

Nuevas ideas para enseñar Ingeniería de Control a través de prácticas de laboratorio: una metodología en tres fases.

Goncalves, D.^a, Chacón, J.^{a,*}, García, L.^a, López-Orozco, J. A.^a, Eva Besada-Portas^a

^aDepartamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Universidad Complutense de Madrid.
Facultad de Ciencias Físicas, Plaza de las Ciencias, 1, 28040, Madrid, España.

To cite this article: Goncalves, D., Chacón, J., García, L., López-Orozco, J. A., Besada-Portas, E. 2023. New ideas for teaching Control Engineering with laboratory practices: a three phases methodology. XLIV Jornadas de Automática, 215-220 <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.215>

Resumen

En este artículo repasamos, mediante el estudio de un caso práctico, una metodología para integrar un Gemelo Digital en un curso del área de Ingeniería de Sistemas. Analizamos una práctica que se viene realizando desde hace años en un curso introductorio de Sistemas Lineales, y proponemos una metodología genérica para enfocar el uso de diferentes versiones: virtual, presencial y remota de una práctica de laboratorio e integrarlas de una manera racional que permita a los alumnos obtener el máximo beneficio. Presentamos también algunas ideas y sugerencias basadas en nuestra experiencia que pensamos que pueden resultar útiles a los lectores que deseen incorporar en su metodología docente este tipo de herramientas, como la integración de las herramientas interactivas utilizadas en un Sistema de Gestión del Aprendizaje (LMS), el uso de Analíticas del Aprendizaje (*Learning Analytics*) para reflexionar sobre la actividad y los resultados obtenidos o el préstamo de hardware de bajo coste a los alumnos para fomentar el aprendizaje autónomo.

Palabras clave: Educación en Control, Herramientas de Aprendizaje Interactivo, Laboratorios Virtuales y Remotos, Gemelo Digital

New ideas for teaching Control Engineering with laboratory practices: a three phases methodology

Abstract

In this article we review, through a study case, a methodology to integrate a Digital Twin in a course in the area of Control Engineering. We analyze a practice that has been carried out for years in an introductory course on Linear Systems, and we propose a generic methodology to focus the use of different versions: virtual, hands-on and remote of a laboratory practice, and integrate them in a rational way that allows students get the most benefit. We also present some ideas and suggestions, based on our experience, that could be useful to readers who wish to incorporate this type of tool into their teaching methodology, such as the integration of interactive tools used in a Learning Management System (LMS), the use of *Learning Analytics* to reflect on the activity and the results obtained or the loan of low-cost hardware to students to encourage autonomous learning.

Keywords: Control Education, Interactive Learning Tools, Remote and Virtual Laboratories, Digital Twin

1. Introducción

En los últimos años ha crecido extraordinariamente el uso del término *gemelo digital* (Lopez and Akundi, 2022) aplicado a modelos de sistemas físicos cuyo comportamiento se simula mediante computadores. El término es enormemente amplio, pudiendo abarcar desde el uso de un bit para almacenar el esta-

do de un conmutador hasta un modelo de un avión de combate con su dinámica, sistema eléctrico, panel de mandos, etc.

Evidentemente, el uso de *gemelos digitales* – aunque no se les conociera por ese nombre – no es nuevo y tiene su ámbito de aplicación importante en la docencia (Savin-Baden, 2012; San-cristobal et al., 2012; Chiocciariello et al., 2012; Martin et al.,

*Autor para correspondencia: jeschaco@ucm.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

2020; Fayolle et al., 2011; Diwakar et al., 2015) en el área de Ingeniería de Sistemas y Automática (ISA). Como es bien conocido, el uso de simulaciones, laboratorios virtuales y todo tipo de herramientas de Ingeniería como Matlab/Simulink son de gran ayuda para apoyar el aprendizaje de conceptos teóricos. No obstante, el uso indiscriminado de estas herramientas para la docencia no se convierte necesariamente en una ventaja, e incluso un mal uso puede ser contraproducente. Existen algunos peligros a tener en cuenta, como por ejemplo que el estudiante otorgue más importancia a las herramientas que a los conceptos teóricos subyacentes, o que el tiempo dedicado a la simulación se dedique al entretenimiento, sin que haya una actividad real de aprendizaje. Por estos y otros factores, cada vez es más importante contar con una metodología docente que incorpore de forma sistemática y coherente el uso de recursos hardware, simulaciones y laboratorios virtuales o remotos. En este artículo, utilizaremos el gemelo digital de un laboratorio como nexo de unión entre todos estos elementos, basándonos en el estudio de un caso práctico de unas prácticas de laboratorio sobre un circuito analógico reconfigurable que los autores llevamos utilizando y depurando desde hace ya varios años. La metodología así presentada puede ser utilizada, quizá con alguna adaptaciones menores, a otros laboratorios de ISA.

El grupo de Investigación de Ingeniería de Sistemas, Control Automática y Robótica (ISCAR) de la UCM tiene una larga trayectoria en el diseño e implementación de prácticas de laboratorio, durante la que se han desarrollado diferentes metodologías para automatizar la creación y mantenimiento de las mismas, siempre con la intención de facilitar, en la medida de lo posible, la creación y mantenimiento de nuevas experiencias. Esto se ha logrado, en parte, a través de la financiación del Proyecto de Innovación PIMCD-650 de la convocatoria 2007/2008 titulado “Diseño de prácticas reales para un laboratorio unificado para las asignaturas del área de ISA” y presentado en E. Besada-Portas (2012, 2013), del PIMCD-UCM 211 de la convocatoria 2010-2011 titulado “Laboratorio presencial/remoto de prácticas de control en tiempo real basado en dispositivos industriales de última generación”, del PIMCD-UCM 318 del año 2014 titulado “EJS-TwinCAT 3.0: Nuevo laboratorio remoto integrado en Moodle para prácticas de control de Ingeniería de Sistemas y Automática” y publicado en E. Besada-Portas (2016); J. Bermudez-Ortega (2016), y del PIMCD-UCM 139 del año 2019-2020 “Herramienta integral y de bajo coste para el desarrollo de prácticas remotas para las asignaturas de Ciencias e Ingeniería” y publicado en I. Aizpuru-Rueda (2019).

Toda esta experiencia es explotada por la metodología en tres fases que se presenta en este artículo, al sustentarse sobre las prácticas presenciales sobre circuito analógica diseñada en el PIMCD 650 de la convocatoria 2006-2007, y la experiencia adquirida con el diseño y uso de los laboratorios remotos y virtuales de los PIMCD.

El artículo se estructura en cinco secciones. En la sección 2 contamos el origen del laboratorio presentado y describimos el laboratorio virtual desarrollado sobre el gemelo digital, y en la sección 3 explicamos la metodología propuesta para la integración en la docencia. A continuación, en la sección 4 proponemos algunas ideas y sugerencias a explorar que pueden ser de utilidad para el lector, y finalmente en la sección 5 damos las conclusiones y líneas futuras de trabajo.

2. Prácticas de Laboratorio con un circuito analógico reconfigurable

El grupo ISCAR de la UCM ha desarrollado, desde el año 2010, diferentes metodologías para construir laboratorios remotos para las asignaturas de Control del área de Ingeniería de Sistemas y Automática de la UCM.

Inicialmente se propuso una metodología basada en la interacción directa con Controladores Lógicos Programables (PLCs) a través de applets desarrollados con la herramienta de programación gráfica Easy Java Simulations (EJS). Con esta metodología, los alumnos podía acceder a dispositivos reales mediante una conexión a Internet. La aplicación de laboratorio, desplegada en forma de JAVA applets permitía intercambiar información entre el ordenador del usuario y el servidor JAVA que tenía acceso directo al PLC conectado a la planta a controlar. El uso continuado y satisfactorio en diferentes prácticas de la UCM, que se integraban dentro del portal UNILabs (red de laboratorios remotos entre universidades a nivel nacional), acabo forzadamente en 2016 a consecuencia de las restricciones impuestas por los navegadores de internet al uso de applets desde una página web.

La metodología entonces se adaptó a las nuevas reglas de juego sustituyendo los applets por páginas web construidas mediante JavaScripts, HTML5 y CSS, con la inestimable ayuda de la herramienta Easy Java JavaScript Simulations (EJSs, sucesora de EJS) y un servidor desarrollado también basado en tecnologías JavaScript (Node.js), y manteniendo el uso de los PLCs. Por lo tanto, puede considerarse la versión actualizada de la primera metodología, con la capacidad añadida de dar un servicio integral a todas las páginas web del laboratorio remoto correspondiente. Finalmente, se decide sustituir el PLC por un computador de bajo coste (una Raspberry PI) con funciones de entrada-salida en el que se programa en C, y posteriormente en Python, las funciones que interactúan con los dispositivos reales y en el que se despliega el servidor de Node.js.

Por lo tanto, constituye una solución compacta de coste mínimo (respecto a la conexión a internet y al acceso remoto del laboratorio), que puede ser utilizada en numerosas experiencias de las asignaturas de las áreas de Ciencias e Ingeniería.

2.1. Circuitos analógicos

El sistema sobre el que se realiza la práctica que analizaremos consiste en un circuito modular basado en amplificadores operacionales que permite implementar diferentes configuraciones de un Sistema Lineal e Invariante en el Tiempo (LTI). El circuito se compone de dos partes diferenciadas, una dedicada a la planta o proceso a estudiar y la otra al controlador. A continuación describimos el funcionamiento básico y las diferentes configuraciones que permite.

El componente básico sobre el que se construye el circuito es un módulo basado en un amplificador operacional, que incorpora un conjunto de potenciómetros, condensadores y *jumpers* configurables para actuar como una ganancia, un integrador o un polo simple. La planta está compuesta por cuatro de estos módulos, que mediante su interconexión permiten reproducir el comportamiento de una amplia gama de sistemas LTI.

Por otra parte el controlador, construido sobre una variante del mismo módulo, permite implementar un compensador de adelanto, retardo, adelanto/retardo o bien un controlador PID



Figura 1: Placa de circuitos analógicos para las prácticas de Sistemas Lineales.

(Proporcional-Integral-Derivativo). De esta manera, este sistema es muy adecuado para ilustrar conceptos de modelado, identificación, control de sistemas, entre otros.

El caso de estudio que se describe en este artículo corresponde a una práctica de laboratorio del curso de Sistemas Lineales. La tarea consiste en la identificación de un sistema LTI desconocido, mediante el estudio de la relación entre las señales de entrada y salida. Más concretamente, y como es bien sabido, una propiedad característica de los sistemas LTI es que, al ser excitados con una señal de entrada senoidal con una amplitud y frecuencia determinada del tipo $x(t) = A \sin(\omega t)$, la salida del sistema es también senoidal y de la misma frecuencia, aunque modificada en amplitud y fase $y(t) = |H(j\omega)| A \sin(\omega t + \arg H(j\omega))$ según la respuesta en frecuencia del sistema $H(j\omega)$, que define su comportamiento y es una propiedad intrínseca del mismo. Aprovechando esta propiedad se puede identificar un sistema desconocido con un procedimiento básico pero muy didáctico e interesante desde un punto de vista docente, que consiste en la excitación del sistema con entradas senoidales de diferentes frecuencias para observar la modificación en amplitud y fase que sufre la señal al pasar a través del sistema. Con esta información se puede representar el diagrama de Bode del sistema, y en base a él, obtener la función de transferencia del sistema.

2.2. Laboratorio Virtual, Presencial y Remoto

Las prácticas de laboratorio desarrolladas en el grupo IS-CAR en los últimos años se encuadran dentro de tres tipos: virtual, presencial y remoto. En primer lugar, los laboratorios virtuales se basan en simulaciones por computador y son los más versátiles, aunque no pueden captar todos los matices de un sistema real. En segundo lugar, los laboratorios presenciales y tradicionales proporcionan al alumno acceso a un puesto de trabajo con el sistema de experimentación. Por último, los laboratorios remotos son una extensión de los tradicionales, dotados de acceso por Internet para recrear la experiencia de un laboratorio presencial sin necesidad de desplazarse físicamente al laboratorio.

En la sesión de laboratorio presencial los alumnos disponen de la placa real (Figura 1), así como de instrumentos de medida y una tarjeta de adquisición para poder hacer de interfaz con el PC en el que realizarán la toma de datos. Según la actividad, se les pide que ellos mismos configuren los *jumpers* de

manera adecuada y ajusten los potenciómetros al valor requerido, previamente a realizar el experimento orientado a generar el diagrama de Bode. Este procedimiento se puede realizar de forma manual o bien asistida por el PC.

La aplicación del laboratorio virtual presenta una interfaz de control que trata de reproducir la experiencia de los alumnos en la sesión de laboratorio (ver Figura 1). Una recreación virtual de la placa de circuitos analógicos permite interactuar directamente tanto con los potenciómetros de la placa para ajustar los valores de las resistencias que determinan las ganancias y ubicación de polos y ceros de la planta y del controlador, como con los puentes (*jumpers*) que permiten configurar los circuitos, conectando o desconectando resistencias, condensadores o módulos enteros para seleccionar el tipo de función de transferencia de la planta o del controlador con el que se está experimentando. En cuanto a la obtención de medidas y generación de señales, la interfaz trata de recrear la interacción con un osciloscopio de laboratorio, tanto en los controles como en el funcionamiento del instrumento. De esta manera, tratamos de garantizar la transferencia del aprendizaje realizado en el trabajo previo al que se hará durante la sesión de laboratorio.

3. Metodología para integrar en el curso

Gracias al enorme esfuerzo de desarrollo invertido en las prácticas y la experiencia adquirida en el proceso, la situación actual permite plantear el siguiente paso lógico: la sistematización del proceso de diseño de las prácticas que asegure la disponibilidad de las versiones virtual, presencial y remota de las prácticas de laboratorio homogenizadas de manera que se puedan presentar al alumno de forma coherente y así maximizar resultados del aprendizaje, suavizando la transición entre diferentes prácticas y asignaturas.

La metodología propuesta en este trabajo consiste en abordar una estrategia de aprendizaje que en líneas generales constará de tres fases. En la fase (1), el alumno tiene acceso a la versión virtual de la práctica, de forma que pueda familiarizarse con el sistema, la tarea a realizar y la interfaz de la aplicación. En la fase (2), el alumno realiza la práctica presencial en el laboratorio. Puesto que el alumno ya conoce el uso de la herramienta y puede centrarse en la tarea que debe realizar, se espera que el aprovechamiento del tiempo de laboratorio sea

óptimo. En la fase (3), el alumno tiene acceso a la versión remota, donde puede dedicar tiempo para completar las tareas no terminadas en el laboratorio o para ampliar conocimientos mediante la realización de otras tareas más avanzadas o de mayor dificultad.

Es evidente que para desarrollar las versiones virtual, presencial y remota de las prácticas de laboratorio es preciso dedicar un esfuerzo considerable. Para facilitar esta ardua tarea en la medida de la posible, proponemos un *framework* de desarrollo basado en tres pilares fundamentales, (1) una herramienta de desarrollo de aplicaciones de laboratorio remoto, Easy JavaScript Simulations (EJS), (2) un Sistema de Gestión de Laboratorios Remotos (RLMS) desarrollado por los autores, VRISA-ReNoLabs, y (3) un middleware de interoperabilidad con el Laboratorio Remoto. Resaltamos que para poder hacerlo de forma sistemática, resulta conveniente establecer una estrategia de aplicación progresiva que facilite una transición suave desde la situación de la que habitualmente se parte: se dispone únicamente de un sistema experimental sobre el que se realizan algunas actividades. Por tanto, el primer paso debe ser homogeneizar las prácticas de laboratorio, asegurando la disponibilidad en todos los casos de las versiones de laboratorio virtual, presencial y remoto.

De forma genérica, nos resulta conveniente definir cuatro actividades importantes para el desarrollo y puesta en funcionamiento del laboratorio: (1) creación del laboratorio virtual sobre el gemelo digital, (2) creación del laboratorio remoto sobre el sistema experimental, (3) despliegue del laboratorio virtual y remoto y (4) mantenimiento y actualización de funcionalidad.

La fase de creación de los laboratorios virtual y remoto se realizan mediante EJS, herramienta que facilita el desarrollo. El *middleware* de interoperabilidad proporciona la comunicación e interacción entre la aplicación cliente y servidor del laboratorio remoto.

Por otra parte, es importante tener en consideración que, una vez se dispone de las versiones virtual y remota, es necesario realizar el despliegue de la aplicación de manera que se haga accesible a los alumnos. Para ello, la plataforma VRISA-ReNoLabs proporciona todas las funciones esenciales como la gestión de usuarios, el control de acceso a los laboratorios, y el registro de datos experimentales y eventos del sistema, entre otros. Finalmente, después de tener la práctica en funcionamiento, eventualmente resultará necesario realizar un mantenimiento del laboratorio ya sea debido a posibles fallos o a mejoras que se deseen incorporar. En ambos casos, la herramienta EJS permite la gestión centralizada tanto del despliegue inicial del laboratorio como de las actualizaciones y gestión de versiones de la aplicación de laboratorio.

3.1. Trabajo previo

En los días previos a la sesión de laboratorio se le proporciona al alumno información sobre la práctica a realizar, los conceptos teóricos que se van a trabajar, el guión de práctica y se le da acceso a la aplicación de laboratorio virtual (Figure 2) que recrea con la mayor exactitud posible el entorno de experimentación con el sistema real. Se plantea el problema para que el alumno se familiarice con el sistema y la aplicación a través del gemelo digital. En esta fase podrá explorar y entender el sistema, hacer todo tipo de pruebas sin tener limitaciones de

recursos, ya que está trabajando con una simulación. Las principales ventajas de añadir este trabajo previo son dos, en primer lugar el alumno puede dedicar todo el tiempo que desee a trabajar con la simulación, sin tiempo de espera ni limitación, y en segundo lugar todo lo aprendido es transferible a la experiencia con el sistema real, ya que tanto la interfaz de la aplicación como la simulación subyacente tratan de recrear con alto grado de detalle la experimentación.

3.2. Trabajo en la sesión de laboratorio

Al llegar a la sesión de laboratorio el estudiante conoce el sistema, sabe lo que debe hacer y qué esperar de la práctica. Puesto que ha dedicado trabajo previo a comprender la actividad, y además está ya familiarizado con la aplicación, puede concentrarse en optimizar el tiempo de trabajo en la sesión de laboratorio. De esta manera se minimiza la frustración del estudiante debida a problemas técnicos y también se optimiza el tiempo de atención del profesor, que puede dedicarse a resolver dudas conceptuales y no en revisar conexiones de cables u otros problemas similares.

3.3. Trabajo posterior

Una vez realizada la práctica, bien sea porque no ha conseguido acabar el trabajo o porque desea ampliar conceptos, se le proporciona al alumno la posibilidad de trabajar con el sistema dándole acceso remoto al laboratorio real, y manteniendo la posibilidad de uso de la aplicación software del laboratorio virtual. De esta manera, el alumno puede afianzar los conceptos explicados y experimentados durante la sesión presencial, que tras un tiempo de asimilación pueden volver a reforzar. A continuación, pueden realizar actividades más avanzadas e incluso dar pie a nuevas ideas propias para experimentar y poner a prueba sus conocimientos, algo que a menudo es imposible de hacer durante las sesiones regladas de laboratorio, que suele estar solo al alcance de unos pocos estudiantes más avanzados.

4. Ideas y Sugerencias adicionales

Como complemento a la metodología propuesta en la sección anterior, presentamos algunas ideas que pueden ser interesantes y útiles para el lector.

4.1. Integración con Learning Management System (LMS).

Los laboratorios remotos y virtuales generados con EJS son aplicaciones web basadas en JavaScript, HTML y CSS, y como tal son directamente integrables en un LMS (en particular, los autores pueden garantizar la compatibilidad con Moodle). Esto permite presentar las actividades al alumno de forma orgánica dentro del curso virtual, ya que actualmente la mayoría de instituciones universitarias proporcionan una plataforma destinada a tal fin. Una forma sencilla y a la vez sistemática de utilizar estas herramientas consiste en preparar una tríada de elementos, (1) Una lección teórica con los conceptos a desarrollar en la práctica junto con los guiones de realización de la actividad y documentación adicional que pueda ser requerida, (2) la aplicación interactiva, y (3) un cuestionario de evaluación que facilite la corrección automática o semi-automática de la actividad.

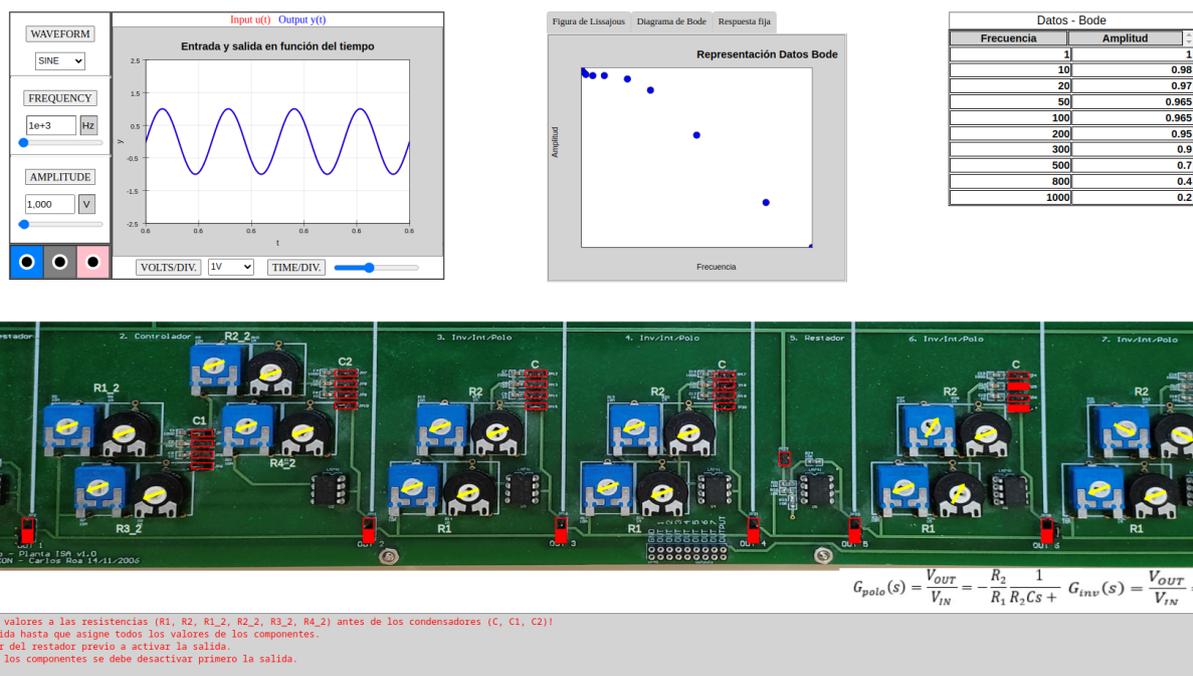


Figura 2: Interfaz del laboratorio virtual.

4.2. Análisis de Datos

Por otra parte, el uso de herramientas software interactivas permite facilitar la recogida de una gran cantidad de información sobre la actividad del alumno durante la realización de la práctica. En particular, EJS proporciona de serie la capacidad de registrar los datos de interacción cuando se integra en Moodle LMS con el *plugin Learning Analytics for Moodle*. Resulta interesante abordar el estudio de estos datos para analizar el proceso de aprendizaje del alumno con la intención de comprenderlo mejor y poder utilizar este conocimiento en su beneficio. Para ello, pueden ser de gran utilidad las técnicas de Learning Analytics, un área de investigación de creciente importancia en los últimos años cuyas aplicaciones más frecuentes se centran en la optimización del entorno de aprendizaje, en la mejora del proceso de aprendizaje y, especialmente, en la mejora de los resultados de aprendizaje.

En general, dentro del proceso de análisis del aprendizaje se pueden identificar diferentes fases: medida, recolección, análisis e interpretación. En nuestro caso, la medida y recolección de datos provendrá principalmente de las actividades realizadas durante las prácticas, complementándose con otras fuentes como las calificaciones y resultados de la asignatura. A partir del análisis de los datos pretendemos detectar relaciones significativas entre el modo de realizar las prácticas de los alumnos y las calificaciones que obtienen, descubrir posibles mejoras en la forma de presentar la información a los alumnos, o determinar posibles dificultades que puedan encontrar con el uso de la interfaz de la aplicación. Por último, los resultados del análisis pueden utilizarse para generar informes destinados tanto al profesor (que puede utilizar esa información para comparar con los resultados esperados e identificar posibles mejoras en su metodología docente) como al propio alumno (para ayudarle a identificar y mejorar sus carencias formativas).

La integración de todas estas técnicas en el flujo de trabajo, es decir, la homogeneización de las prácticas, la recogida de datos, y el análisis y generación de informes, facilitaría el acceso a dicha información tanto a profesores como alumnos. De esta manera podrían disfrutar de los beneficios y mejoras derivadas del análisis del aprendizaje, sin necesidad de tener una formación específica en las técnicas que lo soportan. Para ello, aprovecharemos el soporte que para llevar a cabo estas labores proporcionan las herramientas software utilizados EJS y Moodle, ya que su uso combinado permite registrar los datos de interacción de los alumnos, y facilita el desarrollo de las simulaciones e interfaces gráficas de los laboratorios virtuales y remotos en los que se realizarán las prácticas.

Integración con LMS, con Análisis de datos, préstamos de hardware de bajo coste, y muchas más cosas.

4.3. Préstamos de hardware de bajo coste

Con el fin de fomentar la innovación y garantizar una experiencia equitativa para todos los estudiantes, recientemente ha surgido una nueva tendencia: el préstamo de hardware de bajo coste. Este enfoque proporciona a los estudiantes la oportunidad de utilizar equipos especializados sin tener que hacer grandes inversiones, abriendo las puertas a la experimentación y la creatividad.

El préstamo de hardware de bajo coste está revolucionando la forma en que los estudiantes de ingeniería abordan las prácticas de laboratorio. En lugar de depender exclusivamente de los laboratorios universitarios, los estudiantes ahora pueden llevarse a casa dispositivos de bajo coste para experimentar y explorar en su propio tiempo y espacio. Esta práctica rompe con las barreras tradicionales y permite que los estudiantes exploren y apliquen sus conocimientos en situaciones del mundo real.

Puede resultar interesante utilizar el préstamo de hardware bien como complemento o bien como alternativa al laboratorio remoto para la tercera fase de trabajo por parte del alumno. Al proporcionar a los estudiantes la oportunidad de utilizar hardware de bajo coste, se asegura también un acceso más equitativo a los recursos de laboratorio. Esto es especialmente beneficioso para aquellos que no pueden permitirse invertir en equipos costosos y para aquellos cuyas instituciones educativas carecen de laboratorios completamente equipados.

El préstamo de hardware de bajo coste fomenta la experimentación práctica y la creatividad en el aprendizaje de la ingeniería. Los estudiantes pueden realizar pruebas, prototipos y proyectos en su tiempo libre, lo que les permite adquirir experiencia práctica y desarrollar habilidades técnicas valiosas. Con el hardware de bajo coste a su disposición, los estudiantes pueden explorar ideas y conceptos más allá de las restricciones de tiempo y espacio impuestas por las sesiones de laboratorio presencial. Pueden repetir experimentos, probar diferentes enfoques y aprender de los errores sin las limitaciones habituales.

En nuestro caso de estudio, esta opción es viable ya que disponemos de más de 40 réplicas de la placa y hardware accesorio como *Raspberry Pi Pico* para realizar las mediciones desde el propio PC del alumno. Con este enfoque, el coste total de hardware por alumno sería tan solo de unos pocos euros (10€), haciéndolo económicamente muy asequible.

5. Conclusiones

En este trabajo hemos presentado una práctica de laboratorio con una placa de circuitos analógicos para un curso de Sistemas Lineales que se viene realizando desde hace años en el departamento de los autores. Esta actividad ha servido como excusa para presentar una metodología docente para la realización de prácticas de laboratorio, basada en tres fases bien diferenciadas, (1) trabajo previo con un gemelo digital, (2) trabajo de laboratorio con hardware real, y (3) trabajo posterior con laboratorio remoto.

Esta metodología se complementa con algunas ideas de aplicación como la integración con LMS, analíticas de datos o préstamo de hardware de bajo coste.

Agradecimientos

Este artículo está financiado en parte por el proyecto Y2020/TCS-6420 de la Comunidad de Madrid, y por el proyecto PID2021-127648OB-C33 de la Agencia Estatal de Investigación.

Referencias

- A. Chiocciariello, A. Ceregini, and M. Tavella. Unischoolabs toolkit: Tools and methodologies to support the adoption of universities' remote and virtual labs in schools. pages 1–5, 2012. doi: 10.1109/REV.2012.6293168.
- Anita S Diwakar, Santosh B. Noronha, and Sudhir Agashe. Virtual and remote triggered industrial automation labs: Collaboration case study. In *Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, pages 127–130, 2015. doi: 10.1109/REV.2015.7087276.
- L. de la Torre-Jesús Manuel de la Cruz E. Besada-Portas, Jose Antonio Lopez-Orozco. EJS meets TwinCAT: Remote real-time control experiments using Programmable Logic Controllers. *9th IFAC Symposium on Advances in Control Education (ACE)*, 2012.
- L. de la Torre Jose Antonio Lopez-Orozco Jesús Manuel de la Cruz E. Besada-Portas, J. Bermudez-Ortega. Remote control laboratory using ejs applets and programmable logic controllers. *IEEE Transactions on Education*, 56: 2, 2013.
- L. de la Torre Jose Antonio Lopez-Orozco Jesús Manuel de la Cruz E. Besada-Portas, J. Bermudez-Ortega. Lightweight node.js & ejss-based web server for remote control laboratories. *11th IFAC Symposium on Advances in Control Education (ACE)*, 2016.
- J. Fayolle, C. Gravier, N. Yankelovich, and E. Kim. Remote lab in virtual world for remote control of industrial processes. pages 1–4, 2011. doi: 10.1109/ICME.2011.6012049.
- J. Chacón J. A. Lopez-Orozco I. Aizpuru-Rueda, E. Besada-Portas. Despliegue automático de laboratorios remotos extendiendo las capacidades de ejss. *XL Jornadas de Automática - Educación en Automática*, 2019.
- Jose Antonio Lopez-Orozco Jesús Chacón Jesús Manuel de la Cruz J. Bermudez-Ortega, E. Besada-Portas. Developing web & twincat plc-based remote control laboratories for modern web-browsers or mobile devices. *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, 2016.
- Viviana Lopez and Aditya Akundi. A conceptual model-based systems engineering (mbse) approach to develop digital twins. pages 1–5, 2022. doi: 10.1109/SysCon53536.2022.9773869.
- Sergio Martin, Aldo Gordillo, Elio Sancristobal, Manuel Castro, and Juan Quemada. Analysis of management systems for virtual and remote labs. pages 1632–1636, 2020. doi: 10.1109/EDUCON45650.2020.9125173.
- E. Sancristobal, S. Martín, R. Gil, Pablo Orduña, M. Tawfik, A. Pesquera, G. Diaz, A. Colmenar, Javier García-Zubia, and M. Castro. State of art, initiatives and new challenges for virtual and remote labs. pages 714–715, 2012. doi: 10.1109/ICALT.2012.232.
- Maggi Savin-Baden. Understanding how to use problem-based learning effectively in remote and virtual labs. pages 1–5, 2012. doi: 10.1109/REV.2012.6293172.