

## Estado del arte de la educación en automática

David Muñoz de la Peña<sup>a,\*</sup>, Manuel Domínguez<sup>b</sup>, Fabio Gomez-Estern<sup>c</sup>, Óscar Reinoso<sup>d</sup>, Fernando Torres<sup>e</sup>, Sebastián Dormido<sup>f</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla.

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática, Universidad de León.

<sup>c</sup>Área de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Loyola Andalucía.

<sup>d</sup>Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Miguel Hernández de Elche.

<sup>e</sup>Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante.

<sup>f</sup>Departamento de Informática y Automática, UNED.

**To cite this article:** Muñoz de la Peña, D., Domínguez, M., Gomez-Estern, F., Reinoso, O., Torres, F., Dormido, S. 2022. State of the art of control education. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 19, 117-131. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16989>

### Resumen

La educación en automática es un área madura en la que multitud de profesores e investigadores han trabajado intensamente para afrontar el reto de proporcionar una educación versátil, con una fuerte base científica. Todo ello sin perder de vista las necesidades de la industria; adaptando los contenidos, las metodologías y las herramientas a los continuos cambios sociales y tecnológicos de nuestro tiempo. Este artículo presenta una reflexión sobre el papel de la automática en la sociedad actual, una revisión de los objetivos tradicionales de la educación en automática a través de los trabajos seminales del área y finalmente una revisión de las principales tendencias actuales.

*Palabras clave:* Curricula del ingeniero de control, E-learning, educación a distancia y sistemas de gestión del aprendizaje, Entornos de experimentación, Evaluación automática, Formación continua, Herramientas docentes y laboratorios, Herramientas interactivas, laboratorios virtuales y remotos, Prácticas docentes, Relaciones con la industria

### State of the art of control education

#### Abstract

Control education is a mature area in which many professors and researchers have worked hard to face the challenge of providing a versatile education, with a strong scientific base. All this without losing sight of the needs of the industry; adapting the contents, methodologies and tools to the continuous social and technological changes of our time. This article presents a reflection on the role of automation in today's society, a review of the traditional objectives of control education through seminal works in the area and finally a review of the main current trends.

*Keywords:* Control engineering curriculum, E-learning, distance learning and learning management systems, Experimental platforms, Automatic evaluation, Long-life learning, Teaching tools and laboratories, Interactive tools, virtual and remote laboratories, Teaching methodologies, Industry relations.

## 1. Introducción

En septiembre de 1952, la revista Scientific American publicó un número completo dedicado a la automática. Se destacaba el papel que estaba jugando esta disciplina en los nuevos avances de la época, particularmente en los procesos de manu-

factura. Desde entonces, la automática se ha vuelto cada vez menos visible para el público en general, quizás en parte debido a su éxito. Las personas interactúan habitualmente con sus aplicaciones de forma continua y sin tener constancia de ello, desde los amplificadores electrónicos, sintonizadores y filtros en televisión y radio, hasta los algoritmos de control de conges-

\*Autor para correspondencia: [dmunoz@us.es](mailto:dmunoz@us.es)

tión que permiten comunicaciones fluidas por Internet, pasando por los sistemas de control de vuelo para aviones comerciales por citar solo unos pocos ejemplos. Por este motivo se conoce a la automática como “la tecnología oculta” (Åström (1999)).

Las aplicaciones de la automática en los procesos productivos han permitido no solo mejorar sus funcionalidades, prestaciones y eficiencia, sino también abordar nuevos campos de aplicación que hasta no hace mucho eran impensables como la robótica colaborativa, la conducción autónoma y los vehículos de exploración espacial. Esto ha hecho que la automática no solo se considere fundamental para las mejoras evolutivas en los productos, soluciones y sistemas actuales, sino también que se posiciona como una tecnología fundamental para hacer realidad visiones y ambiciones futuras en áreas emergentes como la biomedicina, las energías renovables, las infraestructuras críticas y la ciberseguridad industrial. El ámbito de actuación de la automática ha sido en los últimos años cada vez más amplio, siendo, además, un importante catalizador en las evoluciones tecnológicas en campos de aplicación tan dispares como el de las comunicaciones, el social o el sanitario.

La aparición de la robótica de servicios, entendida como toda aquella rama de la robótica que queda fuera de un ámbito puramente productivo, genera una necesidad creciente de adaptación a entornos cambiantes y en muchos casos desconocidos a priori, que necesitan de sistemas de percepción y control cada vez más complejos y avanzados, capaces de garantizar en todo momento la seguridad de los usuarios con los que se interactúa, ya sea en tareas de entretenimiento y ocio, en tareas de rehabilitación de pacientes o en tareas domésticas. Este cambio de paradigma se produce ligado a presentes y futuros desarrollos como por ejemplo en el terreno de la robótica espacial o los vehículos no tripulados o autónomos, tanto terrestres como marinos y aéreos.

La robótica de servicios es un ejemplo de que la automática se aplica cada vez más fuera de sus dominios tradicionales en ingeniería industrial, aeronáutica, química, eléctrica, mecánica o nuclear. Los biólogos están usando los conceptos de la automática para modelar y analizar células y animales; los informáticos para el diseño de enrutadores y programas empotrados; los físicos para medir y modificar el comportamiento de los sistemas cuánticos; y los economistas están explorando las aplicaciones de la realimentación a los mercados y al comercio.

Resumiendo, el campo de la automática está entrando en una era dorada de crecimiento y oportunidades sin precedentes (Lamnabhi-Lagarigue et al. (2017)). Estas oportunidades de expansión se están impulsando por los enormes avances en la tecnología de la información y comunicaciones, la ciencia de materiales, y la tecnología de sensores y actuadores, así como en los fundamentos teóricos de los sistemas dinámicos y de control.

En relación a la educación en el ámbito de la ingeniería, según Froyd et al. (2012), en los últimos 100 años ha habido cinco grandes cambios que han marcado su evolución. Estos cambios se detallan en la Tabla 1.

Los dos primeros cambios se pueden afirmar que se han completado con éxito en el siglo pasado y los tres restantes aún están en curso de desarrollo y, en cierto sentido, serán objeto de análisis en este artículo. La sección “Reduciendo la brecha” revisa los principales retos en relación a los contenidos de los

cursos de automática y su conexión con otras disciplinas, y lo que en algunos casos puede ser más importante, su relación con la industria. La sección “Renovando los métodos” repasa las principales metodologías docentes usadas en el área de automática con una mirada puesta en las más modernas y utilizadas. La sección “El impacto de las nuevas tecnologías” se centra en el impacto de las tecnologías de la información y comunicaciones en la educación. Finalmente, el trabajo termina con una sección de prospectiva que mira hacia el futuro.

Tabla 1: Los cinco grandes cambios en educación en el ámbito de la ingeniería

1	Cambiar la ingeniería como ejercicio práctico de la profesión basada en la experiencia a una educación formal centrada en sus fundamentos científicos.
2	Acreditar los estudios en ingeniería para la práctica profesional.
3	Promover una ingeniería basada en el diseño.
4	Aplicar la investigación en ciencias de la educación, el aprendizaje y el comportamiento social en el diseño de los planes de estudio y en una nueva metodología de la enseñanza en ingeniería.
5	Integrar la tecnología de la información, la computación y las comunicaciones en la educación en ingeniería.

### 1.1. Informes y revisiones sobre la educación en automática

La evolución, los grandes desafíos, los avances teóricos, la maduración y las historias de éxito que se han llevado a cabo en el campo de la educación en automática se han documentado a lo largo de los años en numerosos artículos, informes y revisiones. Estos retos han sido objeto de debate a lo largo del tiempo, pero muchos de los trabajos más influyentes son en general poco conocidos por la comunidad. En esta sección se presentan algunos de estos trabajos seminales.

Uno de los retos fundamentales, presente desde el inicio de la disciplina, es como unificar las necesidades de formación de la industria, normalmente marcadas por una fuerte componente tecnológica de aplicación inmediata y por lo tanto específica del campo de aplicación, con una formación generalista propia de un campo transversal como la automática. El trabajo de Bristol (1986) reflexionaba sobre este dilema.

Posteriormente, para abordar los desafíos y oportunidades emergentes, la IEEE Control System Society organizó un seminario para identificar las necesidades futuras en la educación en sistemas de control (Antsaklis et al. (1998)). Sus conclusiones principales se resumen en la Tabla 2.

El informe Murray et al. (2003), financiado por la Oficina de Investigación Científica de la Fuerza Aérea de los EE. UU. (AFOSR), analizó las tendencias de los sistemas dinámicos y de control con el fin de ofrecer una visión renovada de los desafíos y oportunidades en este campo incluyendo también los aspectos de la educación en automática.

La revisión de Åström and Kumar (2014) expuso un relato histórico completo del desarrollo del campo, así como una perspectiva sobre las oportunidades futuras y reflexiones sobre la interacción entre la teoría y la práctica. Por su parte el informe de Samad and Annaswamy (2013) proporcionó una revisión general, casos de éxito y los desafíos de investigación a los que se enfrenta el campo.

Tabla 2: Conclusiones principales del “NSF/CSS workshop on new directions in control engineering education”

1	La tecnología de los sistemas de control subyace prácticamente en todos los aspectos de la sociedad moderna.
2	La concepción común de control, incluso entre muchos científicos e ingenieros, es demasiado limitada para abarcar el ámbito del campo de los sistemas de control.
3	Las aplicaciones de la tecnología de los sistemas de control aumentarán drásticamente en el futuro con los avances tecnológicos.
4	Internet representa una gran oportunidad para la educación en sistemas de control.

Una mención especial merece la educación de la robótica, que constituye un excelente campo de pruebas para diferentes disciplinas, y que presenta además un gran poder de atracción entre los estudiantes. Además, el uso de la robótica en entornos de aprendizaje formales e informales mejora el aprendizaje de las matemáticas y las ciencias, en la que sin duda la automática juega un papel destacado, así como el pensamiento crítico y las habilidades para resolver problemas (Wagner (1998); Robinson (2005)).

Prueba de ello es que la robótica está presente ya en estudios de formación básica y de grado medio en las etapas tempranas de la formación (Bers and Portsmore (2005); Kolberg and Orlev (2001)), y en etapas educativas más tardías como elemento de experimentación. Desde el año 2000, el profesorado universitario ha explorado el uso de robots como herramientas docentes, siendo desarrollado con mayor profundidad e importancia hasta nuestros días (Candelas et al. (2003)). La Tabla 3 muestra algunas ventajas del uso de la robótica en estudios de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (Chung et al. (2014)).

Todos estos estudios dan testimonio de que la automática es un campo riguroso, con un buen soporte analítico, rico, vibrante y activo que tiene un futuro muy prometedor.

## 2. Reduciendo la brecha

### 2.1. Consideraciones sobre la educación en automática

Aunque la educación tradicional en ingeniería ha sido de gran utilidad durante la segunda mitad del siglo XX, se están produciendo cambios fundamentales que ponen en duda si el sistema educativo actual satisface las necesidades del siglo XXI. La evolución tecnológica, especialmente en los países industrializados, está transformando los sistemas, haciéndolos cada vez más complejos, exigiendo una mayor formación multidisciplinar. Los planes de estudio de ingeniería deberían tener en cuenta esta perspectiva para revisarse y adaptarse a los nuevos tiempos.

El campo de la automática, como ya se ha comentado previamente, es por naturaleza multidisciplinar y universal y por lo tanto los ingenieros de automática están bien preparados para dar forma y liderar este esfuerzo de innovación curricular. La educación, la formación y la diseminación de las ideas de la automática deben evolucionar y adaptarse a los requerimientos que demanda nuestra sociedad del futuro. Esto se puede lograr integrando investigación y enseñanza en todos los niveles.

Tabla 3: Ventajas del uso de la robótica en estudios de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas.

1	Integración de los temas de una forma interdisciplinar.
2	Transformación de conceptos abstractos en aspectos concretos para los estudiantes.
3	Combinación de la teoría con la práctica.
4	Aprendizaje ligado a la práctica que es más activo y atractivo.
5	Entorno de aprendizaje más agradable y motivador.

Un elemento clave es el desarrollo de nuevos contenidos y cursos que enfatizan los conceptos de realimentación así como las matemáticas necesarias para su comprensión, sin requerir que los estudiantes provengan de una formación tradicional en ingeniería. A medida que más estudiantes de biología, ciencias de la computación, ciencias ambientales, física y otras disciplinas desean aprender y aplicar los métodos y las técnicas del control automático, se deben explorar nuevas formas de proporcionar los antecedentes necesarios para comprender los conceptos básicos y la aplicación de las herramientas avanzadas que están disponibles.

Un aspecto relacionado con esto es el fortalecimiento de las habilidades necesarias para trabajar en equipo. Todo el diseño de los sistemas modernos se basa en equipos multidisciplinarios que requieren de cierta habilidad para comprender cómo interactuar de manera efectiva con expertos en el dominio de una amplia variedad de disciplinas. También es importante que a los estudiantes se les proporcione un equilibrio entre la teoría y las aplicaciones. Sería un error pensar que la tarea está hecha cuando se obtiene una descripción matemática de la solución. Es preciso formar estudiantes que sean capaces de resolver problemas en su totalidad, desde el diseño conceptual a la implementación y la puesta en marcha, por lo que se necesita considerar estas capacidades como parte integral de la formación del ingeniero en automática.

Por otra parte, un pecado capital del control automático es creer que los sistemas que se van a controlar están dados a priori. El enfoque tradicional de desarrollar secuencialmente y por separado el diseño del proceso y el control de sus componentes, equipos y máquinas ya no es sostenible, en vista de la creciente complejidad y necesidad de un uso óptimo de los recursos. Muy buenos argumentos para el diseño integrado de un proceso y de su sistema de control fueron ya expuestos de forma muy elocuente en los trabajos iniciales de Ziegler y Nichols (Ziegler et al. (1942)) donde se hace un énfasis especial en que con demasiada frecuencia el ingeniero de control se enfrenta con un proceso que es muy difícil de controlar adecuadamente. Se sugiere que un estudio en sentido amplio de la controlabilidad de un proceso debería hacerse siempre en la etapa de diseño porque es muy costoso hacer los cambios después. Nunca un buen diseño de un sistema de control puede enmascarar un mal diseño del proceso. El control de vuelo es un buen ejemplo de diseño integrado de control y proceso. Los hermanos Wright triunfaron donde otros habían fracasado porque hicieron un aeroplano inestable que era maniobrable. Más tarde se aprendió a construir aeroplanos estables y maniobrables. Hay todavía ventajas sustanciales en tener aviones inestables que descansan sobre un sistema de control para su estabilización (Stein (2003)).

## 2.2. Currícula de ingeniero de automática

Tradicionalmente el currículum de automática se ha caracterizado por ser bastante homogéneo en todo el espectro universitario, sobre todo en los primeros cursos universitarios, sin embargo, los cambios tecnológicos producidos en estos últimos años han propiciado el desarrollo de nuevas herramientas docentes que han motivado cambios en las metodologías utilizadas y en los planteamientos básicos del currículum.

Diferentes asociaciones científicas vinculadas al área de la automática como IFAC, CEA, EUCA e IEEE, han llevado a cabo actividades y eventos relacionados con la educación en sus respectivos congresos y revistas internacionales. En estos foros de debate se han analizado dos cuestiones que se consideran esenciales: 1) Cómo aplicar de manera óptima las nuevas metodologías docentes y 2) Cómo se prevé que será el futuro de la formación en automática y cuál debería ser su orientación.

En este sentido, auspiciado por los comités de educación en control tanto de IFAC como de IEEE se presenta en Rossiter et al. (2020) un importante trabajo sobre cuáles deberían ser los planteamientos para un primer curso de ingeniería de control en los planes de los próximos años. A partir de un amplio y elaborado cuestionario, que fue debatido y discutido en diferentes paneles de congresos de IFAC en 2018 y 2019, se realizaron, aproximadamente, 500 encuestas entre profesionales, tanto del ámbito académico (84 %) como del ámbito industrial (16 %) de 47 países.

En las conclusiones de este trabajo, a pesar de la amplia diversidad de ingenierías, nacionalidades y roles diferentes de los encuestados, se puede decir que se obtiene un amplio consenso en cuanto a los principales bloques temáticos. Estas consideraciones anteriores, dada la transversalidad que tiene la formación en automática, deberían ser matizadas y adaptadas a las carreras en que se imparte dicha disciplina, ya que el ámbito de aplicación es muy diferente de una ingeniería industrial a una ingeniería aeronáutica, o a los campos de la robótica o del control de procesos. Para ello un apartado clave deben ser los correspondientes casos de estudio que deben ser particularizados a cada uno de los grados y másteres. Evidentemente para llegar a esto hay que tener en cuenta que previamente se habrán tenido que realizar las correspondientes adaptaciones en los bloques temáticos para tener un hilo conductor coherente, por ejemplo, particularizando las técnicas de modelado a sus propios ámbitos de especialización.

Respecto del currículum práctico, cabe indicar que en este apartado la información de partida disponible no es tan homogénea ni generalizada, puesto que dependiendo de cada titulación y de cada universidad, los recursos prácticos disponibles son diferentes y escasos en la mayoría de los casos. Esto ha provocado que la formación práctica se haya resuelto de formas muy dispares, pero con una característica común como es el uso generalizado de herramientas informáticas de simulación, las cuales, aunque aportan al estudiante una importante ayuda para la adquisición y asentamiento de los conceptos básicos de control, no cubren, por lo general, todos los aspectos de los sistemas de control y además no permiten abordar las problemáticas asociadas a la implementación real de dichos sistemas. También es importante incidir, aunque parezca evidente, y teniendo en cuenta las posibilidades que nos ofrecen las nuevas tecnologías aplicadas a la formación, que el desarrollo del currículum

práctico tiene que seguir las pautas de los contenidos teóricos, cumpliendo con la complementariedad necesaria para vincular y reforzar tanto el aprendizaje teórico como el práctico, pero sobre todo evitar la disociación, tan habitual y generalizada, de ambos.

También es necesario reflexionar acerca de su secuenciación y sus contenidos ya que existe una cierta tendencia hacia la compartimentación excesiva de las prácticas de laboratorio. Esto se traduce en conjuntos de trabajos aislados por parte de los estudiantes que no tienen en cuenta, ni la complementariedad con los contenidos teóricos ni la continuidad y progresividad en el ritmo del aprendizaje.

Para evitar estas situaciones una estrategia adecuada puede ser la inclusión, en los correspondientes bloques teóricos, de apartados relativos a la implementación y realización tecnológica del control, a ser posible sobre casos que representen la realidad de su aplicación en la industria, de manera que estos sean la base que dé continuidad a las diferentes prácticas realizadas en el laboratorio. Esto le permitirá al estudiante obtener una mejor comprensión de aspectos prácticos importantes.

Otra cuestión clave, relacionada con lo anterior, es la adquisición por parte del estudiante de habilidades y destrezas prácticas sobre equipos reales de laboratorio, no simulados, que le faciliten, no solo el asentamiento de los conceptos teóricos y prácticos del control sino también de los conocimientos necesarios para el manejo de la instrumentación necesaria asociada a este tipo de experimentación, de manera que sean capaces de adquirir, tratar, registrar, procesar y representar, tanto con instrumentación electrónica como con herramientas software, los datos vinculados a cada ensayo/experiencia. Esto les permitirá, por supuesto, confrontar los resultados obtenidos en el laboratorio con los teóricos estudiados, pero además les abrirá, también, el camino hacia el mundo de los datos, que es, hoy en día, cada vez más necesario en el ámbito laboral.

Finalmente cabe hacer por su importancia actual algunas consideraciones sobre como se está abordando desde la automática temáticas y conceptos tales como el aprendizaje automático (machine learning), el aprendizaje profundo (deep learning) o el tratamiento masivo de datos (data mining) que están siendo capitalizados en los estudios de ingeniería por parte de las áreas de conocimiento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial y donde es evidente que la Automática como disciplina tiene mucho que decir. El término aprendizaje automático se refiere a la detección automatizada de patrones significativos en los datos. En las últimas dos décadas, se ha convertido en una herramienta común en casi cualquier tarea que requiera la extracción de información de grandes conjuntos de datos. Estamos rodeados de una tecnología basada en el aprendizaje automático: los motores de búsqueda aprenden cómo brindarnos los mejores resultados, el software antispam aprende a filtrar nuestros mensajes de correo electrónico, las transacciones con tarjeta de crédito están protegidas por un software que aprende a detectar fraudes, las cámaras digitales aprenden a detectar rostros y las aplicaciones inteligentes de asistencia personal en los teléfonos inteligentes aprenden a reconocer los comandos de voz. Los robots y los automóviles actuales están equipados con sistemas de prevención de accidentes que se construyen utilizando algoritmos de aprendizaje automático. El aprendizaje automático también se usa ampliamente en aplicaciones científicas

ficas muy diversas que abarca campos como la bioinformática, la medicina y la astronomía. Una característica común de todas estas aplicaciones es que, a diferencia de los usos más tradicionales de los computadores, en estos casos, debido a la complejidad de los patrones que deben detectarse, un experto humano no puede proporcionar una especificación explícita y detallada de cómo tales tareas deben ser ejecutadas. Tomando el ejemplo de los seres inteligentes, muchas de nuestras habilidades se adquieren o refinan aprendiendo de nuestra experiencia (en lugar de seguir instrucciones explícitas que se nos dan). Las herramientas de aprendizaje automático se ocupan de dotar a los programas de la capacidad de “aprender” y adaptarse. En este sentido conviene destacar que estos algoritmos toman como base la identificación y calibración de modelos dinámicos que ha sido tradicional y una parte fundamental de nuestra disciplina. Así pues, en todas estas nuevas áreas emergentes de gran interés no solo científico y académico sino industrial y económico la formación de los especialistas en automática les sitúa en una posición ideal para liderar y coordinar proyectos multidisciplinarios que utilizan estas tecnologías.

### 2.3. *Aprendizaje a lo largo de la vida y relaciones con la industria*

La formación en automática hacia los trabajadores de los sectores productivos y egresados en general del mundo de la ingeniería ha sido siempre una actividad permanente, desde hace bastantes años, en el área de ingeniería de sistemas y automática en la universidad española. Esta actividad ha facilitado la transferencia de conocimientos actualizados y la innovación hacia dichos sectores.

Hoy en día se puede afirmar que estas actividades tendrán que ser reforzadas como consecuencia de los fuertes cambios tecnológicos que se van a experimentar y por la falta de capacidades en determinadas tecnologías en los recursos humanos disponibles. Además, estas actividades tendrán que ser cada vez más continuas y con trayectorias más largas, constituyendo lo que se denomina “lifelong learning” o aprendizaje a lo largo de la vida. Esta idea cristalizó como concepto en la década de 1970 cuando se publicó el informe Faure (Faure et al. (1972)), un documento utópico que preveía el aprendizaje a lo largo de la vida como una fuerza transformadora no sólo en las escuelas, sino en la sociedad en general.

En efecto, la transferencia de conocimientos al sector productivo en el ámbito de la automática tendrá que orientarse en los próximos años, no solo a cubrir las necesidades propias de los trabajadores como consecuencia de la propia evolución de la tecnología, sino también, y en primer lugar, en la aportación de las capacidades digitales necesarias en las que se van a basar dichas actividades formativas y para las que se tienen fuertes carencias, tanto en España como en Europa. Esto se viene poniendo de manifiesto a lo largo de diferentes estudios europeos. Ya en el año 2016 el 40 % de las empresas europeas ponían de manifiesto su dificultad para encontrar perfiles adecuados.

En el caso de España, además, se tiene un importante déficit de talento, con importante reducción de las matrículas en las disciplinas científicas, tecnológicas y matemáticas como ya

indicaba el informe Randstad. Ante esta situación la Comisión Europea lanzó la iniciativa de la Agenda de Capacidades para Europa 2016, reforzada con la Nueva Agenda de Capacidades de 2020, destacando las nuevas necesidades formativas para “ayudar a las personas a desarrollar sus capacidades a lo largo de la vida en un entorno en el que el aprendizaje permanente sea la norma”, abordando cambios radicales y muy necesarios en cuanto a las capacidades digitales se refiere.

Respecto de las actividades formativas propiamente dichas del ámbito de la automática en relación con la industria, estas tendrán que diseñarse, como es lógico, teniendo en cuenta los nuevos retos tecnológicos en los que se encuentra inmerso el sector productivo, como consecuencia de su transformación hacia la industria conectada o industria 4.0.

Otro reto importante, en nuestro campo, que se tendrá que abordar como consecuencia de la transformación de las estructuras productivas lo va a constituir la denominada ciberseguridad industrial. Esta debe ser entendida y aplicada como una herramienta adicional e imprescindible, ya en estos momentos, en la implementación y despliegue de cualquier tipo de estrategia de automatización, control y supervisión, por muy básicas que sean. En este sentido conviene destacar el fuerte aumento, en los últimos años, en cuanto al número de incidentes de ciberseguridad en tecnologías e instalaciones industriales sobre los sistemas de control. Dicha formación, además, tendrá que diseñarse y desarrollarse de forma muy específica y focalizada para las diferentes tecnologías de implementación de los sistemas de automatización y control con los que se trabaja en el ámbito de la automática, ya que, a día de hoy, cada fabricante indica sus propios procedimientos de seguridad. Otro aspecto muy importante, y todavía muy poco considerado, es el relativo a la implementación de dichas estrategias teniendo en cuenta los aspectos de desarrollo de software seguro y con validación, test y auditoría de los algoritmos y programas utilizados.

Por otro lado, al igual que en otras disciplinas en la actualidad, la automática necesita del manejo de los datos y de sus algoritmos allí donde se aplica, tanto para la extracción y gestión del conocimiento de los sistemas, como para la operación, presentación y visualización de los mismos sobre modernos sistemas de supervisión industrial en los que cada vez es más necesario tener representaciones más holísticas y complejas. La industria lleva años obteniendo y acumulando datos de sus procesos, pero haciendo un uso básico de los mismos, ya que, en general, tiene dificultades para disponer de los recursos humanos necesarios y cualificados que puedan abordar estas tareas. Es por lo tanto necesario abordar esta problemática de formación, sobre todo en los aspectos de recualificación de trabajadores de la industria, ya que estos parten de un conocimiento limitado en el uso de estas herramientas.

### 3. **Renovando los métodos**

Desde 1958, la IRE y luego la IEEE Transactions on Education<sup>1</sup>, los Proceedings del IEEE y otras revistas de educación en ingeniería, como Journal of Engineering Education, se han centrado en muchos temas que son importantes en la educación en

<sup>1</sup>El Instituto de Ingenieros de Radio (IRE) fue una organización profesional, con sede en los Estados Unidos, que existió desde 1912 hasta 1962. El 1 de enero de 1963 se fusionó con el Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos (AIEE), formando así el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE).

ingeniería, incluido qué contenidos deberían enseñarse y cómo deberían enseñarse, la acreditación, el diseño, y la investigación en educación en ingeniería, así como el uso de la tecnología en la educación en ingeniería. ¿Cómo aprenden mejor los estudiantes? Esta cuestión sigue planteándose y debatiéndose entre los expertos.

Desde la aprobación en España en 2007 de las regulaciones para la implantación de los planes del Espacio Europeo de Educación Superior, las universidades en su conjunto han cambiado la metodología docente, incorporando el aprendizaje activo a las actividades formativas reduciendo de esta forma las horas de atención pasiva a la exposición oral. Además, se han adoptado sistemas de evaluación más progresivos, tecnológicos y orientados a las competencias que se han de desarrollar. Todos estos aspectos han supuesto una revolución, no solo en la forma de hacer, sino en la de hablar y pensar de los docentes (Hartikainen et al. (2019)).

En el área de la automática, y probablemente en la mayoría de las áreas de ingeniería, se da una paradoja respecto a los métodos docentes. Por un lado, si se hace una búsqueda bibliográfica de los estudios sobre las distintas metodologías en el aula, su aplicación y sus resultados, se detecta un cierto desdén, o incluso ignorancia respecto a la terminología, recursos y tendencias actuales. Sin embargo, esto es un espejismo, ya que al consultar las publicaciones de cualquier congreso reciente, se observa una infinidad de iniciativas prácticas innovadoras, ambiciosas, complejas, de gran coste de implantación, con un énfasis decidido en el aprendizaje activo y el desarrollo de competencias, y una recurrencia de métodos modernos como el aprendizaje basado en proyectos, aprendizaje basado en problemas y otras iniciativas.

Una posible explicación a este hecho reside en la tradición, o más bien en la ausencia de ella. Las escuelas de ingeniería, desde su concepción en la época de la Ilustración, han tenido una existencia al margen de las universidades tradicionales, y han servido desde sus inicios a los estados o a la burguesía, para desplegar y controlar sus dominios e infraestructuras (Aracil (2010)). No se deben, por tanto, a una tradición, sino a un fin práctico, han vivido al margen del legado de las grandes instituciones universitarias, y no han tenido más opción que la de impartir una docencia basada predominantemente en habilidades y destrezas. Quizá sin saberlo, desde el siglo XIX la formación ha estado basada en competencias, y ha estado a cargo, en gran medida de profesionales con una limitada orientación teórica o académica. Si se observa el curso posterior de esta historia, este hecho diferencial ha sido atenuado con la paulatina incorporación a las universidades de las antiguas Escuelas de Ingeniería, posiblemente perdiendo autonomía y carácter práctico, pero ganando en otros aspectos muy valiosos como la incorporación de la investigación y la especialización del docente.

Partiendo de estos orígenes, la tradición docente ingenieril se ha mantenido fiel a un equilibrio entre la docencia basada en la transmisión directa y la docencia basada en la actividad

del estudiante. Con distinto grado de acierto, con tropiezos como la excesiva especialización o la anteposición de conceptos abstractos al posterior planteamiento de los problemas reales que debe resolver cada materia. De algún modo el aprendizaje activo siempre ha estado presente.

Resumiendo, el ingeniero docente está inmerso en un proceso tan natural para él, que ni siquiera reconoce su existencia, como sucedería con un pez en el medio acuático, sin embargo, si esto se interpreta como que está exento de comprender y aplicar lo que la pedagogía explica y ofrece hoy en día, está cometiendo un grave error.

### 3.1. Principales metodologías empleadas

La clase magistral o docencia directa quizá sea la metodología que más controversia y rechazo ha levantado en los últimos tiempos, sin embargo, este hecho contrasta con la importancia de su uso. Las características de este medio han variado recientemente de forma sustancial y requieren una revisión y reflexión de sus posibilidades y limitaciones en el contexto de la automática. En el libro *Dynamics Lecturing* (Harrington and Zakrajsek (2017)) se hace una defensa de la clase magistral como medio de impartición de materias a nivel de grado y en muchos casos se proponen estrategias concretas para la implicación del estudiante, basadas en numerosas evidencias científicas. Esta obra y sus referencias sostienen que la docencia directa es el medio docente de mayor ancho de banda, es decir de mayor cantidad y calidad de los conceptos que se pueden transmitir. También destaca en factores psicológicos y sociales, facilita la correcta ordenación de los conceptos científicos y permite la transmisión de conocimiento no explícito mediante la observación de las habilidades del docente, por ejemplo, construyendo y depurando simulaciones complejas, o ajustando controladores por métodos iterativos. Finalmente, otra ventaja de la clase magistral es que permite a los alumnos tener referentes, en el sentido de que los alumnos suelen adoptar formas de afrontar la vida tomando como ejemplo a los que consideran “mejores profesores”.

Una crítica habitual a la clase magistral, según el modelo de Humboldt<sup>2</sup>, es la diferencia de ritmo entre la explicación, única, y la diversidad, individual, de procesos de aprendizaje. Una clase magistral impartida a un colectivo abandona toda posibilidad de adaptarse al proceso de aprendizaje individual del estudiante. Actualmente, existen numerosas estrategias que ayudan a paliar este efecto. Por ejemplo, la grabación de clases para su posterior visualización es una buena práctica reconocida y que permite a los estudiantes asimilar de modo pausado fuera del horario de clase las partes más difíciles.

La expansión de las tecnologías de la información, que sirven de apoyo a la adaptación de los ritmos de aprendizaje, en ocasiones juegan un papel contrario: la proyección de desarrollos matemáticos en pantalla, sin la graduación que conlleva su exposición a mano en pizarra, puede resultar considerablemente contraproducente. En general se considera una buena práctica docente realizar desarrollos a mano en clase, delante de una

<sup>2</sup>W. von Humboldt, político, Ministro de Educación, filósofo y lingüista, al que se le reconoce como el arquitecto del sistema de educación prusiano y fundador de la Universidad Humboldt en Berlín, representa una corriente más idealista donde la relación entre investigación y docencia se considera esencial porque ambas están intrínsecamente relacionadas. En sus propias palabras “la universidad no es un lugar donde los estudiantes aprenden a través de la enseñanza sino un lugar donde los estudiantes aprenden a través de su participación en la investigación” W. Humboldt, “On the spirit and the organizational framework of intellectual institutions in Berlin”, *Minerva*, 8, pp. 242-267, 1970 (Trabajo original publicado en 1809).

pizarra o tabletas digitalizadoras, y en la medida de lo posible, grabarlos para su consulta posterior. De esta forma, con los desarrollos a mano, la exposición se despliega paulatinamente a un ritmo accesible, acompañado de comentarios y reflexiones espontáneas, iteraciones e incluso errores controlados, que acercan al estudiante y lo confraternizan con el proceso (Rossiter et al. (2018)).

Cabe una última alusión a la docencia directa en formato remoto o virtual. La pandemia COVID-19 ha permitido evidenciar con cierto lujo de detalle las diferencias entre impartir una clase de forma presencial o remota. En el primer caso, la comunicación cara a cara genera un vínculo psicológico afectivo entre los participantes del aula que es difícil de reproducir al completo en el formato de videollamada. Sin embargo, diversas experiencias ilustran que, dentro de las asignaturas de control, robótica y automatización existen numerosos aspectos que se adaptan mejor a un formato de impartición en línea. Concretamente, aspectos de alto contenido visual y basado en herramientas informáticas, como la construcción de modelos dinámicos, o el trabajo con planos de instalaciones de automatización, concentran todo el contenido expositivo en la pantalla del ordenador y por tanto se amoldan mejor a una docencia remota. Si se dispone de las herramientas adecuadas, el formato de docencia en línea puede ser altamente activo y cooperativo: Todos los estudiantes realizan operaciones en sus ordenadores, guiados en una pantalla compartida por el docente, abriendo así una vía natural hacia los nuevos roles docentes.

En cualquier caso, dado que los estudiantes son diversos, los canales para el aprendizaje han de ser variados, y la docencia directa ha de incorporar una amalgama de diferentes medios<sup>3</sup>. En este sentido, la docencia directa se puede enriquecer sustancialmente con recursos como clickers (Aljaloud et al. (2015)), evaluación automática, herramientas interactivas (Sánchez et al. (2005)), aprendizaje colaborativo (Göl and Nafalski (2007)), gamificación (Huang et al. (2020)), docencia invertida (Akçayır and Akçayır (2018)), etc...

La metodología de aprendizaje basado en problemas tiene una denominación que pudiera parecer trivial, pero es menos común de lo que cabría pensar. Se trata de una metodología que consiste en la exposición temprana a los estudiantes a los problemas, aunque no se haya desarrollado completamente la teoría. Al conocer el problema de antemano, los estudiantes reciben con mayor motivación los conceptos y procedimientos que ayudan a resolverlos. El argumento a su favor es la capacidad de promover el desarrollo del pensamiento crítico, la capacidad de resolución de problemas, la empatía, la gestión de emociones y las habilidades de comunicación (Lehmann et al. (2008); Chen et al. (2021)).

En el área de la automática es escaso el uso de este enfoque, aunque casi todos los cursos y textos clásicos sobre los fundamentos del control comienzan con uno o varios ejemplos motivadores. Es posible que la razón de no emplear esta dinámica se deba a que la automática es un área interdisciplinar de la ingeniería, donde se necesita emplear conceptos abstractos para navegar por la complejidad de las interacciones que se producen en los sistemas realimentados. En el área de la robótica sí

ha tenido más presencia esta propuesta, gracias a las pequeñas plataformas robóticas modulares en las que se dispone de una serie de sensores y actuadores de fácil montaje y que permiten abordar numerosos problemas reales desde la intuición. En los cursos de automatización, los simuladores industriales han supuesto un salto sustancial a la hora de presentar problemas al estudiante.

Una variante del aprendizaje basado en problemas es el aprendizaje basado en retos, donde los problemas a los que se exponen los estudiantes proceden de problemas reales que se plantean en la sociedad (Rajkumar et al. (2021)). Este paradigma goza de popularidad en el área de administración de empresas, conocido como método del caso, y en ciertas áreas de ingeniería como el transporte, la energía y el medio ambiente. En el ámbito universitario, esta estrategia suele requerir un apoyo institucional, y por ello se destaca especialmente la labor de centros como el Instituto Tecnológico de Monterrey, que sitúa el desafío planteado en el centro de su modelo formativo. Una característica del aprendizaje basado en retos es que, al provenir de circunstancias reales, son multidisciplinares por naturaleza lo que supone una ventaja en la formación y al mismo tiempo supone un problema para encajarlo en el sistema académico (Membrillo-Hernández et al. (2021)).

Con esta metodología, al traducir un problema industrial a una serie de especificaciones, el estudiante ha de concretar un camino entre muchas alternativas posibles, con un alto grado de incertidumbre. Las habilidades de diseño, muy valoradas por la industria, no están presentes en enfoques más tradicionales (Chandrasekaran et al. (2013)). En el área de la automática, no es sencillo encuadrar esta metodología, ya que, como se ha comentado previamente, el lenguaje especializado es necesario para la propia descripción de los problemas. Sin embargo, en temas más específicos como la visión artificial o los drones, el equipamiento cada vez es más sencillo de operar o programar gracias al avance tecnológico, trasladándose el foco de la formación desde las destrezas de implementación hacia la habilidad, más abstracta y práctica, de proyectar los retos de la realidad a las tareas que pueden realizar estos sistemas.

Un ejemplo sería la necesidad de construir un almacén automático para guardar los pedidos de un centro logístico en la zona de recogida. Esta especificación, de orden social, deja abierta la opción del uso de robots, transelevadores, cintas transportadoras u otros mecanismos. En este ejercicio, no se traducen directamente los requisitos industriales a especificaciones de control, sino que se requiere primero de una especificación de la arquitectura del sistema, en la que se integren varios equipos, y a continuación una especificación para cada uno de los componentes y para la gestión óptima de la celda completa. El desarrollo de este tipo de retos probablemente requiera varios meses, pero mediante una organización en grupos con una detallada planificación, es posible reducirlo a sólo unas semanas.

La metodología de aprendizaje basado en proyectos y retos, se desarrolla en toda su amplitud cuando el estudiante puede dedicar uno o dos meses a una tarea concreta, desarrollando una secuencia de decisiones, ensayos de prueba y error, montaje y

<sup>3</sup>S. Dormido, Investigación y Docencia en la Universidad: ¿Hay intereses contrapuestos?, Discurso de Investidura como Doctor Honoris Causa de la Universidad de Almería, 2014.

conexión de hardware, programación y análisis de resultados de forma iterativa y cíclica (Frank et al. (2003)). A su desarrollo han contribuido las múltiples iniciativas de laboratorios para llevar a casa en los que los estudiantes pueden trabajar con péndulos, cuadricópteros o sistemas robóticos de forma individual o en grupo para llegar a un resultado funcional.

Las recomendaciones en este ámbito son el empleo de equipos de bajo coste accesibles en todo momento, robustos con una interfaz de programación sencilla y bien documentada, a ser posible con videotutoriales. Los objetivos de evaluación deben ser establecidos con especial cuidado ya que a menudo solo se presta atención al funcionamiento, sin recoger las evidencias necesarias que se generan a lo largo de todo el proceso sobre las competencias y conceptos de la asignatura. Por ejemplo, puede lograrse el objetivo de controlar el sistema propuesto, sin comprensión alguna del proceso de ajuste del controlador, cuando se trata de un sistema estable sin retardos. En estas situaciones, en las que es necesaria la recogida de evidencias en el proceso, son de utilidad los laboratorios virtuales, que permiten hacer una abstracción de las imposiciones del hardware para concentrarse en los aspectos concretos que se quieran trabajar.

Otra de las posibilidades pedagógicas que permite la automática es el planteamiento de competiciones y juegos entre los estudiantes, lo que supone una herramienta poderosa para el profesorado a la hora de mejorar la motivación e interés por la disciplina (Huang et al. (2020)). Por ejemplo, en los últimos años hay multitud de ejemplos del uso de competiciones robóticas en la docencia en todos los niveles educativos, inicialmente en forma de competición abierta, sin metas concretas.

Como reflexión final, las nuevas propuestas metodológicas de formación deben ser planteadas para un desarrollo innovador de las mismas en el nuevo escenario que se está generando desde hace unos pocos años, como es el de la digitalización de la sociedad y, muy particularmente, en el de la digitalización de la educación universitaria. Esta debe entenderse, no como un entorno de formación a distancia basado en la acumulación sucesiva y secuencial de contenidos digitalizados/escaneados en alguna de las plataformas existentes para la gestión del aprendizaje, sino como un espacio de trabajo verdaderamente digital, colaborativo y multidireccional entre todos los intervinientes en la formación. Además de la información inherente a cada asignatura, también se comparten resultados de aprendizaje, de experiencias de experimentación de laboratorio y que, a su vez, puedan ser utilizados, de forma continua y recurrente, en las correspondientes clases teóricas y que sirvan de ejemplo de casos prácticos. En la siguiente sección se revisa el impacto de las nuevas tecnologías en el área.

#### 4. El impacto de las nuevas tecnologías

Resulta evidente que desde hace unas décadas la influencia de las nuevas tecnologías en el binomio enseñanza/aprendizaje ha sido enorme en todas las disciplinas del conocimiento, y particularmente, en la automática. Con la irrupción de internet, surge inmediatamente la posibilidad, de forma constante y paulatina, de acceder a una mayor cantidad de información. A partir de este momento, el estudiante se enfrenta a una dinámica de aprendizaje diferente, en la que fundamentalmente debe

ser capaz de construir el conocimiento sobre la materia a partir de múltiples fuentes de información, en general muchas más de las que se encontraba habituado. A modo de ejemplo, basta realizar una búsqueda en Google de términos relacionados con la automática para constatar la elevada cantidad de información a la que un estudiante puede acceder como muestra la Tabla 4.

Tabla 4: Búsqueda en Google de términos relacionados con la automática (16/12/2021)

Término de búsqueda	Resultados (millones)	Artículos (miles)	Vídeos (miles)
Feedback control systems	1750	5760	43300
Robot kinematics	21,9	487	119
Root locus	38,2	1320	174
Denavit-Hartenberg	0,238	27,7	4
Nyquist control	7,87	243	54,9
PID	2250	2220	15900
Control virtual laboratory	140	3400	836

Los cambios generados por los avances tecnológicos empleados en educación afectan a todos los procesos formativos, que por simplicidad dividiremos en presentación de contenidos, desarrollo de habilidades o destrezas y evaluación de los resultados de aprendizaje.

Esta sección se organiza de acuerdo con las categorías mencionadas, describiendo en cada apartado las innovaciones más destacadas. Cabe mencionar que esta delimitación, basada en el objetivo pedagógico de cada apartado, no se preserva exactamente en las herramientas específicas, que en numerosos casos incluyen funcionalidades que afectan a la transmisión de contenidos, a la experiencia de aprendizaje por la vía de la interactividad y a la evaluación de los resultados.

##### 4.1. Herramientas de presentación de contenidos

Sin duda, uno de los grandes avances relacionados con el aprendizaje que ha posibilitado el desarrollo de internet lo constituye la aparición de los sistemas de gestión de aprendizaje en línea conocidos como LMS (learning management systems). Estos sistemas configuran un entorno virtual de aprendizaje en el que el estudiante a través de un ordenador con conexión a internet accede a múltiples contenidos estructurados y programados desde cualquier lugar y en cualquier momento. Estos sistemas permiten administrar, programar, secuenciar y evaluar todas las actividades relacionadas con el aprendizaje a través de un proceso de enseñanza en línea.

Es posible encontrarse con diferentes capacidades en los sistemas LMS, pero todos ellos disponen al menos de unos elementos básicos como son un sistema de registro de los estudiantes, una biblioteca de recursos con diferente grado de interactividad, un sistema de verificación y/o seguimiento del trabajo, así como un sistema de evaluación y/o tutorización. Una de las principales características de estos sistemas es integrar un conjunto de herramientas educativas que posibilitan la gestión de todo el proceso de aprendizaje entre las que destacan las herramientas de gestión y distribución para el almacenamiento, estructuración y organización de los diferentes contenidos de una materia, así como de las herramientas de comunicación. La comunicación entre los participantes es un aspecto fundamental. Esta comunicación se puede diferenciar en comunicación

asíncrona, mediante la utilización del correo electrónico, foros relacionados con la materia, etc.; y comunicación síncrona mediante la utilización de chats o elementos de dibujo interactivos en los que el profesor y el estudiante comparten una plataforma virtual común.

Durante los últimos años, en el ámbito de la automática, se han popularizado los cursos tipo MOOC (massive online open courses), ofreciendo cursos a distancia que son accesibles a través de internet. En muchas ocasiones son gratuitos, siendo el acceso a través de internet el único requisito necesario, de forma que se pueden registrar sin límite de participantes cualquier persona que se encuentre interesada en el tema que se oferta. La mayor parte de estos cursos son autocontenidos y la docencia se realiza íntegramente de forma asíncrona. Sobre la base de estos cursos han surgido plataformas integradoras que proporcionan acceso a estos cursos. En otras ocasiones tras la realización del curso es posible obtener un certificado del mismo mediante pago a la entidad organizadora. Hay plataformas como edX<sup>4</sup>, en donde se pueden encontrar múltiples cursos de contenidos relacionados con la automática como por ejemplo ‘Dynamics and Control’, ‘Robotics Foundations’, y ‘Autonomous Mobile Robots’. Otra de estas plataformas de autoaprendizaje es Coursera<sup>5</sup> con múltiples cursos que integran contenidos y autoevaluación que permite un aprendizaje en línea de forma asíncrona. Esta plataforma además reúne programas en los que se integran un conjunto de cursos relacionados.

También son importantes los contenidos docentes de libre distribución que se pueden encontrar en InternetArevalo et al. (2020). Buena prueba de ello es el repositorio docente de CEA<sup>6</sup> en el que se dispone de magníficos materiales aportados a la comunidad docente en las disciplinas del control automático y la robótica. En los grupos temáticos grupos temáticos de IEEE<sup>7</sup> y IFAC<sup>8</sup> también se han llevado a cabo iniciativas para recopilar material docente, aunque esta tarea es en general compleja y en estos repositorios no se cubre todo el material disponible.

#### 4.2. Herramientas para adquisición de habilidades/destrezas

Como ha quedado puesto de manifiesto en secciones previas, la enseñanza práctica de la automática es un aspecto fundamental para poder afianzar y constatar los conocimientos que se pueden adquirir en el proceso de aprendizaje mediante la teoría o la resolución de problemas. Resulta fundamental la realización de prácticas y experiencias interactivas con sistemas físicos para asentar y afianzar el conocimiento adquirido. Proporcionar experiencias de laboratorio atractivas es uno de los desafíos para una educación universitaria eficaz en las disciplinas de ingeniería.

Un buen espacio de trabajo en el que proyectar la innovación en este tipo de experiencias pueden ser los laboratorios remotos y virtuales. Estos han sido, y siguen siendo, una línea

de investigación muy avanzada de diferentes grupos de investigación españoles, del área de ingeniería de sistemas y automática, en los que se han obtenido resultados interesantes, que han dado lugar a experiencias colaborativas y en red sobre diferentes tipos de sistemas industriales (Heradio et al. (2016a,b); Díaz et al. (2021)). Como comentario adicional, el modelado y simulación como herramienta de ingeniería está recibiendo mucha atención fuera de la comunidad de comunidad de automática con la aparición de los gemelos digitales como productos estrella en muchas empresas tecnológicas y centros de investigación relacionados con el sector industrial<sup>9</sup>.

Como se ha comentado previamente, en ocasiones la experimentación con plantas no puede ser sustituida por las simulaciones de estas, y la enseñanza práctica debe basarse en experiencias con sistemas físicos. De esta forma, además de los laboratorios virtuales, se desarrollan de forma paralela los laboratorios remotos en los que el usuario interactúa a través de internet con dispositivos físicos ubicados en los laboratorios tradicionales. Este tipo de sistemas suponen una complejidad adicional notable dado que es preciso manejar, controlar y mantener un dispositivo físico real sobre el que los estudiantes interactúan a distancia como si estuvieran presentes físicamente en el laboratorio (Dormido (2004)).

Mientras que los laboratorios virtuales y remotos han realizado un importante recorrido en control automático y en robótica, en automatización industrial, hasta recientemente, no había aplicaciones interactivas suficientemente maduras para dar un soporte avanzado al desarrollo de competencias. Este retraso se debe, posiblemente, al carácter integrador de los entornos de desarrollo de autómatas programables, donde las funcionalidades que aportan interactividad se han asumido dentro del mismo. En los principales entornos, se pueden crear visualizaciones que representan paneles de operación o una planta completa incluyendo elementos móviles, sensores, tanques con nivel de llenado, indicadores y otros componentes. Esta funcionalidad ha servido para el desarrollo de numerosas aplicaciones interactivas de apoyo a la docencia.

Recientemente se ha popularizado un nuevo tipo de virtualización consistente en simuladores industriales con gran calidad visual y detalle físico. Estas factorías simuladas, están controladas a través de un programa corriendo en un PLC físico o un programa corriendo en un PLC simulado, vía TCP/IP u OPC. Ejemplos de estos sistemas son Factory IO<sup>10</sup> y Simcad Pro<sup>11</sup>. También se incluyen sistemas de modelado físico intermedios (alta calidad de visualización, modelado físico limitado) como ABB Robotstudio<sup>12</sup>.

Otra de las variantes que ha surgido con el avance de las tecnologías durante los últimos años es la utilización de laboratorios de bajo coste para la realización de prácticas docentes. Si bien es cierto que en algunos casos este tipo de laboratorios

<sup>4</sup><https://www.edx.org/>

<sup>5</sup><https://coursera.org/>

<sup>6</sup><https://www.ceautomatica.es/recursos-formativos-online-en-automatica/>

<sup>7</sup><http://ieeecs.org/tc/control-education/resources>

<sup>8</sup><http://www.aurova.ua.es/tc94repository/tags.php/CC9-Social>

<sup>9</sup><https://www.automaticaeinstrumentacion.com/texto-diario/mostrar/3060474/digital-twins-industria-procesos-palabras-hechos>

<sup>10</sup><https://factoryio.com/>

<sup>11</sup><https://www.createasoft.com/>

<sup>12</sup><https://new.abb.com/products/robotics/es/robotstudio>

no pueden suplir las experiencias que se obtienen con la experimentación y control de sistemas a escala real donde el estudiante tiene opción de enfrentarse a situaciones que aparecerán en el entorno industrial, en muchas otras ocasiones permiten realizar prácticas con elementos físicos reales accediendo a dispositivos mucho menos costosos. La falta de financiación para la adquisición de nuevo equipamiento, así como su mantenimiento, ha originado en muchos centros la necesidad de desarrollar y reformar experimentos de forma que se utilicen kits baratos que incluso en ocasiones los propios estudiantes pueden trasladar a casa.

A modo de ejemplo, en Reguera et al. (2015) se presenta un servo motor basado en componentes tecnológicos de un coste reducido y en Soriano et al. (2014) se presenta una plataforma educativa de bajo coste fácilmente programable desarrollada para la realización de prácticas con un robot móvil diferencial y un brazo robot.

Algunos de los elementos comunes que aparecen en todas estas plataformas de bajo coste son los microcontroladores utilizados (Arduino, Raspberry, etc.) que ofrecen una potente capacidad de cálculo junto con una integración y comunicación transparente con programas de cálculo habitualmente utilizados por los estudiantes como Matlab Lerma et al. (2021).

En relación con los sistemas físicos y componentes que lo integran destaca la posibilidad de utilizar piezas y motores que se pueden ensamblar fácilmente para la creación de kits de muy bajo coste para la realización de prácticas como el control de brillo de diodos led, temperatura, velocidad o posición de un motor de corriente continua (Foulis and Papadopoulou (2018)).

Muchos centros docentes están llevando a cabo un paso adicional, como es la posibilidad de que los propios estudiantes realicen previamente los diseños de los sistemas a controlar a partir de estos elementos de bajo coste disponibles en el mercado. Resulta especialmente interesante este aspecto en las titulaciones de ingeniería por su carácter integrador de múltiples conocimientos impartidos en diferentes materias. Para la construcción de este tipo de plataformas, el estudiante debe integrar y poner en común estos conocimientos, lo que sin duda alguna favorece y potencia el desarrollo de competencias que le acercan a la vida profesional.

#### 4.3. Herramientas para la evaluación de resultados del aprendizaje

En el contexto actual de limitación de recursos, tamaño creciente de grupos y mayor demanda de los estudiantes de realimentación sobre su progreso, son de especial interés las herramientas de automatización de la calificación (Rossiter (2019)).

La evaluación automatizada de trabajos y exámenes por computador, conocido como automated assessment on computer aided assessment (CAA), ha experimentado una expansión notable en los últimos años (Keady et al. (2012)). Sus ventajas son numerosas: la optimización del tiempo del profesorado, las oportunidades de personalización de ejercicios y soluciones, la disponibilidad de realimentación inmediata para el estudiante, la posibilidad de integración en procesos automatizados de tutoría adaptativa o la generación de datos estructurados para la analítica de aprendizaje, exceden las desventajas como la brecha digital, despersonalización de la enseñanza, exceso de carga de trabajo del estudiante o potenciales fraudes.

En el ámbito de las materias básicas de ingeniería, como matemáticas, física, química o programación, los sistemas de evaluación en línea, como por ejemplo Becerra-Alonso et al. (2020) han sido fundamentales en el desarrollo de los MOOCs con procesos de evaluación adaptativos muy potentes: las plataformas Khan Academy, Edx, Coursera y otras muchas poseen motores parametrizables de evaluación automática. Este tipo de cursos masivos han avanzado hasta permear todas las áreas de conocimiento a un nivel intermedio, incluyendo el área de automática a todos los niveles. En el ámbito de la formación universitaria, la totalidad de los LMS actuales como Moodle o Blackboard incorporan funcionalidades de evaluación automática de algún tipo.

Los tests de respuesta múltiple son los medios de calificación automática más estudiados pedagógica y estadísticamente, y sin embargo, en ingeniería, por la prevalencia de cálculos y problemas en la evaluación, han quedado relegados a un segundo plano. En control automático, el carácter procedimental de las asignaturas acusa más aún este hecho, siendo infrecuente su uso.

Avanzando en complejidad, se encuentran los sistemas basados en fórmulas, que permiten establecer la relación pregunta-respuesta de una pregunta autoevaluada en forma matemática. Esto permite generar enunciados individualizados sin límite de variabilidad, y están presentes en plataformas comerciales como Pearson MyLab Math.

Sin embargo, para lograr la máxima flexibilidad a la hora de diseñar actividades evaluadas automáticamente, es preciso que el proceso de calificación se pueda configurar programáticamente. En este contexto, aparece la evaluación algorítmica, en la que el docente diseña el ejercicio y lo entrega libremente, sin apenas restricciones a priori. Tan solo se requiere que los resultados del trabajo se puedan agrupar en un conjunto de datos en forma cuantitativa. Los enunciados se personalizan en los valores de entrada, pero también en las especificaciones de bucle cerrado, y en los caminos y las decisiones que llegan a una solución válida. Este paradigma (Muñoz de la Peña et al. (2012); Sánchez et al. (2020)) se ajusta con naturalidad a muchos problemas de control automático: diseño y ajuste de controladores, análisis frecuencial, asignación de polos, control en variables de estado, control predictivo, etc.

Sin embargo, en automatización industrial y en robótica, a menudo la solución a un ejercicio no es cuantitativa, sino algorítmica. Una alternativa viable en estos casos es el recurso a la evaluación automática basada en simuladores o herramientas interactivas. Si se dispone de un simulador de la planta o robot sobre el que poner a prueba el algoritmo de control, y si este simulador es controlable programáticamente, entonces es posible evaluar el resultado del trabajo del estudiante en función del comportamiento del sistema controlado (del Pozo et al. (2013)). En el caso de las herramientas interactivas, muchos de los desarrollos que han sido presentados han sido reprogramados de manera que recopilen información de la interacción del estudiante para poder llevar a cabo una evaluación automática (Farias et al. (2016)).

#### 4.3.1. ¿Qué aspectos de la formación en automática son evaluables automáticamente?

Al plantearse cómo se aplican las técnicas de evaluación automatizada de los resultados de aprendizaje a la formación en el área de automática se observa que estos resultados son tan diversos como los que se encuentran en el conjunto completo de las ingenierías, por lo que resulta complejo identificar categorías específicas. Sin embargo, si se tienen en cuenta publicaciones recientes, es razonable organizar, de forma simplificada, las competencias adquiridas por los estudiantes en las categorías mostradas en la Tabla 5.

Sin embargo, no todas estas tareas pueden ser automatizadas en el mismo grado. Para valorar esta posibilidad, se usarán las categorías de la tabla como orientación a la hora de identificar la potencialidad de automatización. El grado de automatización no sólo dependerá del tipo de tarea del aprendizaje, sino también del formato de entrega, que puede determinar en gran medida las posibilidades de ajustarse a un esquema de evaluación automática. La Tabla 6 muestra un conjunto de casos de tipos de productos de aprendizaje y de formatos de entrega que son susceptibles de ser automatizados.

### 5. Perspectivas de futuro

El futuro de la educación en automática se encuentra inexorablemente ligado a la aplicación de las nuevas tecnologías que han surgido y en cómo los docentes pueden aprovecharlas en beneficio de los potenciales interesados, ya sean los clásicos estudiantes o aquellos que deben enfrentarse a un aprendizaje continuo de las nuevas tecnologías y de los conocimientos que vayan surgiendo. Sin duda alguna la utilización de cursos masivos, como los ya comentados, permitirán adquirir suficientes datos en relación con la forma en que estas tecnologías y procesos de aprendizaje se utilizan por cada uno de los estudiantes, así como del grado de avance en el conocimiento y habilidades adquiridas. Esta información será extremadamente útil y beneficiosa para tomar decisiones de forma que se potencie e incluso motive al estudiante en el proceso de su propio aprendizaje.

Durante los últimos años se han producido cambios significativos tanto en los procesos tecnológicos como en las tecnologías avanzadas de información y comunicación que han supuesto un incremento significativo en el desarrollo de los sistemas de automatización en múltiples ámbitos. A medida que se desarrolle y afiance la digitalización en todos estos ámbitos, se posibilitará la utilización de una cantidad ingente de datos que podrán ser tenidos en cuenta en muchos de los procesos en los que la automatización juega un papel fundamental, desde el control de sistemas complejos hasta la supervisión, interfaces HMI, diagnóstico remoto, desarrollo de sistemas en entornos dinámicos, etc. etc.

Los sistemas de automatización han comenzado desde hace unos años a emplearse en nuevos dominios diferentes de los tradicionales. Tan sólo un ejemplo de estos nuevos campos de actuación se puede observar en la utilización de robots inteligentes que prestan ayuda a personas con algún grado de discapacidad o de edad avanzada, y que se desenvuelven en entornos cambiantes interactuando con estas personas. Sin duda alguna la automática jugará un papel fundamental en estos nuevos campos que han surgido hace relativamente pocos años y que

aún se encuentran en su desarrollo inicial. La educación y la enseñanza de la automática en toda su extensión, deberá ser flexible y ser capaz de adaptarse de forma que le permita abordar estos sistemas cada vez más complejos en entornos cambiantes. Ya hoy en día se ha producido un cambio significativo desde el control de procesos tradicionales a aplicaciones más complejas como redes inteligentes y sistemas móviles, sistemas digitales, robótica, redes sociales, etc. La tecnología de la información y el incremento de los procesos de digitalización en general, van a resultar relevantes en las aplicaciones de la automatización futura.

Uno de los papeles más importantes de los ingenieros de control es el de “integradores de sistemas” en proyectos multidisciplinares. En este sentido, deberán ser capaces de acoger nuevas herramientas y tecnologías en continuo desarrollo, con una adaptación constante, de forma tal que provea al estudiante al menos de unas capacidades integradoras que faciliten su trabajo futuro.

En el modelo de docencia tradicional, el profesor es la fuente principal de conocimientos en la materia que imparte y su papel fundamental consiste en la transmisión de estos en el aula. Hoy en día, sin embargo, la presencia en el aula ya no es tan imprescindible. Los entornos virtuales y las herramientas ofimáticas facilitan la preparación de materiales al profesorado para apoyo de sus clases, generalmente ricos en bibliografía accesible, materiales multimedia, simulaciones, videos, contenidos complementarios que de forma abundante e ilustrativa se aportan al proceso de enseñanza-aprendizaje y de los que el estudiante puede disponer fuera desde su casa.

Esto supone que el profesorado en parte ha dejado de ser la fuente principal de contenidos y transmisión única de información en el aula, para comenzar a ser un selector de contenidos, adquiriendo cada vez más un papel de orientador que proporciona materiales de apoyo en muchos casos confeccionados por otros docentes. Se trata, por tanto, de conducir el aprendizaje del estudiante mediante la orientación colectiva e individual para que pueda aprender por sí mismo más y mejor y pueda adquirir las competencias de la materia que se imparte. Probablemente una realidad ya existente en muchos docentes hoy día se traduzca en el futuro en un nuevo modelo generalizado de docencia, en el que ser especialista y disponer del conocimiento profundo de una materia no se emplee tanto en la transmisión e impartición de contenidos, como en la selección de materiales y medios propios o ajenos que permitan afianzar y mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje. Esto conlleva en parte que los estudiantes adquieran un papel más activo, ya que deberán conducir su propio aprendizaje en base a las pautas y medios aportados por el profesorado, adquiriendo cada vez más importancia la interacción entre profesor y estudiante de forma presencial, pero en un rol activo por parte de ambos, en el que la presencialidad estará destinada no a recibir información y contenidos, sino a resolver dudas, aclarar conceptos y evaluar la evolución del aprendizaje.

Otra de las cuestiones a considerar es una posible adaptación global en la forma de impartir la docencia. La pandemia originada como consecuencia del coronavirus (COVID-19) ha provocado, al menos durante este periodo, una modificación sustancial en el formato de la enseñanza mayoritariamente realizada hasta el momento, y del que como es lógico, la educación

Tabla 5: Competencias adquiridas por los estudiantes

Unidad de aprendizaje	Producto del aprendizaje (métrica del resultado de aprendizaje)	Ejemplos de pruebas o entregas	Categoría
Modelado de sistemas	Matemático y analítico	Desarrollo matemático escrito, modelo Simulink	C-1
Análisis de sistemas	Matemático y cuantitativo	Medidas cuantitativas ( $t^o$ de respuesta, e.r.p., MF, MG, análisis de intervalos de ganancias), medidas cualitativas (estabilidad, convergencia)	C-2
Diseño de controladores	Matemático y cuantitativo	Valores de los parámetros de ajuste de controladores, rangos de validez de ganancias y constantes, proyectos de diseño de control	C-3
Instrumentación	Conceptual	Quizzes, memorias, proyectos	C-4
Laboratorio de control	Funcional y descriptivo	Memorias, material audiovisual medidas cuantitativas, análisis cualitativo	C-5
Robótica	Modelado geométrico, matemático y analítico	Desarrollo matemático escrito, cálculos por ordenador	R-1
Planificación de trayectorias	Matemático cuantitativo, algorítmico	Algoritmos de planificación, simulaciones	R-4
Modelado dinámico y simulación	Matemático cuantitativo y informático	Modelos matemáticos, trabajos de simulación	R-2
Diseño de control articular	Matemático cuantitativo	Valores de los parámetros de ajuste de controladores, rangos de validez de ganancias y constantes, proyectos de diseño de control	R-3
Laboratorio de robótica	Funcional y descriptivo, algorítmico	Memorias, material audiovisual medidas cuantitativas, análisis cualitativo, programa de control del robot	R-4
Visión y percepción	Algorítmico	Algoritmos de procesado de imágenes y medidas de sensores, imágenes procesadas	R-5
Instrumentación industrial	Conceptual	Gráfico (planos), selección de componentes, planos de instalaciones, proyectos y documentos	A-1
Comunicaciones Industriales	Conceptual y algorítmico	Selección de componentes, planos de instalaciones, proyectos y documentos, programas de comunicaciones	A-2
Diseño de control PLC	Matemático, gráfico, algorítmico	Redes de Petri, diagramas de contactos	A-3
Laboratorio de automatización por PLC	Algoritmo	Programa de PLC, memoria de proyecto, simulaciones del control, vídeos	A-4

Tabla 6: Tipos de productos de aprendizaje y de formatos de entrega que son susceptibles de ser automatizados

Tipo de producto de aprendizaje	Formato de la entrega y grado de automatización	Tecnología de evaluación automatizada	Tipo de tecnología de evaluación	Categorías afectadas en el área de automática
Matemático analítico	Desarrollo matemático en procesador simbólico, 100 %	Herramienta de cálculo simbólico programada	Algorítmica	C-1, R-1
Matemático cuantitativo	Valores numéricos de análisis de sistemas, 100 %	Quizzes	Preprogramada	C-2, C-3, R-2, R-3, R-4
	Constantes de un controlador, 100 %	Validación por simulación	Simulador o herramienta interactiva	C-2, C-3, R-2, R-3, R-4
Matemático gráfico	Valores numéricos de análisis, 100 %	Validación por algoritmo numérico	Algorítmica	C-2, C-3, R-2, R-3, R-4
	Diagrama de bloques de control, 50 %	Quizzes	Preprogramada	C-4
	Red de Petri diseñada con herramienta gráfica, 100 %	Algoritmos de análisis de la información gráfica	Algorítmica	A-3
Gráfico	Red de Petri dibujada a mano, 50 %	Algoritmos de visión artificial	Algorítmica	A-3
	Planos de instalación, 30 %	Algoritmos de visión artificial	Algorítmica	C-5, A-1, A-2
Conceptual	Preguntas teóricas, 100 %	Quizzes	Preprogramada	Todas las categorías
	Preguntas de dimensionamiento, 100 %	Fórmulas matemáticas tipo Moodle	Preprogramada	C-3, C-4, C-5, R-4, A-1, A-2, A-4
Funcional	Controlador PLC, 100 %	Simulador industrial con acceso a datos	Algorítmica	A-3, A-4
	Diseño de controladores, 80 %	Automatización de Simulink para verificar especificaciones y comportamientos	Preprogramada	C-1, C-2, C-3, R-2, R-3
	Programación de robots, 100 %	Validación funcional del código	Preprogramada	R-4
Descriptivo	Programas en lenguajes estructurados, 80 %	Validación funcional del código	Preprogramada	A-2, A-3
	Descripción de un sistema de fabricación flexible, 10 %	Análisis de lenguaje natural	Algorítmica	A-1, A-4

en contenidos de automática ha tenido que seguir. Esta crisis ha estimulado la utilización, quizás de forma prematura, de todas las tecnologías disponibles en este momento para poder continuar con el proceso educativo. La forma tradicional de enseñanza presencial ha tenido que cambiar en tiempo récord para poder seguir impartiendo los contenidos docentes de manera que los estudiantes no vieran paralizada de forma brusca su etapa de aprendizaje.

Las tradicionales clases magistrales de teoría impartidas en cada una de las diferentes materias, han podido llevarse a cabo en un formato en línea de forma síncrona, mediante la incorporación y utilización por parte de las instituciones educativas y de los docentes de plataformas tecnológicas hasta dicho momento poco utilizadas. En este sentido ha sido preciso llevar a cabo un aprendizaje acelerado de dichas plataformas por parte de los docentes.

Por otro lado, las clases prácticas tan características y necesarias, han tenido que llevarse a cabo modificando estas y adaptando sus contenidos al no poder acudir (al menos durante la primera etapa pandémica) al laboratorio. Algunas de estas sesiones se han podido desarrollar mediante herramientas informáticas en forma de simulación, pero otras no han tenido una adaptación inmediata. Durante esta etapa la enseñanza de la automática en la educación superior ha tenido que ir adaptándose de forma continua a las nuevas situaciones con las herramientas tecnológicas disponibles. En la mayor parte de las instituciones se ha optado por la implementación de un modelo de enseñanza 'dual', en el que a la vez que hay estudiantes que acuden de forma presencial, cumpliendo todos los requisitos exigidos, estos coexisten con compañeros que atienden las sesiones a distancia de forma telemática. En cualquier caso, en el futuro será preciso compaginar y/o modular estos cambios que han sido necesarios acometer en muy breve plazo, dado que el contacto estrecho y permanente entre el docente y el estudiante resulta primordial y necesario.

Adicionalmente, cada vez es más recomendable estar en contacto con otros profesores de disciplinas afines de otras universidades, incluso extranjeras y desarrollar la cooperación en el campo de proyectos educativos conjuntos. En algunos casos, incluso la docencia moderna implica también la impartición de clases en inglés. Todo ello supone un esfuerzo considerable al docente en la actualización de nuevos contenidos, metodologías y herramientas, sin los cuales la docencia tradicional se verá resentida.

Particularmente importante es esta actualización de contenidos en disciplinas tan cambiantes como la robótica y el control automático, que además se imparten en cursos superiores de grados o máster, en los que la actualización es necesaria con cambios que se producen en un muy corto espacio de tiempo.

En estas condiciones, el profesorado universitario se enfrenta a importantes desafíos presentes y futuros. Deben afrontarse con el ánimo de cambiar puntos de vistas en el proceso enseñanza-aprendizaje, renovar metodologías, emplear nuevas herramientas y nuevos enfoques didácticos, siendo un problema no solo profesional, también de actitud y psicológico. Todo ello se debe afrontar con mente abierta, con el fin de estar dispuesto a incorporar nuevas ideas, incluso aprendiendo de otras experiencias puestas en marcha por compañeros en disciplinas similares o afines.

## Referencias

- Akçayır, G., Akçayır, M., 2018. The flipped classroom: A review of its advantages and challenges. *Computers & Education* 126, 334–345.
- Aljaloud, A., Gromik, N., Billingsley, W., Kwan, P., 01 2015. Research trends in student response systems: A literature review. *International Journal of Learning Technology* 10, 313.
- Antsaklis, P., Basar, T., DeCarlo, R., McClamroch, N., Spong, M., Yurkovich, S., 1998. NSF/CSS workshop on new directions in control engineering education. National Science Foundation and IEEE Control Systems Society, Tech. rep.
- Aracil, J., 2010. Fundamentos, método e historia de la Ingeniería: una mirada al mundo de los Ingenieros. Síntesis.
- Arevalo, V., Vicente-del Rey, J., Garcia-Morales, I., Rivas-Blanco, I., 2020. Minivideos tutoriales to reinforce the learning of basic concepts for an automatic control course. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 17 (2), 107–115.
- Åström, K. J., 1999. Automatic control—the hidden technology. In: *Advances in Control*. Springer, pp. 1–28.
- Åström, K. J., Kumar, P. R., 2014. Control: A perspective. *Automatica* 50 (1), 3–43.
- Becerra-Alonso, D., Lopez-Cobo, I., Gómez-Rey, P., Fernández-Navarro, F., Barbera, E., 2020. Eduzinc: A tool for the creation and assessment of student learning activities in complex open, online, and flexible learning environments. *Distance Education* 41 (1), 86–105.
- Bers, M. U., Portsmore, M., 2005. Teaching partnerships: Early childhood and engineering students teaching math and science through robotics. *Journal of Science Education and Technology* 14 (1), 59–73.
- Bristol, E., 1986. An industrial point of view on control teaching and theory. *IEEE Control Systems Magazine* 6 (1), 24–27.
- Candelas, F., Torres, F., Ortiz, F., Gil, P., Pomares, J., Puente, S., 2003. Teaching and learning robotics with internet teleoperation. In: *Proc. Second International Conference on Multimedia and Information & Communication Technologies in Education*. Vol. 3, pp. 1827–1831.
- Chandrasekaran, S., Stojcevski, A., Littlefair, G., Joordens, M., 2013. Project-oriented design-based learning: aligning students' views with industry needs. *International Journal of Engineering Education* 29 (5), 1109–1118.
- Chen, J., Kolmos, A., Du, X., 2021. Forms of implementation and challenges of PBL in engineering education: a review of literature. *European Journal of Engineering Education* 46 (1), 90–115.
- Chung, C. C., Cartwright, C., Cole, M., 2014. Assessing the impact of an autonomous robotics competition for STEM education. *Journal of STEM Education: Innovations and Research* 15 (2).
- del Pozo, A., Escaño, J., Muñoz de la Peña, D., Gómez-Estern, F., 2013. 3D simulator of industrial systems for control education with automated assessment. *IFAC Proceedings Volumes* 46 (17), 321–326.
- Dormido, S., 2004. Control learning: Present and future. *Annual Reviews in control* 28 (1), 115–136.
- Díaz, J. M., Costa-Castelló, R., Dormido, S., 2021. Un enfoque interactivo para el análisis y diseño de sistemas de control utilizando el método del lugar de las raíces. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 18 (2), 172–188.
- Farias, G., Muñoz de la Peña, D., Gómez-Estern, F., De la Torre, L., Sánchez, C., Dormido, S., 2016. Adding automatic evaluation to interactive virtual labs. *Interactive Learning Environments* 24 (7), 1456–1476.
- Faure, E., Herrera, F., Kaddoura, A., Lopes, H., Petrovski, A. V., Rahnama, M., Ward, F., 1972. Learning to be: The world of education today and tomorrow. Unesco.
- Foulis, C. Y., Papadopoulou, S., 2018. A portable low-cost arduino-based laboratory kit for control education. In: *2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL)*. IEEE, pp. 435–435.
- Frank, M., Lavy, I., Elata, D., 2003. Implementing the project-based learning approach in an academic engineering course. *International Journal of Technology and Design Education* 13 (3), 273–288.
- Froyd, J. E., Wankat, P. C., Smith, K. A., 2012. Five major shifts in 100 years of engineering education. *Proceedings of the IEEE 100 (Special Centennial Issue)*, 1344–1360.
- Göl, Ö., Nafalski, A., 2007. Collaborative learning in engineering education. *Global J. of Engng. Educ* 11 (2).
- Harrington, C., Zakrajsek, T. D., 2017. Dynamic lecturing: Research-based strategies to enhance lecture effectiveness. Stylus Publishing, LLC.
- Hartikainen, S., Rintala, H., Pylväs, L., Nokelainen, P., 2019. The concept of active learning and the measurement of learning outcomes: A review of research in engineering higher education. *Education Sciences* 9 (4).

- Heradio, R., de la Torre, L., Dormido, S., 2016a. Virtual and remote labs in control education: A survey. *Annual Reviews in Control* 42, 1–10.
- Heradio, R., De La Torre, L., Galan, D., Cabrerizo, F. J., Herrera-Viedma, E., Dormido, S., 2016b. Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis. *Computers & Education* 98, 14–38.
- Huang, R., Ritzhaupt, A. D., Sommer, M., Zhu, J., Stephen, A., Valle, N., Hampton, J., Li, J., 2020. The impact of gamification in educational settings on student learning outcomes: A meta-analysis. *Educational Technology Research and Development* 68 (4), 1875–1901.
- Keady, G., Fitz-Gerald, G., Gamble, G., Sangwin, C., 2012. Computer-aided assessment in mathematical sciences. In: *Proceedings of The Australian Conference on Science and Mathematics Education*.
- Kolberg, E., Orlev, N., 2001. Robotics learning as a tool for integrating science technology curriculum in K-12 schools. In: *31st Annual Frontiers in Education Conference. Impact on Engineering and Science Education. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37193). Vol. 1. IEEE*, pp. T2E–12.
- Lamnabhi-Lagarigue, F., Annaswamy, A., Engell, S., Isaksson, A., Khargonekar, P., Murray, R. M., Nijmeijer, H., Samad, T., Tilbury, D., Van den Hof, P., 2017. Systems & control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges. *Annual Reviews in Control* 43, 1–64.
- Lehmann, M., Christensen, P., Du, X., Thrane, M., 2008. Problem-oriented and project-based learning (POPBL) as an innovative learning strategy for sustainable development in engineering education. *European Journal of Engineering Education* 33 (3), 283–295.
- Lerma, E., Costa-Castelló, R., Griñó, R., Sanchis, C., 2021. Herramientas para la docencia de control digital en grados de ingeniería. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 18 (2), 189–199.
- Membrillo-Hernández, J., de Jesús Ramírez-Cadena, M., Ramírez-Medrano, A., García-Castelán, R. M., García-García, R., 2021. Implementation of the challenge-based learning approach in academic engineering programs. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 15 (2), 287–298.
- Muñoz de la Peña, D., Gómez-Estern, F., Dormido, S., 2012. A new internet tool for automatic evaluation in control systems and programming. *Computers & Education* 59 (2), 535–550.
- Murray, R. M., Astrom, K. J., Boyd, S. P., Brockett, R. W., Stein, G., 2003. Future directions in control in an information-rich world. *IEEE Control Systems Magazine* 23 (2), 20–33.
- Rajkumar, K., Srinivas, D., Anuradha, P., RajeshwarRao, A., 2021. Problem-oriented and project-based learning (POPPL) as an innovative learning strategy for sustainable development in engineering education. *Materials Today: Proceedings*.
- Reguera, P., García, D., Domínguez, M., Prada, M., Alonso, S., 2015. A low-cost open source hardware in control education. case study: Arduino-feedback ms-150. *IFAC-PapersOnLine* 48 (29), 117–122.
- Robinson, M., 2005. Robotics-driven activities: Can they improve middle school science learning? *Bulletin of Science, Technology & Society* 25 (1), 73–84.
- Rossiter, A., Serbezov, A., Visioli, A., Žáková, K., Huba, M., 2020. A survey of international views on a first course in systems and control for engineering undergraduates. *IFAC Journal of Systems and Control* 13, 100092.
- Rossiter, J., 2019. Evaluation of software tools for formative assessment of control topics. *IFAC-PapersOnLine* 52 (9), 292–297.
- 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.
- Samad, T., Annaswamy, A. M., 2013. *The Impact of Control Technology*, 2nd edition. IEEE Control Systems Society.
- Sánchez, C., Muñoz de la Peña, D., Gómez-Estern, F., 2020. Automated generation of control design benchmark problems for computer-assessed education with doctus. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 17 (1), 1–9.
- Sánchez, J., Dormido, S., Esquembre, F., 2005. The learning of control concepts using interactive tools. *Computer Applications in Engineering Education* 13 (1), 84–98.
- Soriano, A., Marin, L., Valles, M., Valera, A., Albertos, P., 2014. Low cost platform for automatic control education based on open hardware. *IFAC Proceedings Volumes* 47 (3), 9044–9050.
- Stein, G., 2003. Respect the unstable. *IEEE Control systems magazine* 23 (4), 12–25.
- Wagner, S. P., 1998. Robotics and children: Science achievement and problem solving. *Journal of Computing in Childhood Education* 9 (2), 149–92.
- Ziegler, J. G., Nichols, N. B., et al., 1942. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME* 64 (11).