

# EXPERIENCIAS DE EVALUACIÓN AUTOMATIZADA EN IDENTIFICACIÓN Y AJUSTE DE PID

Daniel Dolz Algaba, Ignacio Peñarrocha Alós, Roberto Sanchis Llopis  
Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño  
Universitat Jaume I, Castellón. [ddolz@uji.es](mailto:ddolz@uji.es), [ipenarro@uji.es](mailto:ipenarro@uji.es), [rsanchis@uji.es](mailto:rsanchis@uji.es)

## Resumen

*En este trabajo se desarrolla un sistema de evaluación automatizada implementado en Moodle y mediante formularios de Google para asignaturas de control automático. El objetivo es fomentar el trabajo individual previo para preparar las sesiones de prácticas de laboratorio en la asignatura de Sistemas Automáticos, de tercer curso de las ingenierías de la rama industrial. El sistema desarrollado permite al estudiante tener una realimentación inmediata de sus competencias para resolver problemas de ingeniería de control. Se han probado dos formas de implementación: mediante un formulario de Google, y adaptando la herramienta de cuestionario de Moodle. En ambos casos la idea ha sido incluir problemas de control personalizados, incluyendo problemas de modelado, identificación y ajuste de controladores, tanto por métodos experimentales como métodos basados en modelo. Para garantizar el trabajo individual y evitar copias se han generado automáticamente diferentes enunciados de problemas, escalando las ganancias y las constantes de tiempo.*

**Palabras Clave:** educación en automática, evaluación automatizada, Moodle.

## 1 INTRODUCCIÓN

El avance de las tecnologías de la información y comunicaciones ha provocado que la mayoría de instituciones educativas utilicen plataformas de aprendizaje web, como Moodle. Esto ha abierto un gran número de posibilidades para mejorar el proceso de aprendizaje. En particular, la comunidad educativa de ingeniería de control ha hecho grandes esfuerzos para adaptar y mejorar los métodos tradicionales de enseñanza [1], [2].

Las prácticas de laboratorio experimentales son clave para que los estudiantes de ingeniería consoliden y pongan en práctica los conceptos fundamentales presentados en las lecciones de teoría. Sin embargo, para poder desarrollar adecuadamente las sesiones de laboratorio, los estudiantes deben adquirir previamente una comprensión razonable de los

conocimientos teóricos asociados. Una forma de garantizar esto es proponer un trabajo previo a la práctica que los estudiantes deben realizar. Sin embargo, si el número de alumnos es muy elevado, la corrección de ese trabajo previo puede retrasarse mucho, por lo que la realimentación retardada al estudiante puede ser muy poco útil, o incluso desmotivadora. Para resolver este problema se propone el uso de un sistema web de evaluación automatizada para que la realimentación de esos trabajos sea inmediata.

La evaluación automatizada ha recibido mucha atención en los últimos años. Algunos autores han desarrollado plataformas nuevas para implementar laboratorios virtuales con evaluación automatizada [3], [4]. En este trabajo se propone adaptar la conocida herramienta Moodle y los formularios de Google para crear problemas de control personalizados que permitan la corrección automatizada para fomentar el trabajo autónomo de los estudiantes.

## 2 OBJETIVOS

Los objetivos académicos del proyecto desarrollado han sido los siguientes:

- Promover el uso de ICT en las actividades previas a las sesiones de laboratorio.
- Fomentar el aprendizaje autónomo.
- Adaptar el proceso de aprendizaje a las restricciones de tiempo y ubicación del estudiante.
- Mejorar la motivación de los estudiantes en la asignatura de Sistemas Automáticos con la reducción del retardo en la realimentación de la evaluación.

Para lograr esos objetivos, las actividades propuestas deben cumplir los requisitos siguientes:

- Los problemas propuestos deben contener los conceptos principales de cada sesión de laboratorio y deben parametrizarse de forma individual para cada estudiante garantizando que tienen solución.
- Cuando las tareas requieran para su resolución de herramientas informáticas, éstas deben ser libres para que todos los estudiantes tengan acceso.

### 3 PROBLEMAS DE SISTEMAS DE CONTROL PERSONALIZADOS

Las sesiones de laboratorio de sistemas de control tienen como objetivo la consolidación y puesta en práctica de dos conceptos teóricos principales:

1. Identificación, donde los estudiantes obtienen un modelo de un sistema a partir de datos experimentales.
2. Ajuste de controladores, donde los estudiantes ajustan un controlador PID para lograr unas prestaciones determinadas, bien utilizando técnicas experimentales o técnicas basadas en modelo.

Para garantizar que las sesiones prácticas se desarrollen de forma adecuada, los estudiantes deben abordar en un trabajo previo actividades similares a las que se harán en el laboratorio. Sin embargo, uno de los problemas detectados en años anteriores es la tendencia a copiarse entre ellos los resultados sin trabajar ni llegar a entender los conceptos. Para forzar el aprendizaje autónomo se han propuesto ejercicios prácticos personalizados que abarcan los puntos anteriores.

En resumen, los estudiantes tienen que realizar una identificación experimental a partir de un conjunto de datos, y diseñar algunos controladores para lograr unas determinadas prestaciones. Los datos consisten en la respuesta en bucle abierto ante entrada escalón, estructurados en tres columnas: tiempo ( $t$ ), entrada ( $u$ ) y salida ( $y$ ). Supóngase que la función de transferencia del proceso es de la forma:

$$G(s) = \frac{K}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s) \dots (1 + \tau_n s)}$$

Donde  $s$  representa el operador de Laplace,  $K$  es la ganancia, y  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  son las constantes de tiempo. Para asegurar que el problema tiene solución se propone realizar un escalado tanto de la ganancia como de las constantes de tiempo. Para ello, a partir de un solo fichero de datos original, se crean tantos ficheros de datos como sea necesario, mediante la siguiente transformación:

$$\begin{aligned} t &\leftarrow t \cdot x, \\ y &\leftarrow y \cdot x \end{aligned}$$

donde  $x$  es una variable utilizada para personalizar cada problema. Cada estudiante recibe un fichero de datos modificado distinto. El cambio de variable permite realizar la evaluación automatizada de los problemas de forma simple.

#### 3.1 IDENTIFICACIÓN

En el primer tipo de ejercicio, utilizando el fichero de datos modificado por medio del parámetro  $x$ , el estudiante debe obtener un modelo del proceso

utilizando una herramienta de identificación. Se utiliza una herramienta libre (figura 1) desarrollada en [5], que puede descargarse de la página web *freepidtools*

(<https://sites.google.com/a/uji.es/freepidtools/>).

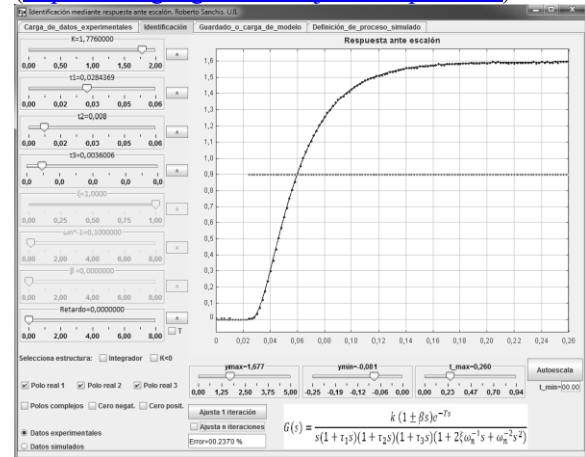


Figura 1: Herramienta de identificación

En primer lugar se pide obtener un modelo de primer orden más retardo:

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ts}}{1 + \tau_1 s}$$

La figura 2 muestra el resultado de la identificación con uno de los conjuntos de datos.

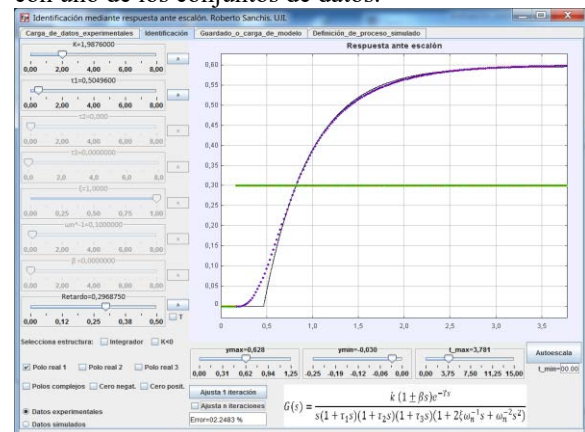


Figura 2: Resultado de identificación de primer orden más retardo

Después, se debe obtener un modelo lo más preciso posible. La herramienta permite obtener un modelo con la siguiente estructura:

$$G(s) = \frac{K(1 + \beta s)e^{-Ts}}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)(1 + \tau_3 s)(1 + 2\xi\omega_n^{-1}s + \omega_n^{-2}s^2)}$$

El estudiante deberá introducir el valor de cada uno de los parámetros obtenidos, algunos de los cuales pueden ser cero.

La dificultad que presenta la corrección automatizada de este problema de identificación es que la solución no es única, sino que hay diversas estructuras que pueden ser correctas, es decir, que logran un error de estimación bajo (en concreto se les pedía un error

menor del 0.5%). Por ejemplo, la Figura 3 muestra una posible solución con 3 polos reales y retardo, mientras que la Figura 4 muestra otra solución con solo 2 polos reales más retardo, y la Figura 5 otra solución con 4 polos reales sin retardo. Las tres soluciones son válidas, pues son estructuras razonables que dan un error menor del 0.5%.

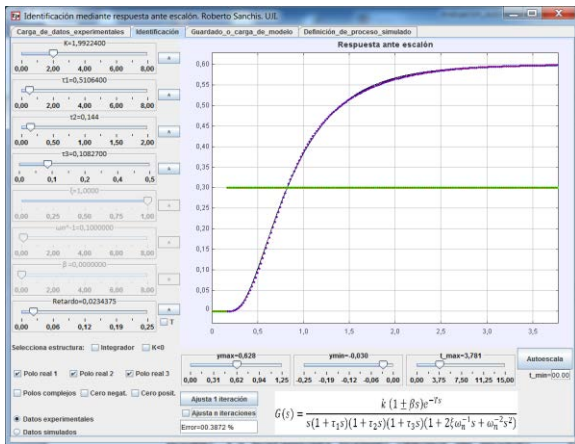


Figura 3: Resultado de identificación con 3 polos reales más retardo

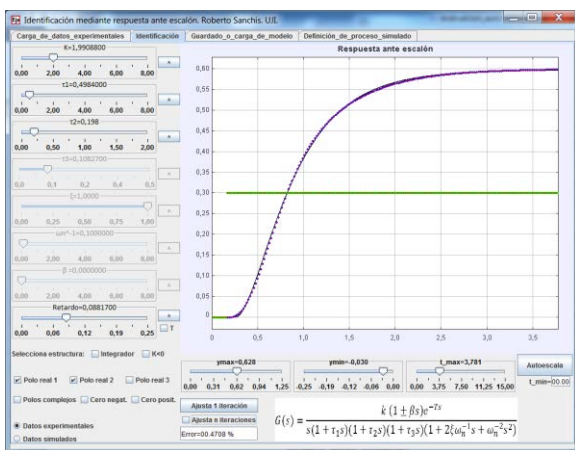


Figura 4: Resultado de identificación con 2 polos reales más retardo

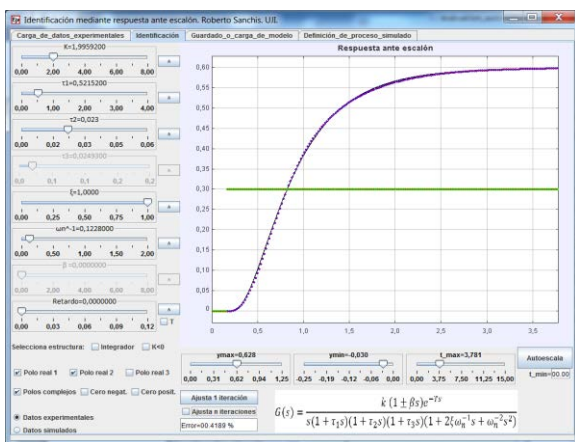


Figura 5: Resultado de identificación con 4 polos reales sin retardo

Debido a la problemática especial de la corrección de los problemas de identificación, donde la estructura de la solución puede ser diversa, la primera implementación del sistema de evaluación automatizada que se ha probado es un formulario de Google, en el que los estudiantes introducen los parámetros obtenidos. En este caso, el parámetro de personalización,  $x$ , se obtiene del DNI del estudiante. Después, la hoja de cálculo generada es leída por una aplicación de Matlab, que realiza la autocorrección calculando el error entre la salida simulada del modelo propuesto por el estudiante, y los datos experimentales. La nota depende del valor de ese error. La aplicación de Matlab escribe en la hoja de cálculo la nota de cada estudiante. De esta forma, la corrección depende de que el modelo obtenido tenga una respuesta similar a los datos experimentales, no depende de la comparación del valor de los parámetros obtenidos con los del modelo exacto.

La segunda forma de implementación que se ha experimentado ha sido mediante un cuestionario de Moodle. En este caso el parámetro de personalización,  $x$ , es una “shared wild card” que se asigna a cada alumno, de forma aleatoria, dentro de un rango definido por el profesor (por ejemplo números enteros del 1 al 100). La evaluación se hace directamente en Moodle, pero se basa únicamente en la comparación de cada valor de cada parámetro del modelo con el que debería dar. Como en general el modelo obtenido no es único si la estructura se deja abierta, tal y como ilustran las Figuras 3, 4 y 5, para mejorar la fiabilidad de la corrección se restringe en este caso la estructura del modelo a obtener a un modelo de segundo orden con polos reales:

$$x(s) = \frac{K \cdot x}{(1 + \tau_1 xs)(1 + \tau_2 xs)}$$

Como se ve, gracias al escalado utilizado en los datos, la solución al problema de identificación es una función del parámetro de personalización,  $x$ . La corrección se basa ahora en la diferencia entre los tres parámetros introducidos por el estudiante y los valores de la ecuación anterior.

Las ventajas de la implementación en el cuestionario de Moodle son la mayor sencillez de implementación, y el hecho de que la corrección se realiza de forma instantánea, por lo que la realimentación al estudiante es inmediata. El inconveniente es que no se puede dejar abierta la estructura del modelo, por lo que una parte importante de la identificación (la selección de la estructura) no queda cubierta.

En la implementación mediante el formulario de Google y la corrección con Matlab, en cambio, sí se puede dejar abierta la estructura, por lo que el

ejercicio de identificación es más completo. El inconveniente es que la corrección no es instantánea, y el estudiante recibe la realimentación con un día de retraso.

### 3.2 AJUSTE DE CONTROLADORES PID

El segundo tipo de ejercicio consiste en el ajuste de varios controladores PID utilizando métodos experimentales y la verificación del comportamiento de bucle cerrado. Se usan dos métodos de ajuste:

1. Método de respuesta ante escalón sin valor final conocido.
2. Método de respuesta escalón con valor final conocido.

El ajuste experimental y la simulación del bucle cerrado se realizan mediante herramientas libres que se pueden descargar de *freepidtools*, (ver figura 6 y 7).

El tercer tipo de ejercicio consiste en el diseño basado en modelo de varios PID, de forma que se cumplan determinadas prestaciones en cuanto a robustez (margen de fase y de ganancia), respuesta temporal (sobreoscilación y tiempo de establecimiento) y/o amplificación de ruidos de alta frecuencia. Para realizar el diseño se ha utilizado también una herramienta libre que se puede descargar de *freepidtools*, (ver figura 7).

La implementación de la evaluación automatizada se ha realizado en este caso únicamente con un cuestionario de Moodle, donde los estudiantes introducen por una parte los parámetros del controlador, y por otra parte determinadas especificaciones del comportamiento en bucle cerrado, como sobreoscilación, tiempo de establecimiento, IAE, error máximo ante perturbación, amplitud de la acción de control debida al ruido de medida, etc.

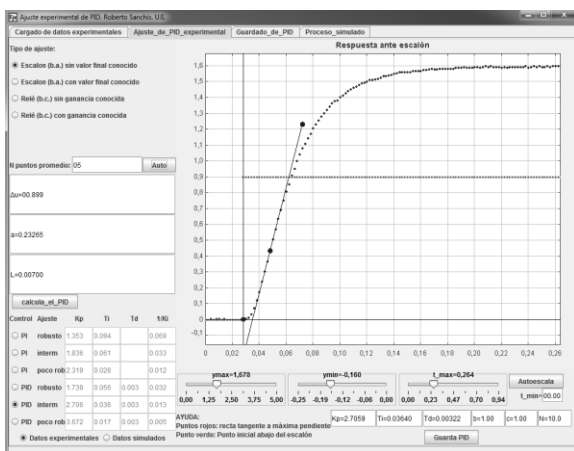


Figura 6: Herramienta de ajuste experimental

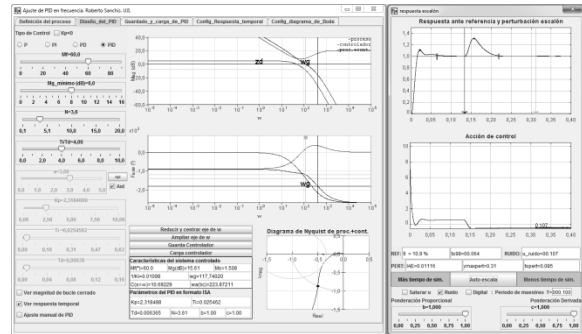


Figura 7: Herramienta de diseño basado en modelo

La evaluación automatizada de las soluciones introducidas es sencilla gracias al escalado realizado con el parámetro  $x$ . En cuanto a los enunciados de los ejercicios, tanto los márgenes de estabilidad como la sobreoscilación requeridas en el enunciado son constantes para todos los estudiantes. Sin embargo el tiempo de establecimiento se escala con el parámetro  $x$ . De la misma forma, la amplificación de alta frecuencia del controlador requerida en el enunciado se escala según la ecuación:

$$C^x(s = \infty) = \frac{C(s = \infty)}{x}$$

donde

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right)$$

es la función de transferencia del PID.

Las soluciones correctas a los problemas personalizados son una función de las soluciones del problema original (con  $x=1$ ), y dependen del parámetro  $x$ :

$$K_p^x = \frac{K_p}{x}, \quad T_i^x = T_i \cdot x, \quad T_d^x = T_d \cdot x, \\ N^x = N, \quad b^x = b, \\ c^x = c$$

$\delta^x = \delta$ ,  $t_{s,98}^x = t_{s,98} \cdot x$ ,  $IAE^x = IAE \cdot x^2$ , donde  $b$  y  $c$  son los factores de ponderación de la parte proporcional y derivativa de la referencia,  $\delta$  es la sobreoscilación,  $t_{s,98}$  el tiempo de establecimiento al 98%, mientras que el IAE es la integral del valor absoluto del error ante perturbación escalón.

El profesor, por tanto, solo tiene que resolver los problemas para  $x=1$ .

En general, los problemas de diseño de controladores pueden tener varias soluciones correctas que cumplan las especificaciones requeridas. La utilización de un formulario de Google y la corrección mediante simulación con Matlab permitiría evaluar el cumplimiento de las especificaciones de forma más general. No obstante, en este caso se ha optado por la solución más cerrada del cuestionario de Moodle debido a que el ajuste experimental y el diseño basado en modelo del PID utilizando la herramienta

libre es muy sistemático, y realizado correctamente, permite a los estudiantes obtener una solución al problema única, y por tanto, fácilmente evaluable parámetro a parámetro (con una pequeña tolerancia).

La Figura 8 muestra el ajuste de un controlador PI de robustez intermedia a partir de datos experimentales de respuesta ante escalón, utilizando la herramienta. La Figura 9 muestra la simulación de la respuesta en bucle cerrado del sistema identificado con el controlador PI ajustado. La herramienta utilizada permite ajustar el factor de ponderación de la parte proporcional de la referencia, y calcula automáticamente todas las especificaciones de funcionamiento que el estudiante debe introducir en el cuestionario. La utilización de estas herramientas permite que los resultados (tanto parámetros del controlador como especificaciones) sean predecibles y por tanto corregibles de forma automatizada.



Figura 8: Ajuste experimental de PI de robustez intermedia

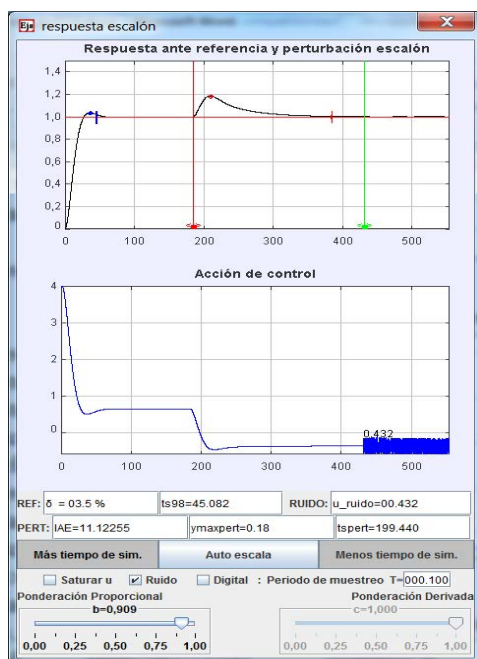


Figura 9: Simulación de respuesta en bucle cerrado con controlador PI

En el caso del diseño basado en modelo, un tipo de problema consiste en obtener el controlador que logra una robustez (margen de fase y ganancia), y una amplificación de ruidos de alta frecuencia determinadas, y que minimiza el IAE ante perturbación. Utilizando la herramienta de diseño, este problema tiene una solución única, a la que deben llegar todos los estudiantes. La Figura 10 muestra el diseño basado en modelo de un controlador PID para controlar la velocidad de un motor, con margen de fase  $60^\circ$ , margen de ganancia mayor o igual que 8 dB y una amplificación del ruido menor de 2 (medido en porcentaje de rango de entrada y salida, equivalente a 0.01 V/rad/s), y que maximiza el IAE. El procedimiento sistemático da lugar a un controlador único. Consiste en ir variando el parámetro de filtro del derivador,  $N$ , y calculando el controlador que maximiza la ganancia  $K_i$ , hasta que la amplificación del ruido sea menor de 2. La herramienta realiza de forma automática el cálculo del controlador PID que maximiza la ganancia integral mientras garantiza la robustez fijada (margen de fase y de ganancia). De esa forma, el controlador se obtiene de forma simple, y el resultado es único.

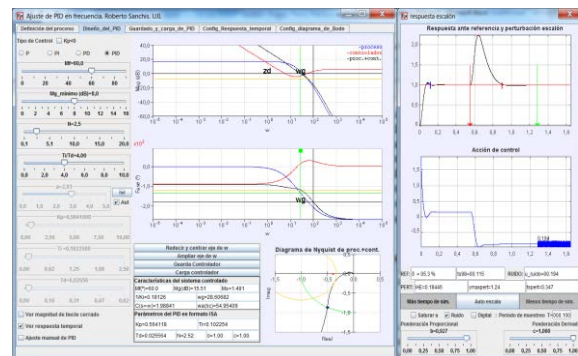


Figura 10: Diseño basado en modelo de PID para control de velocidad de motor

Si se utilizaran otros métodos de diseño menos sistemáticos, como el lugar de las raíces, que pueden dar soluciones diversas, la implementación de la corrección automatizada en Moodle no sería viable, por lo que habría que utilizar otra metodología como por ejemplo el formulario de Google y la corrección mediante simulación con Matlab.

## 5 CASO DE ESTUDIO: SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Utilizando la estrategia descrita en las secciones anteriores se han implementado tres cuestionarios correspondientes a tres sesiones de laboratorio de la asignatura de Sistemas Automáticos, de tercer curso de las ingenierías de la rama industrial en la Universitat Jaume I, con un total de unos 150 estudiantes. El primer cuestionario, sobre

identificación, se ha realizado con un formulario de Google y corrección con Matlab. Los otros dos, de ajuste experimental y diseño basado en modelo de PID, se han realizado con un cuestionario de Moodle. Para averiguar la opinión de los estudiantes sobre esta metodología de evaluación automatizada, se hizo una pequeña encuesta.

La gran mayoría de estudiantes han valorado positivamente la utilización de herramientas de auto evaluación que les dan realimentación inmediata. En general no han encontrado mayores dificultades en utilizar los cuestionarios de Moodle con las instrucciones recibidas. Sin embargo, un significativo porcentaje (36%) opina que la evaluación binaria (que solo comprueba el resultado) no es justa. Este es el precio que se paga porque la evaluación sea automatizada, ya que el procedimiento de resolución seguido por el estudiante no se puede comprobar. Aun así, el inconveniente es mínimo si, como en este caso, se utiliza este método de evaluación para actividades de evaluación continua que puntúan poco en la nota final (cada cuestión binaria representa una centésima de la nota final). Quizás lo más importante es que casi el 60% admite que ha mejorado su competencia en la materia de una forma más que aceptable.

## 6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un procedimiento para crear ejercicios personalizados de identificación y diseño de controladores de forma que puedan evaluarse de forma automatizada. Se han propuesto dos formas de implementación: mediante un formulario de Google y la corrección posterior automatizada con Matlab, y mediante cuestionarios de la conocida plataforma Moodle.

La utilización del formulario de Google con Matlab permite evaluar problemas de solución más abierta, como la identificación sin estructura de modelo prefijada. La evaluación se basa en ese caso en el cálculo del error de la salida simulada del modelo respecto los datos experimentales. En el caso del cuestionario de Moodle, la evaluación se basa en la diferencia entre los valores de los parámetros obtenidos y los valores correctos, por lo que en el caso de la identificación, se requiere restringir la estructura del modelo a priori, resultando en un ejercicio menos completo para el estudiante. Para evaluar el diseño de controladores, el cuestionario de Moodle es válido si el método de diseño utilizado es lo bastante sistemático para dar lugar a una solución única (para los requerimientos del enunciado). Este es el caso de la experiencia desarrollada, en la que se usa una herramienta libre de diseño de PID que permite buscar una solución óptima única. En caso de que el método de diseño pudiera dar lugar a múltiples

soluciones válidas, el cuestionario de Moodle no se podría utilizar.

Se ha aplicado la metodología propuesta a la evaluación de actividades previas a las sesiones de laboratorio, concluyendo que han tenido un impacto positivo en el proceso de aprendizaje, siendo especialmente valorado por los estudiantes el hecho de tener una realimentación inmediata de las soluciones.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universitat Jaume I de Castelló a través del proyecto con referencia P1·1B2015-42 y por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto con referencia TEC2015-69155-R. También se ha financiado a través de la ayuda con referencia PI15734 de la Universitat Jaume I.

### Referencias

- [1] Méndez, J. A., and Evelio J. G. (2011). "Implementing motivational features in reactive blended learning: Application to an introductory control engineering course." *IEEE Transactions on Education* 54(4), pp- 619-627.
- [2] Uran, S., Darko H., and Karel J (2007). "Remote control laboratory with Moodle booking system." *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp 2978-2983.
- [3] Farias, G., Muñoz de la Peña, D., Gómez-Estern, F., De la Torre, L., Sánchez, C., and Dormido, S. (2015). "Adding automatic evaluation to interactive virtual labs". *Interactive Learning Environments*, pp 1-21.
- [4] de la Peña, D. M., Gómez-Estern, F., and Dormido, S. (2012). "A new Internet tool for automatic evaluation in Control Systems and Programming". *Computers & Education*, 59(2), 535-550.
- [5] Sanchis R., Estupiña, S. "Herramientas de hardware y software libre para la identificación experimental, el diseño y la implementación de controladores PID". XXXIV Jornadas de Automática.  
<https://sites.google.com/a/uji.es/freepidtools/>