control aprendidas con un objetivo de utilidad, el cual ayuda a justificar la motivación de las competencias adquiridas en la asignatura. Además, se propone realizarlo por parejas y con sesiones de laboratorio libres, en la que los alumnos pueden intercambiar ideas para el desarrollo del proyecto (Santiveri-Morata, 2011).

Tras los cambios realizados en la asignatura, se puede comparar de forma preliminar algunos resultados obtenidos por los estudiantes que ya han podido ser evaluados. Al no haber finalizado el curso 2024 en el momento de escribir este artículo, sólo se puede comparar los resultados de los cuestionarios y prácticas de los alumnos, quedando pendiente la evaluación del proyecto y, por consiguiente, la nota final.

La Figura 6 muestra los resultados promedio del curso 2023 frente a 2024. Las diferencias en la nota final no se tienen en cuenta ya que el curso 2024 no incluye aún los resultados del proyecto final (pendiente de evaluación).

Rendimiento académico

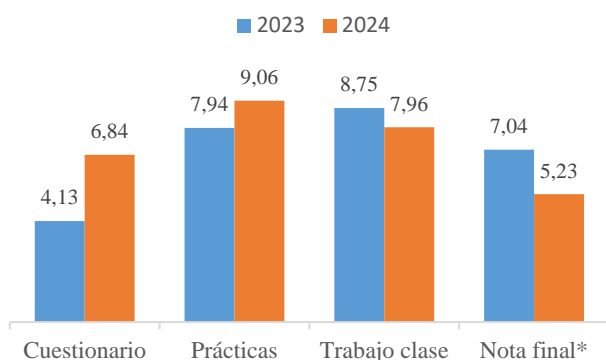


Figura 3: Resultados académicos de los estudiantes por curso. *La nota final en el curso 2024 está incompleta, a falta de evaluar el proyecto final.

Cabe destacar el notable incremento en la nota media relativa a los cuestionarios, con un incremento de +2,71 puntos. Esto se debe a la realización de los mismos de forma continua junto a la explicación teórica, con las ventajas que se han comentado anteriormente.

En segundo lugar, también se aprecia un aumento en la nota relativa a las prácticas de +1,12 puntos. Los motivos provienen de una mejor retención de los conocimientos teóricos (punto anterior) junto con el cambio cronológico de las sesiones prácticas. De esta manera, al realizar cada práctica justo tras la explicación teórica correspondiente, el estudiante tiene la información más reciente y facilita el desarrollo de la práctica.

La puntuación del trabajo en clase es la única que ha variado negativamente respecto al curso anterior, con un diferencial de -0,79 puntos. El principal motivo reside en la mayor subjetividad al evaluar el trabajo de clase en el curso 2023 respecto al 2024. Al introducirse como cambio que el estudiante entregue los ejercicios, se ha añadido un instrumento adicional de evaluación más objetivo. De cualquier manera, hay aceptar que los resultados y tendencias son difícilmente extrapolables al futuro en este momento, al disponer únicamente de información sobre los 2 primeros años cursados.

5. Conclusiones

Pese a las mejoras introducidas en el presente curso, la asignatura pretende seguir evolucionando y mejorando para facilitar el aprendizaje y el rendimiento obtenido por el estudiante. Un buen punto de partida de buenas prácticas viene propuesto por el trabajo de (Rossiter, 2018). Por ejemplo, el uso de los mismos motores CC tanto en las prácticas como en el proyecto disminuye la carga de trabajo

y permite dedicarle más tiempo de estudio al mismo hardware. También se plantea una participación aún más activa del estudiante durante las clases (Bishop, 2013). Actualmente, debe realizarse una presentación del trabajo realizado sobre el proyecto como parte del examen final. Pero también podría participar preparando y resolviendo ejercicios en clase. Como herramienta adicional, el estudiante también podría disponer de un gemelo digital de los motores CC (Lopez, 2022). Esto le permitiría realizar tareas fuera del laboratorio y avanzar en su proyecto sin disponer de las piezas físicas. Por último, también se plantea la opción de rediseñar el proyecto de tal forma que se cree un ambiente competitivo que mejore el rendimiento del estudiante (Mosley, 2016). Un ejemplo sería evaluar cuál de los prototipos desarrollados tiene mayor precisión en el delineado, permitiendo rediseños de algunas piezas.

Referencias

- Afari E., Khine M.S., 2017. Robotics as an Educational Tool: Impact of Lego Mindstorms. *International Journal of Information and Education Technology* 7 (6), 437-442. DOI: 10.18178/ijiet.2017.7.6.908.
- Bishop J.L., Verleger M.A., 2013. The flipped classroom: A survey of the Research. *Proceedings of the Annual Conference of American Society for Engineering Education*, 6219. DOI: 10.5688/ajpe80234.
- Chengze Z., Hong Z., Weiwei Y., Xiaoging G., 2022. iArm: Design an Educational Robotic Arm Kit for Inspiring Students' Computational Thinking. *Journal of MDPI Sensors* 22 (8), 2957. DOI: 10.3390/s22082957.
- Hackathorn J., Solomon E.D., Blankmeyer K.L., Tennial R.E. Garczynski A.M., 2011. Learning by Doing: An Empirical Study of Active Teaching Techniques. *Journal of Effective Teaching* 11, 40-54. ISSN-1935-7869.
- Lopez V., Akundi A., 2022. A conceptual model-based systems engineering (MBSE) approach to develop digital twins. *IEEE International Systems Conference*. DOI: 10.1109/SysCon53536.2022.9773869.
- Martínez-Rodríguez J.L., Morales-Rodríguez J., 2016. *Control aplicado con variables de estado* (2ª edición). Ediciones Paraninfo S.A. ISBN 9788428396585.
- Mosley P., Ardito G., Scollins L., 2016. Robotic Cooperative Learning Promotes Student STEM Interest. *American Journal of Engineering Education*. 7 (2), 117-128.
- Rossiter J., Pasik-Duncan B., Dormido S., Vlacic L., Jones B., Murray R., 2018. A survey of good practice in control education. *European Journal of Engineering Education* 43 (6), 801-823. DOI: 10.1080/03043797.2018.1428530
- Santiveri-Morata F., Iglesias-Rodríguez C., Gil-Iranzo R., Rourera-Jordana R., 2011. Metodologías activas en la docencia universitaria: resultados de algunas experiencias realizadas. *IX Jornadas de redes de investigación en docencia universitaria: Diseño de buenas prácticas docentes en el contexto actual*, p. 81.
- Soria I.N., Gonzalez-Gomez C., Botella-Perez P., 2015. Aprendizaje basado en proyectos: Diferencias percibidas en la adquisición de competencias por el alumnado universitario. *Revista de Psicología y Educación* 10 (1), 55-76.
- Wuthrich M., Widmaier F., Grimminger F., Joshi S., Agrawal V., Hammoud B., Khadiv M., Bogdanovic M., Berenz V., Viereck J., Naveau M., Righetti L., Schölkopf B., Bauer S., 2021. Trifinger: An open-source robot for learning dexterity. *Proceedings of Machine Learning Research (PMLR)*, vol. 155, pp. 1871-1882. DOI: 10.48550/arXiv.2008.03596.