

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN EDUCATIONAL RACK WITH PLCs AND OTHER INDUSTRIAL COMMUNICATIONS COMPONENTS

Elvira Izurrategui, Carlos; Nájera Canal, Silvano
Universidad de La Rioja

This paper presents the design process, implementation and setting-up of an educational rack for training in PLCs and other control and industrial communication devices.

First, the analysis of the academic goals is described in order to achieve its fulfillment in the final product. Subsequently, several components to be integrated in the rack are studied doing a preliminary selection.

Next, the design of the rack and the final components selection are described. Also, the ending stage composed by the implementation and assembly of the first prototype is explained.

Furthermore several tests and checkings carried out on the first prototype to detect fails are described, from which arise decisions about proposals for improvement in all parts which composed the rack and the final product.

Finally the academic benefits achieved along the whole project development are described from the educational point of view.

Keywords: PLC (Programmable logic controller); control; automation; industrial communications

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ENTRENADOR DIDÁCTICO CON PLCs Y OTROS DISPOSITIVOS DE COMUNICACIÓN INDUSTRIAL

Este artículo presenta el proceso seguido en el diseño, construcción, y montaje de un bastidor dirigido a la docencia con autómatas programables, así como a otros elementos de control y comunicación industrial.

Inicialmente describimos una primera fase donde se realiza el análisis de un conjunto de objetivos académicos a cumplir con dicho producto final. Posteriormente estudiamos la selección inicial de los componentes que van a ser integrados en el bastidor. A continuación se describen las etapas propias de selección de materiales del bastidor y su diseño, para finalizar con las etapas de construcción y montaje de un primer prototipo. Se continúa describiendo las pruebas y verificaciones realizadas sobre el primer prototipo para detectar anomalías de funcionamiento y así decidir las posibles propuestas de mejora en todos los componentes que forman parte del bastidor y del producto final.

Para finalizar se describen los beneficios académicos alcanzados desde el punto de vista docente con el desarrollo del proyecto.

Palabras clave: PLC (Controlador lógico programable); control; automatización; comunicaciones industriales

Correspondencia: Carlos Elvira Izurrategui - carlos.elvira@unirioja.es

Agradecimientos: Los autores agradece la ayuda prestada de la Universidad de La Rioja en el proyecto de innovación docente con referencia APIDUR_2014-15-25

1. Introducción

La Universidad de La Rioja lleva desarrollando en los últimos años un plan de formación del Personal Docente e Investigador (Vicerrectorado de Profesorado, Planificación e Innovación Docente de la UR, 2016). En el curso académico 2013-14 y siguiendo las líneas estratégicas que se recomiendan según la Comisión Europea (High Level Group on the Modernisation of Higher Education, 2013), la universidad articula el plan formativo en varios ámbitos de actuación (Vicerrectorado de Profesorado, Planificación e Innovación Docente de la UR, 2013) entre los cuales se encuentra una convocatoria para la participación de personal docente en Proyectos de Innovación Docente.

En las modalidades actuales de enseñanza universitaria las metodologías se orientan a que el alumno aprenda a aprender. Este aprendizaje activo permite al alumno a construir conocimiento a partir de pautas, actividades, planteamiento de problemas, casos o escenarios diseñados por el profesor. Las prácticas de laboratorio tal y como están orientadas por muchos profesores son de tipo expositivo, siendo el docente quien dirige el trabajo de laboratorio de los estudiantes. Para ello, los estudiantes ejecutan una serie de instrucciones o tareas facilitadas en unos materiales (manuales, guiones, etc.) que proporciona el docente. En ciertas asignaturas o materias la experimentación se realiza utilizando material industrial real procedente de diferentes fabricantes y su utilización académica como material de prácticas de laboratorio es muy bajo, dado que se requiere gran cantidad de cableado para interconectarlos entre sí. Una utilización incorrecta de todos estos elementos supone un riesgo para el propio material e incluso para los propios alumnos. Además tampoco disponen los alumnos del tiempo suficiente para poder integrar y cablear todo el material en el desarrollo de las prácticas.

Particularmente en las disciplinas relacionadas con el control y la regulación de procesos se utilizan generalmente dispositivos lógicos programables, PLCs, u ordenadores industriales con elementos de comunicación industrial para conectarse con procesos industriales reales. El uso de estas herramientas permite al alumno experimentar el uso, configuración, programación de este tipo de dispositivos y poner en práctica de forma inmediata los resultados en las aplicaciones a controlar. El elevado número de alumnos no permite disponer de las suficientes plantas o procesos a conectar físicamente pero la emulación real sobre entrenadores didácticos permite al alumno observar y contrastar los resultados directamente en este tipo de materiales docentes. Por otro lado, el coste de este tipo de materiales es muy elevado y además, muchas veces está supeditado a los modelos particulares que proporciona el fabricante del material (Edylab Equipamientos Educativos, 2014). Es por ello, que el diseño de un bastidor que integre y disponga estos elementos ya interconectados permitirá a los alumnos alcanzar objetivos de aprendizaje sobre el manejo, configuración y programación e interconexión al proceso de una forma más rápida y eficaz, como se demuestra en otros trabajos de entrenadores didácticos ya desarrollados (Davis et al., 2015), o aplicados a otros ámbitos como la agricultura (Dickinson & Johnson, 2005).

Enmarcado dentro de la convocatoria de Proyectos de Innovación Docente citada, el presente artículo describe el diseño e implementación de un entrenador didáctico para PLCs con el fin de buscar una solución de diseño, construcción y montaje de un bastidor flexible adaptado a múltiples elementos de comunicación y control industrial como pueden ser autómatas programables, fuentes de alimentación, reguladores de procesos y otros elementos de comunicación industrial, y pensado para ser utilizado en actividades académicas relacionadas con la Ingeniería Industrial. Particularmente, en la Universidad de la Rioja se imparten tres titulaciones de grado dentro del ámbito industrial, susceptibles de utilización de este material; Grado en Ingeniería Mecánica, Grado en Ingeniería Eléctrica y Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.

Entre la documentación oficial de los tres títulos anteriores (Universidad de La Rioja, 2010), se encuentran las memorias de verificación de las titulaciones (Universidad de La Rioja, 2014) donde se define, entre otras, la competencia de “Conocimientos sobre los fundamentos de automatismos y métodos de control”. Además en los títulos de Grado en Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica Industrial y Automática se definen competencias específicas a cada uno de ellos.

2. Objetivos

La propia convocatoria de Proyectos de Innovación Docente en el curso 2013/2014 (Vicerrectorado de Profesorado, Planificación e Innovación Docente de la UR, 2013) planteaba dos objetivos en particular. En primer lugar, fomentar el intercambio de conocimientos y experiencias de buenas prácticas de docencia universitaria en el marco general de las Titulaciones de la Universidad de La Rioja. Por otro lado también planteaba el objetivo de estimular la experimentación en distintos escenarios de enseñanza/aprendizaje universitarios (laboratorios de prácticas), para desarrollar una educación de mayor calidad a través de estrategias docentes innovadoras.

Para lograr dichos objetivos aplicados sobre el proyecto se definieron los siguientes objetivos específicos para la realización del Proyecto de Innovación:

1. Análisis de las necesidades y requisitos docentes relacionados directamente con las prácticas de laboratorio en asignaturas de control de procesos, informática industrial y automatización industrial.
2. Análisis de soluciones comerciales disponibles en el mercado.
3. Diseño de un bastidor que cumpla los requisitos.
4. Construcción del primer prototipo.
5. Montaje del primer prototipo integrando los distintos elementos industriales seleccionados.
6. Análisis de las posibles mejoras del prototipo inicial.
7. Construcción y montaje del resto de bastidores condicionados a los recursos económicos disponibles

3. Etapas de desarrollo

El proyecto afectaba a varias materias y, por lo tanto, a varios docentes por lo que en su ejecución, se ha seguido una metodología de trabajo en grupo en la que se ha requerido analizar y seleccionar múltiples necesidades, criterios, requisitos y soluciones.

Para ello el coordinador del grupo de trabajo propuso múltiples reuniones distribuidas temporalmente donde todos plantearon sus opiniones en base a sus experiencias actuales en las prácticas de laboratorio, así como ideas que permitieron solucionar y/o mejorar carencias actuales detectadas.

3.1 Fase de definición de requisitos del prototipo

En una primera etapa se procedió a analizar los medios materiales que estaban disponibles en los laboratorios docentes. Como elemento de control se optó por integrar como elemento principal un Controlador Lógico Programable (PLC) ya que su uso desde sus orígenes en la década de los 60 del siglo pasado ha sido el elemento de referencia en la evolución de las empresas con aplicaciones de control y automatización industrial (Chevtsov et al., 2002).

Se seleccionaron los siguientes elementos tecnológicos mostrados en la figura 1 para ser integrados en el bastidor:

- PLC del fabricante Omron con referencia CP1E-EM30DR-D.
- PLC del fabricante Omron con referencia CP1H-XA40DT-D.
- Tarjeta de expansión de comunicaciones tipo RS-232C con referencia CP1W-CIF01.
- Tarjeta de expansión de comunicaciones tipo RS-422A-482 con referencia CP1W-CIF12.
- Tarjeta de expansión de entradas/salidas analógicas con referencia CP1W-MAB221.

Figura 1: PLCs y tarjetas de expansión



Dado que estos equipos pueden dar servicio a varias prácticas docentes una vez montados, integrados y cableados, se procedió a analizar los requisitos técnicos a emular en el bastidor. Se marcaron las necesidades siguientes (condicionadas por los costes económicos):

- Emulación de un mínimo de 18 entradas digitales mediante interruptor.
- Emulación de visualización de todas las salidas digitales (no implementada en el bastidor ya que están monitorizadas en los propios equipos PLC).
- Emulación de un mínimo de 4 entradas analógicas mediante potenciómetro.
- Conectividad de un mínimo de 4 entradas analógicas mediante bornas.
- Visualización de un mínimo de 4 entradas analógicas mediante display digital.
- Visualización de un mínimo de 2 salidas analógicas mediante display digital.
- Conectividad de un mínimo de 2 salidas analógicas mediante bornas.

También se estudiaron algunas soluciones comerciales disponibles (Edylab Equipamientos Educativos, 2014), (Edibon Technical Teaching Equipment, 2009). Tras el estudio de las soluciones anteriores se decidió tener en consideración para el diseño del bastidor los siguientes requisitos de conectividad:

- Interconexiones protegidas para los usuarios entre las señales (analógicas y digitales) de los equipos y el bastidor.
- Interconexiones debidamente numeradas para ser identificadas para los usuarios entre las señales (analógicas y digitales) de los equipos y el bastidor. Esto facilitará su identificación en labores de mantenimiento.
- Interconexiones protegidas para los usuarios entre las señales de potencia de los

equipos y la fuente de alimentación.

También se concretaron otros requisitos específicos de diseño que se indican a continuación:

- Uso de materiales utilizados en el mundo industrial en la medida que los costes económicos lo permitan.
- Diseño compacto con fácil accesibilidad y manipulación por parte de los usuarios (alumnos y profesores).
- Diseño que permita un rápido transporte de un lugar a otro y un anclaje o estabilidad suficiente al lugar de trabajo.
- Estética de diseño pensada en las actividades académicas a desarrollar. Esto supone un diseño de un serigrafiado descriptivo de los componentes a emular y fácil de interpretar por los usuarios.
- Diseño que permita labores de mantenimiento rápidas.

3.2 Fase de diseño del prototipo

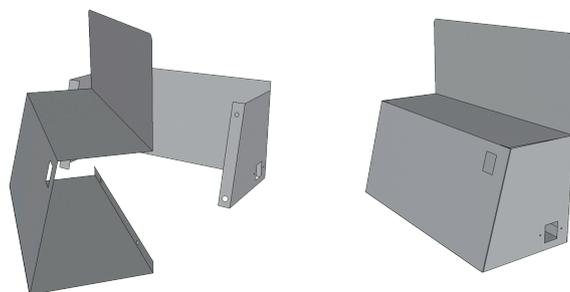
En esta fase se ha realizado el diseño de un prototipo inicial que permita integrar físicamente distintos y variados elementos industriales de control y regulación de procesos, atendiendo a las necesidades docentes y requisitos planteados en la etapa anterior.

Dentro de esta fase se han realizado tareas relacionadas con la selección de los materiales, el dimensionamiento, mecanizado, acabados mecánicos finales, etc. Para ello se han tenido en cuenta los requisitos condicionantes establecidos en la fase previa.

Para cumplir estos condicionantes se decidió que los materiales constructivos del bastidor deberían cumplir:

- Mecanizado en chapa de 1 mm de grosor.
- Proceso de mecanizado de agujeros requeridos para todos los elementos de conectividad y cableados.
- Mecanizado de las aristas de la chapa en redondo en función del tiempo y/o coste.
- A nivel de dimensiones se decidió unas dimensiones aproximadas de 30-40 cm en anchura y unos 15-20 cm de profundidad para poder disponerlos en las mesas de laboratorio. La altura se fijaría en función del diseño final.

Figura 2: Simulación 3D del plegado de chapas del bastidor



Antes del diseño final en CAD 3D que se muestra en la figura 2 se decidió que el bastidor estuviera constituido por 2 piezas independientes para un rápido montaje y desmontaje en futuras tareas de mantenimiento. Además la zona de conectividad se diseñó con un ángulo de inclinación adecuado para realizar dicha función. Por último se decidió colocar el

En esta etapa también fue necesario seleccionar alguno de estos elementos (enchufe con portafusibles) así como el método de acoplamiento de los PLCs al bastidor (carril DIN normalizado). El carril permitirá añadir futuros elementos comerciales como módulos de comunicaciones, reguladores de procesos, etc.

A la hora de proteger los autómatas se barajaron varias posibilidades pero por criterios de coste se decidió no añadir ningún elemento de protección contra sobrecargas.

En cuanto a los requisitos de energía necesarios a incorporar al bastidor para que alimente tanto al automático como a otros elementos exteriores se decidió aprovechar tres fuentes de alimentación disponibles en los laboratorios así como seleccionar otra para el resto de bastidores a construir y replicar en un futuro. Las fuentes de alimentación seleccionadas que cumplían los requisitos fueron:

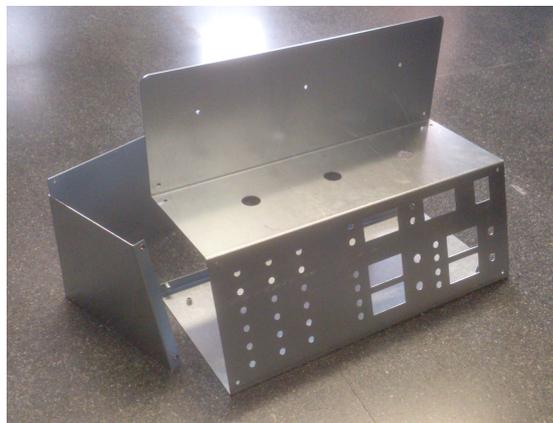
- Fuente de alimentación Omron S8VS-06024C.
- Fuente de alimentación Siemens SITOP PSU100C 24V/2.5A.

3.3 Fase de construcción, montaje y verificación del primer prototipo.

Dado que el proyecto de Innovación Docente estaba apoyado económicamente por una pequeña cantidad económica (Vicerrectorado de Profesorado Planificación e Innovación Docente de la UR, 2014), se decidió externalizar los procesos de mecanizado y acabado de las piezas del bastidor dado que no se contaban con los medios adecuados para poder ejecutarlos.

En la figura 5 se muestra el resultado final de la chapa mecanizada de material acero de 1mm de grosor con el proceso de plegado, agujereado/corte por láser y embutición exigido en el diseño.

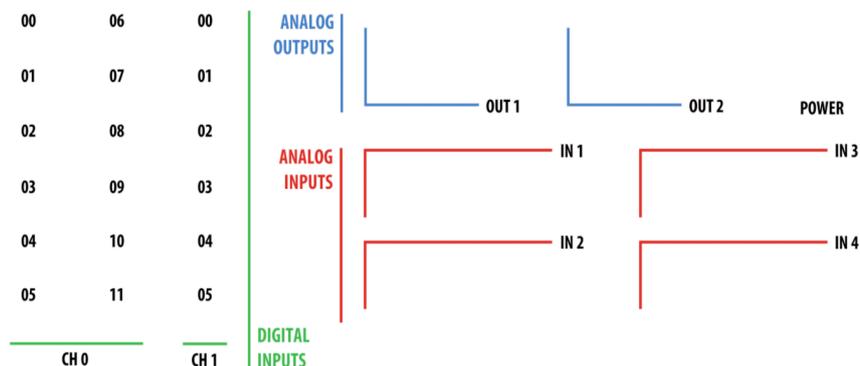
Figura 5: Piezas de chapa del bastidor finalizadas



Una vez mecanizada se observó que era necesario realizar un acabado final seleccionando un color, así como un elemento de protección final exterior. Para ello se decidió lacar el bastidor en color gris normalizado RAL 9006 para protegerlo.

Durante esta fase se procedió a solicitar la compra de los componentes a integrar en el bastidor citados anteriormente para realizar su futuro montaje. Antes de proceder al montaje de los componentes en el bastidor se hizo necesario finalizar el diseño inicial del frontal del bastidor para proceder con el serigrafiado mostrado en la figura 6.

Figura 6: Serigrafía frontal del bastidor



Una vez colocada la serigrafía impresa en una lámina vinílica transparente se procedió a instalar los siguientes componentes eléctricos/electrónicos en el bastidor:

Tabla 1: Componentes electrónicos y electrotécnicos

Componente	Número	Características
Interruptor de entrada digital	18	Tipo palanca on/off miniatura 2 posiciones bipolar doble CA 120V 5A; CA 250 2A Diámetros tornillo DPDT/6 mm
Resistencia variable	4	Tipo angula para emular entradas analógicas Comportamiento lineal/exponencial 100k ohmios Diámetro tornillo 6.35 mm
Botón de mando	4	Accesorio para potenciómetros con indicador de giro Compatible para eje de potenciómetro de 6 mm Diámetro aproximado de 20-23 mm Altura aproximada de 30 a 35 mm Material plástico
Conector tipo banana hembra	6	Conectividad de E/S analógicas en su polo positivo Color rojo. Diámetro inserción de 4 mm Material: metal con recubrimiento plástico Dimensiones aproximadas: 32 x 11.5 mm.
Conector tipo banana hembra	6	Conectividad de E/S analógicas en su polo negativo Color negro. Diámetro inserción de 4 mm Material: metal con recubrimiento plástico Dimensiones aproximadas: 32 x 11.5 mm.
Display digital	6	Monitorización de 4 entradas y 2 salidas analógicas Panel de 3 dígitos de 7 segmentos. Display color rojo Rango de medida: 0-99.0v. Alimentación en cc. Dimensiones aproximadas: 50x26x18.5mm. Material: plástico.
Interruptor digital on/off	1	Tipo rocket. Color rojo. Cuatro terminales. Medidas aproximadas: 3.2x2.8x2.5cm.
Base enchufe IEC	1	Portafusible incorporado. Características de conexión eléctrica: 10A, 250V, 2220w

Una vez instalados los componentes según la figuras 7, se procedió a realizar las interconexiones electrónicas mediante soldadura. Además se procedió a la verificación de conectividad mediante la instrumentación electrónica adecuada.

Figura 7: Bastidor con los elementos montados y conexionado interior



A continuación, se procedió al montaje del PLC y la fuente de alimentación sobre el bastidor. Para ello se utilizó carril DIN normalizado como elemento de anclaje del autómeta y la fuente de alimentación con topes laterales de retención.

Por último se realizó la interconexión y cableado entre la fuente de alimentación, autómeta y bastidor, realizando la conexión de todas las señales de control y alimentación entre los elementos del bastidor, el PLC y la fuente.

Figura 8: Cableado al PLC y numeración

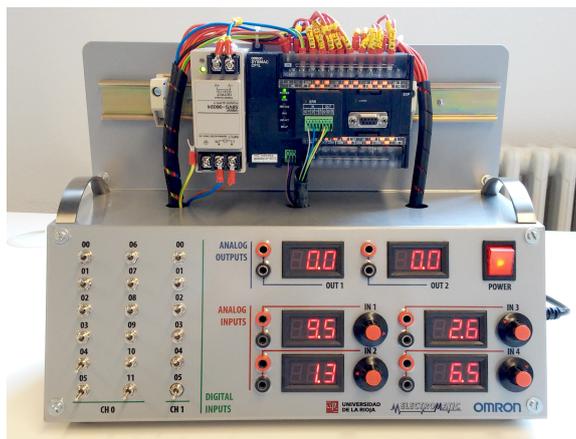


Tal como se observa en la figura 8, dicho conexionado se realizó con cable normalizado en los bloques de señal indicados anteriormente, y utilizando clavijas y terminales comerciales. Para la gran mayoría de las señales se utilizó cable flexible estándar multifilar de 0.5mm de múltiples colores mientras que para las señales analógicas se utilizó cables de par trenzado telefónico de distintos colores. También se procedió a la identificación de las señales mediante la numeración de cables. Esto permitirá en un futuro un mantenimiento más eficiente del equipo ante averías.

La verificación del funcionamiento del bastidor se ha realizado mediante la programación directa sobre el PLC de todas las señales físicas conectadas al bastidor, comprobando el rango y la naturaleza de las señales con la instrumentación adecuada:

- 18 entradas digitales en el canal 0.00 asignado.
- Todas las salidas digitales en el canal 100.00 asignado.
- Las 4 entradas analógicas en los canales A642, A643, 2980, 2981, 2990, 2991 (según sea tarjeta interna o externa y el número de slot de tarjeta) asignados en la configuración.
- Las 2 salidas analógicas en los canales 2985, 2986, 2995, 2996 (según el número de slot de tarjeta) asignados por el fabricante

Figura 9: Bastidor finalizado en funcionamiento



3.4 Mejoras del prototipo inicial.

Una vez desarrollado el primer prototipo inicial y evaluado en la realidad, se propusieron las siguientes mejoras que se muestran en la figura 9:

1. Añadir asas al bastidor para un rápido y mejor transporte manual.
2. Añadir patas para una mejor conservación del equipo y anclaje al puesto de trabajo.
3. A nivel de cableado se propuso embridar los cables y colocar pasacables que mejoran la estética y la apariencia final del bastidor

4. Resultados y conclusiones

A partir del prototipo final, y con los recursos económicos disponibles se decidió construir un número de 14 bastidores iguales según la figura 10, suficiente para poder realizar prácticas de laboratorio en varias asignaturas. Indicar que el resultado final está disponible en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de La Rioja. En concreto los 15 bastidores se encuentran ubicados y operativos en el Laboratorio de Regulación Automática II del Edificio Politécnico.

Figura 10: Conjunto de bastidores finalizados



La experiencia en el desarrollo de este entrenador didáctico ha sido positiva por los siguientes motivos:

1. Se ha logrado construir, montar y verificar un prototipo que cumple una serie de requisitos docentes relacionados con las prácticas de laboratorio de asignaturas de automatización, control e informática industrial.
2. Se ha materializado la construcción de 15 bastidores que ya forman parte del equipamiento docente de un laboratorio.
3. Los 15 equipos están permitiendo actualmente a los alumnos acercarse más a la realidad física y material que se van a encontrar en el mundo industrial propio de los títulos de ingeniería que están cursando.
4. En el presente proyecto se puede afirmar rotundamente que las ayudas económicas del proyecto han estado muy por debajo del coste de los 15 equipos si estos se compran directamente a proveedores comerciales de material docente. Esto es un valor añadido dada la coyuntura actual económica en la que nos encontramos.
5. Se ha definido un método colaborativo de trabajo en equipo de todos los miembros del equipo para lograr llevar a cabo todas las fases y etapas del proyecto.
6. Destacar que se han logrado cumplir sobradamente los objetivos marcados inicialmente, así como los resultados previstos inicialmente

En cualquier caso, es deseable que los responsables y las instituciones académicas se impliquen y fomenten este tipo de líneas de proyectos para que la mejora de la docencia tenga una consideración adecuada. Todos los que participamos de la actividad académica nos sentiremos así animados a seguir dando pequeños pasos para mejorar nuestro trabajo diario.

5. Referencias bibliográficas

- Chevtsov, P., Higgins, S., Schaffner, S. & Seidman, D. (2002, Octubre). PLC Support Software at Jefferson Lab (JLAB-ACC--02-12) *International Workshop On Personal Computers And Particle Accelerator Controls (PCaPAC 2002)*; Frascati, Italia. (pp. 14-17)
- Davis, N., Pringle, C., Holden, L. & Whelan, M. L. (2015). Development of a programmable logic controller training unit for engineering technology curriculum. En American Society for Engineering Education (Ed.) *ASAE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings: Making Value for Society* (122nd Code 113020) Washington Convention Center Seattle, United States.
- Dickinson, A. R. & Johnson, D. M. (2005, Julio). A Low-Cost Programmable Logic Control (PLC) Trainer for Use in a University Agricultural Electricity Course. *2005 ASAE Annual International Meeting. Simposio realizado en la reunión anual de "The Society for engineering in agricultural, food, and biological Systems", Tampa, FL.*
- Edibon Technical Teaching Equipment (2009). Módulo PLC-PI para el control industrial de procesos. Obtenido el 14 de abril de 2016: <http://www.edibon.com/products/catalogues/en/units/automationsystems/plcunitoperations/PLC-PI.pdf>
- Edylab Equipamientos Educativos (2014). Entrenador de autómatas PLC-1000. Obtenido el 14 de abril de 2016: <http://edylab-equipamientos.com/media/wysiwyg/descargas/PLC-1000-05.pdf>
- High Level Group on the Modernisation of Higher Education (2013). *Report to the European Commission on Improving the quality of teaching and learning in Europe's higher education institutions*. Obtenido el 14 de abril de 2016: http://ec.europa.eu/education/library/reports/modernisation_en.pdf
- Universidad de La Rioja (2010). Plan de estudios y documentos de verificación del Grado en Ingeniería Mecánica. Obtenido el 14 de abril de 2016, de Universidad de La Rioja: <http://www.unirioja.es/estudios/grados/mecanica/EEES.shtml>

Universidad de La Rioja (2014). Memoria del plan de estudios de Grado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de la Rioja. Obtenido el 14 de abril de 2016, de Universidad de La Rioja: http://www.unirioja.es/estudios/grados/memorias_UR/803G_I.pdf

Vicerrectorado de Profesorado, Planificación e Innovación Docente de la UR (2013). *Plan de formación del PDI. Programa curso 2013/14*. Obtenido el 14 de abril de 2016, de Universidad de La Rioja: http://www.unirioja.es/Formacion_pdi/anteriores/convocatoria_13_14/presentacion.shtml

Vicerrectorado de Profesorado Planificación e Innovación Docente de la UR (2014) Convocatoria de apoyo a los proyectos de innovación docente 2013/2014 de la Universidad de La Rioja. Obtenido el 14 de abril de 2016, de Universidad de La Rioja: http://www.unirioja.es/Formacion_pdi/anteriores/convocatoria_13_14/Proy_innov_docent_13_14/Apidur_021214.pdf

Vicerrectorado de Profesorado, Planificación e Innovación Docente de la UR (2016). *Plan de formación del PDI*. Obtenido el 14 de abril de 2016, de Universidad de La Rioja: http://www.unirioja.es/Formacion_pdi/