

# LABORATORIO DE MANUTENCIÓN E INFORMÁTICA INDUSTRIAL RICARDO MARÍN DE LA UNIVERSIDAD DE VIGO: 25 AÑOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

Julio Garrido Campos

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. E.I. Industriales, Campus Lagoas Marcosende, 36200, Universidad de Vigo, jgarri@uvigo.es

Juan Sáez López, José Ignacio Armesto Quiroga, Angel Manuel Espada Seoane, David Santos Esterán  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. E.E. Industrial, Campus Lagoas Marcosende, 36200, Universidad de Vigo, juansaez@uvigo.es, armesto@uvigo.es, aespada@uvigo.es, dsesteran@gmail.com

## Resumen

*El año 2019 se cumple un cuarto de siglo desde que el laboratorio Ricardo Marín del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Vigo comenzara a dar sus primeros pasos hacia su configuración actual en la era de la industria 4.0, la mecatrónica y la robótica. Este laboratorio tiene la particularidad de contar con un número significativo de plantas prototipo realizadas con parámetros industriales, tanto en cuanto a su configuración de hardware mecánico y automático, como a su software de automatización. Los sistemas y prototipos de dicho laboratorio han ido evolucionando paralelamente a cómo lo han ido haciendo algunas de las tecnologías y soluciones equivalentes del entorno industrial, como la integración y digitalización, la adopción de enfoques mecatrónicos para problemas de control de ejes empleando servosistemas industriales, la seguridad industrial, etc. Un repaso por los sistemas del Laboratorio Ricardo Marín y su evolución histórica permiten reproducir, las evoluciones que se han experimentado en los sistemas industriales. Este artículo hace este recorrido resaltando los hitos tecnológicos que lo han caracterizado.*

**Palabras clave:** Automatización; Digitalización; Control de Ejes.

## 1 INTRODUCCION

En los últimos 25 años hemos asistido a un cambio significativo en las tecnologías y métodos que tienen que ver con la automatización industrial. Desde cambios transversales como la progresiva introducción de la interconectividad y digitalización que están desembocando en los entornos de “industria 4.0”, a avances tecnológicos más puntuales como por ejemplo la progresiva irrupción de los conceptos mecatrónicos a la hora de abordar la automatización de maquinaria con control de ejes.

Desde que en el año 2014, el gobierno alemán acuñó el término “Industry 4.0” al amparo de su proyecto “Industrie 4.0” [6], (uno de los proyectos dentro de “German High Tech Strategy 2020 Action Plan”), éste se ha ido extendiendo y popularizado, y ha trascendido hacia otros organismos europeos, nacionales, regionales. La Comisión Europea define Industry 4.0 como la organización de procesos de producción basados en tecnología y dispositivos que se comunican de forma autónoma a lo largo de la cadena de valor [2][4]. El concepto tiene en cuenta el aumento en la digitalización de las industrias manufactureras en las que los objetos físicos están perfectamente integrados en la red de información, permitiendo una producción descentralizada y en tiempo real [3].

Además de las tecnologías comúnmente englobadas dentro del paradigma “Industria 4.0” [5], podría resaltarse la apuesta actual por el empleo masivo de los servosistemas (y las soluciones software estándar para su implementación [8][11]), los nuevos paradigmas para sistemas de seguridad de máquina electrónicos y programables, entre otros.

Es un hecho que el empleo de servomotores ha aumentado exponencialmente. A ello puede haber contribuido la reducción del coste de la pareja servo amplificador-amplificador, pero lo que sin duda ha catalizado su uso masivo puede ser, por un lado, la aparición de buses de campo mixtos de altas prestaciones como Profinet y EtherCat: por un lado síncronos (y por lo tanto con capacidad para la comunicación entre servoamplificadores y controladores numéricos) y al mismo tiempo de propósito general, es decir, que admiten periferia estándar. Y sobre todo, el hecho de que se ha reducido enormemente la complejidad a la hora de la realización del software de control de ejes debido a la aparición y adopción masiva y sin cortapisas, por todos los fabricantes, del standard para programación PLCOpen Motion Control [10]. Funcionalidades básicas como el control de velocidad, posición y par,

funcionalidades para sincronismos electrónicos entre ejes como el engranaje electrónico, las levas electrónicas, los ejes virtuales y ejes de encoder, los grupos de ejes y transformaciones de coordenadas etc., son empleadas en el control de máquinas que impliquen movimientos, y más fácilmente realizables que en el pasado gracias a estándares como PLCOpen Motion Control.

La docencia no ha sido ajena a la irrupción de estos nuevos retos. La “industria 4.0” se ha instalado en planes de estudios, asignaturas, laboratorios. También el uso de nuevas tecnologías de control de ejes basadas en servosistemas industriales se está abriendo camino en los planes de estudio a pesar de que el equipamiento, aunque cada vez más asequible, sigue teniendo un coste elevado. Seguridad electrónica, robótica colaborativa, visión artificial, etc., se pueden considerar tecnologías de uso común en la industria y que necesariamente han de formar parte de la docencia en automatización industrial.

El Laboratorio Ricardo Marín tampoco ha sido ajeno a estas evoluciones y avances tecnológicos y ha ido, en la medida de lo posible, adaptando su equipamiento y automatizaciones en paralelo con algunos avances significativos presentes en el entorno industrial: digitalización, servosistemas, seguridad electrónica, etc.

El laboratorio tiene la particularidad de que dispone de un conjunto de instalaciones que se pueden considerar industriales (tanto constructiva como funcionalmente), ya que muchas de ellas reproducen, de forma bastante fiel, a sus equivalentes industriales. Algunas de estas instalaciones se han realizado como prototipo previo a sistemas equivalentes que posteriormente fueron implementados en la industria en el marco de la realización de proyectos de I+D+i de colaboración Universidad-Empresa. Entre ellos podían encontrarse el almacén aéreo y el transportador Power&Free que se describen más adelante. Otros han sido realizados con posterioridad a la realización de proyectos equivalentes en la industria, pero reproduciendo total o parcialmente la metodología empleada en los primeros. Entre ellos cabría destacar el almacén transelevador, y los sistemas mecatrónicos de robot delta y plotter paralelo. El resto, transportador de doble cinta, impresora 3D industrial, sistema de manipulación y posicionado de piezas heterogéneas, sistema transportador de altas prestaciones, etc., aunque con características industriales, se ajustan más al concepto de prototipos de laboratorio.

Desde el punto de vista de la funcionalidad los prototipos se pueden dividir en dos grupos: sistemas que implementan movimientos para desplazar piezas destinados a realizar trabajos de manutención

industrial (transporte y almacenamiento de piezas), y prototipos que implementan movimientos precisos destinados a operaciones de fabricación, mecanizado y manipulación (sistemas robóticos y mecatrónicos de control de ejes). Ambos se presentan a continuación y se describe su evolución en paralelo a la evolución equivalente del entorno industrial.

## 2 PROTOTIPO DE PLANTA INDUSTRIAL MEDIANTE SISTEMAS DE MANUTENCIÓN INDUSTRIAL

El laboratorio Ricardo Marín dispone de una serie de sistemas de manutención industrial que, en su conjunto, hacen que el laboratorio se pueda ver como un “prototipo de planta industrial de fabricación/ensamblaje”. El prototipo reproduce la secuencia típica de movimiento, almacenaje y etapas o procesos por los que típicamente pasan las piezas y productos: recepción, almacenaje y distribución interna de materia prima, ensamblajes intermedios, almacenaje de productos terminados (Figura 1). Los diferentes sistemas tienen el objetivo de mover piezas desde un punto de entrada (recepción de la materia prima) a un punto de salida (expedición de productos terminados), pasando por diferentes sistemas intermedios de almacenaje, ensamblaje y transporte.

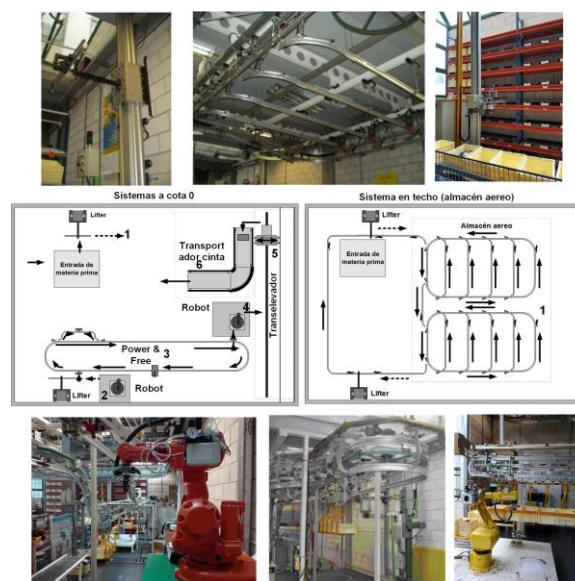


Figura 1: Prototipo de Planta Industrial. Centro (de izquierda a derecha): lay-out a nivel del suelo, lay-out a nivel del techo. Arriba (de izquierda a derecha): elevador, almacén aéreo, almacén transelevador. Abajo (de izquierda a derecha): Robot, transportador Power&Free, Robot.

Los más relevantes de estos sistemas se describen a continuación.

## 2.1 ALMACEN AEREO AUTOMÁTICO

Este sistema permite el almacenamiento automático de productos que cuelgan de carros móviles. Estos carros son desplazados a lo largo de barras mono-raíl aéreas, y llevados a diferentes destinos gracias a desvíos, estaciones de parada, ascensores, etc. El almacenaje propiamente dicho se realiza en barras (raíles) de acumulación. Su funcionalidad dentro del sistema prototipo de planta industrial es la de servir de almacenamiento de materia prima proveniente del exterior y que será servida “justo a tiempo” a la línea de ensamblaje.

Este sistema fue el primero en instalarse en el laboratorio en 1994 como prototipo de prueba para una implantación gemela en la industria. Desde su comienzo, las restricciones funcionales eran elevadas. Se requería la gestión de un elevado número de referencias de los productos a transportar y almacenar, y que por falta de espacio implicaba la adopción de una política caótica de almacenamiento. Se optó por control basado en PC industrial, con un modelado del sistema orientado a objetos que permitiese la generación automática del cuerpo principal del proyecto software de automatización mediante una herramienta de ingeniería de software previamente desarrollada. El acceso a los elementos de campo ha ido evolucionando a lo largo de los años, desde la periferia centralizada en la primera implementación, hasta el empleo de un Bus de campo Profibus. En cuanto a la supervisión, registro de datos más relevantes del proceso y su comunicación y almacenamiento, el sistema ha ido pasando de las primeras conexiones propietarias PC-controlador a las actuales mediante OPC-UA (Open Platform Communications Unified Architecture) [1]. La implementación de funcionalidades avanzadas de supervisión, mantenimiento, “machine learning”, etc., han ido igualmente evolucionado desde la explotación de los datos mediante evaluaciones desacopladas del sistema físico, a su realización con un “gemelo digital” del sistema [9] integrando las aplicaciones de control con una herramienta de simulación [7].

## 2.2 SISTEMA TRANSPORTADOR AUTOMÁTICO POWER&FREE

A continuación en el prototipo de planta, se encuentra un transportador Power&Free. Estos sistemas son un tipo de transportador automático ampliamente utilizados en la industria, y muy particularmente en el sector del automóvil. En el prototipo de planta industrial, este sistema representa la línea de ensamblaje con una secuencia de “puntos de trabajo” en donde se realizan diferentes operaciones. A pesar que desde el punto de vista de la automatización de movimientos, es un sistema

muy simple, se trata de una excelente plataforma de pruebas para la implantación de servicios avanzados: asistencia al mantenimiento, trazabilidad de fabricación y movimientos logísticos, etc.

## 2.3 TRANSELEVADOR

En este sistema los productos son almacenados en cajas contenedoras y éstas en estanterías. Las cajas son transportadas de forma automática por medio de un manipulador cartesiano (x-z) al que se le monta unas horquillas retractiles en la tercera dimensión (y) para depositar y recoger las cajas de las estanterías. El sistema conoce las coordenadas xz de cada posición habilitada en las estanterías y, una vez allí posicionado, es capaz de poner y recoger las cajas a través de una secuencia de movimientos. La automatización de este sistema ha ido evolucionando desde una primera versión en la que el control de posición de los ejes era realizado en el programa de usuario en su totalidad, hasta la situación actual en la que este posicionado es realizado por tareas de Control Numérico implementadas por defecto en el Controlador, y que son gestionadas desde el programa de usuario por bloques de PLCOpen MC.



Figura 2: Detalle de sistema: Fondo, almacén transelevador; Techo, almacén aéreo; Dcha., transportador Power&Free; Centro, cinta transportadora dos niveles.

En todos los sistemas del prototipo de planta industrial, los controladores son accesibles a través de Ethernet, y la forma de acceso ha ido evolucionando paralelamente a como lo hacían los servicios de acceso a datos industriales y su almacenamiento.

- Comunicaciones dedicadas y hechas a medida: a través de conexiones shocket PC-PLC o de drivers proporcionados por el fabricante del controlador, y posterior almacenamiento en Base de datos en la capa PC.

- Acceso a variables de proceso gracias a implantación de WebServers en el lado del PLC.
- En la actualidad, acceso a variables de proceso mediante OPC-UA. Publicación del acceso a variables mediante funcionalidades IoT implementadas en el controlador.

### 3 SISTEMAS DE CONTROL DE EJES

El enfoque mecatrónico para la automatización de maquinarias está cambiando desde la aproximación clásica en la que predominan los elementos mecánicos (Fig. 3 a) hacia una solución mecatrónica (Fig. 3 b).

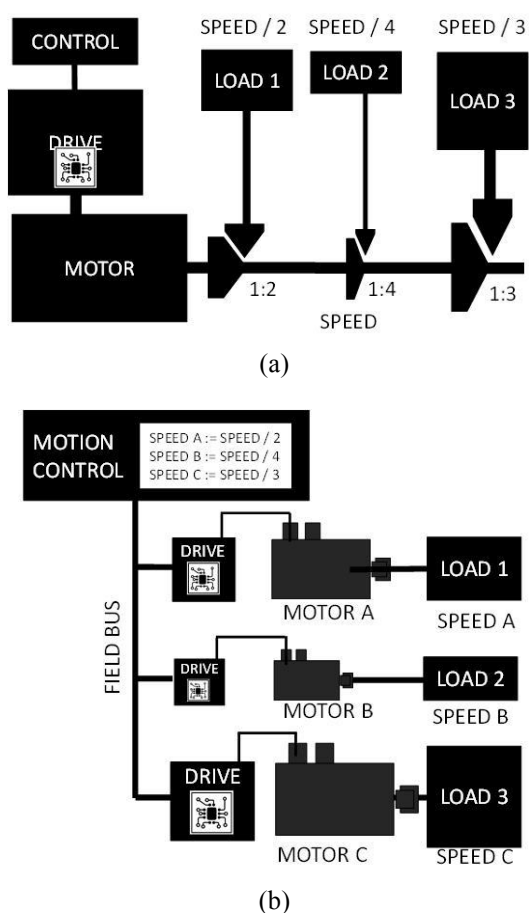


Figura 3: (a) Enfoque clásico vs (b) enfoque mecatrónico a la automatización de maquinaria con control de ejes.

En la aproximación clásica se parte de un eje principal maestro, al que se le van añadiendo los diferentes elementos de acoplamiento y transmisión mecánicos: reductoras, acoplamientos, levas y engranajes, etc. Este eje maestro hace mover mecánicamente los ejes esclavos acoplados. La aproximación mecatrónica reemplaza estas funcionalidades de transmisión y acoplamiento por el

empleo de más motores, desacoplados físicamente del maestro, pero controlados y dependientes del primero mediante software. Esto proporciona la base para hacer que las máquinas sean más eficientes y, al mismo tiempo, más flexibles [10].

Así pues, un puesto de docencia práctica de automatización de maquinaria moderna con control de ejes, como los disponibles en el laboratorio Ricardo Marín, ha de contar con un controlador (PLC o PC industrial o embebido con capacidades de control numérico, comúnmente llamado PAC), servoamplificadores y motores síncronos. En la imagen se ve uno de los 8 puestos Beckhoff del laboratorio (Fig. 4 a), uno de los 8 puestos Schneider (Fig. 4 b izquierda), y uno de los puestos Omron (Fig. 4 b derecha).

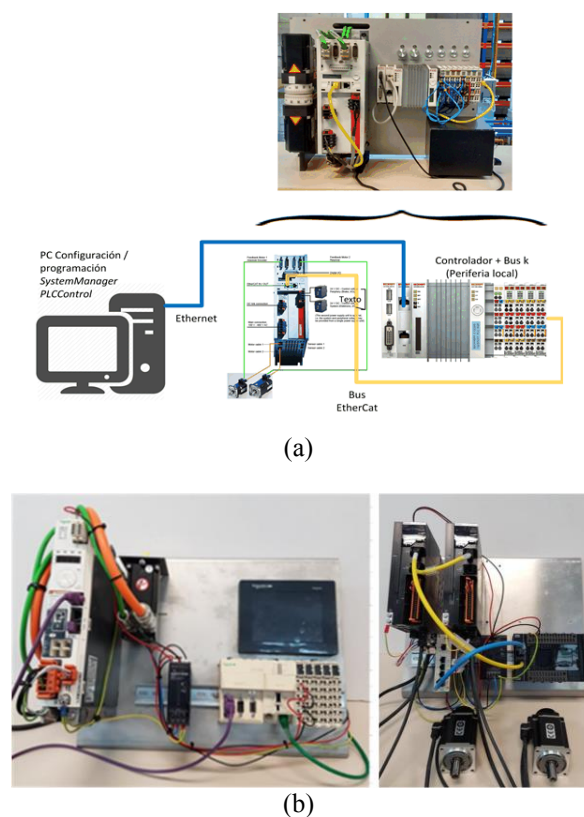


Figura 4: (a) puesto Beckhoff de control de ejes. (b) Izquierda, puesto didáctico Schneider de control de eje. Derecha, puestos Omron de control de ejes.

La docencia en control de ejes no ilustraría del todo la funcionalidad industrial si estos movimientos no se aplicaran a la realización de trabajos concretos. El laboratorio dispone de una serie de plantas, en configuración industrial, diseñadas y totalmente programadas en el marco de proyectos de I+D+i, de proyectos de fin de carrera, trabajos fin de grado y de proyectos de investigación, que son utilizadas como plataforma para realización de todo tipo de trabajos docentes. Se podrían resaltar las siguientes:



- Robot Delta. Diseño y automatización. Fig. 5. Izda.
- Impresora 3D realizada con tecnología de máquina herramienta industrial. Primer premio de concurso SoMachine promovido en 2014 por Schneider Electric para Universidades, Fig. 5 Dcha.
- Sistema de manipulación y posicionamiento de piezas síncrono: Primer premio de concurso CEA-Omron 2015 de iniciación a la investigación para universidades. Figura 6, Dcha.
- Sistema plotter 2D vertical: Tecnología Omron, con aplicación demostrativa final de Reloj mecatrónico. Figura 6, Izquierda.



Figura 5: Robot Delta, Máquina impresora 3D.



Figura 6: Izquierda, máquina XY vertical (reloj mecatrónico). Derecha, manipulador síncrono.

Finalmente, y como un sistema que a la vez es un sistema logístico pero con características funcionales de una máquina de precisión, se dispone de un transportador de altas prestaciones alta flexibilidad. Las exigencias de los sistemas de fabricación son cada vez mayores. Mayores velocidades, máxima flexibilidad, uso masivo de robots. El sistema (Figura 7) utiliza un el hardware es industrial (Sistema XTS Beckhoff) que ha sido empleado para diseñar y programar una planta prototipo de transferencia de piezas entra dos zonas robotizadas.



Figura 7: Sistema transportador de altas prestaciones

#### 4 INCIDENCIA EN LA DOCENCIA

En cuanto al empleo en la docencia de los distintos equipos presentados, se distingue entre aquellos de los que se dispone de un elevado número de puestos docentes (puestos de prácticas del apartado 3), y las instalaciones singulares. Tanto unos como otros tienen dos ámbitos principales de aplicación: en contenidos de automatización de sistemas industriales basados en estándares y normativa, y en materias de control de ejes.

Para lo primero, se emplean los puestos para abordar la sintaxis y estructuración de proyectos de automatización según el estándar IEC 61131, pero sobre todo en el traslado de la Directiva 2006/42/CE de diseño de máquinas a la implementación de automatizaciones. Se aborda el diseño del subsistema de seguridad de máquinas para su marcaje CE, y la integración de éste con la parte operativa. Además, se aborda el diseño de ésta última según dicha directiva y normas internacionales asociadas (Asignaturas de Automatización Industrial de 4º grado de Automática de Automatización de Maquinaria del Master Mecatrónica, entre otras).

En cuanto al empleo de estos puestos en docencia relacionada con el control de ejes, se comienza con los procesos de parametrización de estos sistemas, seguido del desarrollo de aplicaciones haciendo uso del estándar PLCOpen MotionControl. De menor a mayor complejidad, se abordan sistemas de control punto a punto, sistemas coordinados (engranajes electrónicos, levas electrónicas). Temas más avanzados como sistemas de grupos de ejes interpolados se abordan en asignaturas específicas de control de ejes en el ámbito del Master de Mecatrónica.

En cuanto a las instalaciones singulares, se emplean principalmente en la realización de Trabajos fin de Master y Grado, aunque en ocasiones se escoge una

de ellas como base de trabajo de prácticas en asignaturas de grado y master. Con las instalaciones logísticas (Power&Free, almacén aéreo, etc.), se aborda su automatización según normativa, y la inclusión de funcionalidades avanzadas como recopilación de datos de proceso para trazabilidad, mantenimiento, producción, etc. Con las instalaciones de control de ejes: Robot delta, sistema XTS, etc., se aborda su automatización integral, y el desarrollo de diferentes funcionalidades. Todas las instalaciones singulares sirven además de plataformas demostrativas en funcionamiento para apoyar a asignaturas regladas.

## 5 CONCLUSIONES

La mayoría de tecnologías que se consideran clave dentro de la “Industria 4.0” tienen un largo recorrido previo. Tanto la “digitalización” de los procesos industriales, la recogida masiva de datos, su transmisión y almacenamiento incluso en repositorios remotos, su análisis estadístico posterior, como el acceso a través Internet hasta el shop floor, ya se realizaba desde mucho antes de la irrupción de las políticas de “industria 4.0”. Una de las principales diferencias ha sido en que con la digitalización, con la industria 4.0, todos estos nuevos servicios y funcionalidades digitales pueden venir ahora implementados por defecto en los nuevos dispositivos o sistemas, y su puesta en servicio pasa a ser un problema de configuración al arrancar el sistema, no de implementación. La industria 4.0 ha supuesto además un reconocimiento inequívoco de las ventajas que su implantación suponen para la industria.

Es un hecho también el uso exponencial de servosistemas, pasando de ser una tecnología utilizada solamente en maquinaria de precisión como los robots y las máquinas herramienta, a ser un recurso en todo tipo de maquinaria. Este se hace patente en el cambio de la percepción de lo que comúnmente se considera hoy como una máquina automática compleja. Si hasta principios de este siglo la pregunta que daba una idea de esa complejidad era ¿cuántas entradas/salidas tiene la máquina?, en la actualidad esta pregunta empieza a ser ¿cuántos ejes tiene la máquina?.

Continuando con la línea marcada por el profesor Ricardo Marín Martín, inspirador del laboratorio al que le da nombre, la aspiración del laboratorio es la de proporcionar al alumnado un laboratorio donde experimentar y practicar con las tecnologías y metodologías lo más actualizadas posibles comparativamente con las que se pueden encontrar en el mismo momento en los desarrollos industriales. Así, desde el primer momento se apostó por

tecnologías de control basadas en arquitectura con controladores de altas prestaciones (PLC's, IPC) en incorporación de software proveniente del mundo PC al entorno de automatización (software orientado a objetos en PLC, lenguajes de alto nivel para PLC [8]), en aplicación masiva de tecnologías de Control de ejes (Motion Control según PLCOpen [11]), etc. También ha sido una constante el que los puestos didácticos y las plantas presentes en el laboratorio, fueran un ejemplo de aplicación de regulaciones y normativas, tanto a la hora de implementar los sistemas hardware como el software. Un ejemplo de ello es la apuesta por la dotación a todos estos sistemas de dispositivos de seguridad electrónica (relés de seguridad, Controladores de Seguridad), y el hecho de darle una importancia relevante a la realización de proyectos software conformes a normativa vigente (Directiva de Máquinas 2006/42/CE).

Todo ello hace que el laboratorio se haya convertido en un polo de atracción a la hora de orientar a futuros alumnos (bien previa entrada en la universidad o como medio de guiar a la futura elección de especialidades e intensificaciones). A la hora de la docencia, se trata de un laboratorio profusamente utilizado en asignaturas de cuarto de grado de Automática, y diversas asignaturas de master que tienen que ver con “Automatización de maquinaria”, “Control de ejes”, “Seguridad”, etc.

### English summary

#### RICARDO MARIN LABORATORY OF LOGISTICS AND INDUSTRIAL INFORMATICS OF VIGO UNIVERSITY: 25 YEARS OF INDUSTRIAL AUTOMATION TITLE OF THE PAPER IN ENGLISH

### Abstract

*Twenty five years ago, Ricardo Marín laboratory of the Department of Automation and Systems Engineering of University of Vigo began to take its first steps towards its current configuration in the era of industry 4.0, mechatronics and robotics. This laboratory has the particularity of having several prototype machines made with industrial parameters, both in terms of their mechanical and automation hardware configuration, as well as their automation software. The systems and prototypes of this laboratory have evolved in parallel to their equivalent technologies and solutions in the industrial environment, in aspects such as integration and digitalization, the adoption of mechatronic approaches for motion control problems using*

*industrial servosystems, industrial safety, etc. A review of the systems in Ricardo Marín Laboratory and their historical evolution reproduces the evolutions experimented by industrial systems. This article makes this journey highlighting the technological milestones.*

**Keywords:** Automation; Digitalization; Motion Control.

## Referencias

- [1] Cavalieri. S, Chiacchio. F. (2013). Analysis of OPC UA performances, *Computer Standards & Interfaces*, 36.1, 165-177.
- [2] Comisión Europea Empresa Industria. (2010) Guía para la aplicación de la Directiva 2006/42/CE relativa a las máquinas.
- [3] Davies. R. (2015). Industry 4.0: Digitalisation for productivity and growth. EPRS | European Parliamentary Research Service.
- [4] European Parliament. (2016). Directorate general for internal policies. Policy department: Economic and scientific Policy. Industry 4.0, 2016 (ISBN: 978-92-823-8815-0).
- [5] European Commission Research & Innovation - Key Enabling Technologies. Fof. [https://ec.europa.eu/research/industrial\\_technologies/factories-of-the-future\\_en.html](https://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/factories-of-the-future_en.html)
- [6] Forschungsunion/acatech, (2013) Securing the future of German manufacturing industry Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, [http://www.bmbf.de/pubRD/Umsetzungsempfehlung\\_en\\_Industrie4\\_0.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/Umsetzungsempfehlung_en_Industrie4_0.pdf)
- [7] FlexSim. (2018) Orem, Utah, USA. FlexSim Software Products, Inc.
- [8] IEC, "61131-3:2013 Programmable controllers - Part 3: Programming languages".
- [9] Jazdi. N, (2014) Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics
- [10] PLC-Open, (2019) "<http://www.plcopen.org/index.html>".
- [11] PLC-Open, (2019) "[http://www.plcopen.org/pages/tc2\\_motion\\_control/presentations/](http://www.plcopen.org/pages/tc2_motion_control/presentations/)".



© 2019 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).