

# Control de una planta industrial utilizando sistemas de bajo coste

## Control of an industrial plant using low cost systems

*María Guadalupe Morán-Solano<sup>1\*</sup>*

*Marcelo Vladimír García-Sánchez<sup>2</sup>*

*Federico Pérez-González<sup>2</sup>*

### RESUMEN

El objetivo de este artículo es presentar una solución para el control de sistemas de automatización utilizando dispositivos y software de bajo coste. Para ello, se empleó como dispositivo de control la tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B y para el sistema de acceso al proceso una tarjeta de expansión de entradas y salidas PiFace Digital 2, ambos dispositivos ensamblados constituyen un Controlador Lógico Programable PLC de bajo coste. El control de la planta se implementa utilizando el software libre CoDeSys, que proporciona tanto el sistema de desarrollo como el sistema de ejecución. La prueba del control de la planta facilita su uso en prácticas interactivas de laboratorio en áreas de control y automatización.

**Palabras clave:** Automatización industrial, sistemas de bajo coste, educación.

### ABSTRACT

The main aim of this work is to give a solution in order to use low cost devices and software for the control of industrial automation systems. In this way, Raspberry Pi 2 Model B boards have been used as control devices and PiFace Digital 2 expansion boards as inputs and outputs devices for accessing to the process. Both devices in assembly mode constitute a low cost Programmable Logic Control. The control of the plant is implemented using the free software CoDeSys; it provides both the development environment system and the runtime. The case study of the plant allows its use in interactive laboratory practices for control and automation academic disciplines.

**Keywords:** Industrial automation, low cost systems, education.

---

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, México.

<sup>2</sup> Universidad del País Vasco, España.

\* Correo de contacto: mgmorans@uaemex.mx

## INTRODUCCIÓN

Gracias a la aparición de dispositivos potentes de bajo coste unidos a conocimientos adquiridos en instituciones educativas, es posible innovar y crear sistemas de control para cualquier tipo de aplicación o servicio. De hecho, este tipo de sistemas se implantan como herramientas de uso frecuente tanto en educación como en investigación.

Por ello, uno de los retos de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) es superar las limitaciones tecnológicas y de infraestructura en un contexto de escasos recursos e impulsar la competitividad de los estudiantes (Olvera, 2013: 39-41). Para rebasar el reto es necesario utilizar estrategias de aprendizaje enfocadas al estudiante y aplicar métodos de enseñanza que desarrollen en el estudiante la capacidad de avanzar por sí mismos. Otro reto planteado es un sistema de aprendizaje activo en el cual la participación del alumno sea fundamental, ya que la responsabilidad del aprendizaje cae sobre éste. Dichas estrategias se mencionan en la reestructuración curricular del plan de estudios de Ingeniería en Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UAEM. Una de las Unidades de Aprendizaje (U.A) que aplica estas estrategias es Control y Automatización, donde habitualmente se utilizan equipos electrónicos costosos y software con licencia, lo cual limita al alumno para realizar de manera efectiva prácticas relacionadas con estas unidades. Algunos de los temas que se imparten dentro de éstas tienen que ver con diseñar e implementar diferentes tipos de control y automatizar procesos secuenciales o industriales, en ambos se enseña análisis matemático y simulación de procesos automatizados, sin relación con la realidad, lo que provoca desventajas como otras universidades.

Soriano et al. (2013) señalan la existencia de una tendencia generalizada que desencadena la expansión de productos de hardware libre de bajo coste con la intención de aportar simplicidad y estandarización; es decir, dar facilidades a comunidades investigadoras o educativas para hacer uso de estos dispositivos.

Para Simón et al. (2013) la aparición de plataformas de microcontroladores sencillos y kits de desarrollo didácticos de bajo coste, por ejemplo Arduino o Raspberry Pi son opción viable para empleo en la enseñanza de la programación.

Según Valera et al. (2014) las capacidades de computación y comunicación de tarjetas Arduino y Raspberry Pi, unidas a su bajo coste, permiten el desarrollo de laboratorios completos con un mayor número de equipos por alumno, en donde es posible que alumnos pongan en práctica conocimientos adquiridos en el aula. El principal problema a la hora de conseguir esta experimentalidad reside en el precio de los equipos; generalmente el coste de estos equipos es alto, lo que obliga a tener que compartir un solo equipo entre todos los alumnos.

Romo et al. (2015) menciona que el modelado y la simulación mediante una computadora digital del proceso a controlar o supervisar constituyen una herramienta docente inestimable que permite traer al aula y poner a disposición del alumno una descripción realista de los procesos industriales.

Por su parte, García et al. (2015) indican cómo la tarjeta Raspberry Pi desde su inicio fue desarrollada con el objetivo de estimular la enseñanza de ciencias de la computación en escuelas y, actualmente, incluso se ve como posible alternativa para su utilización a nivel del control industrial. Finalmente, Ibarra et al. (2015) resaltan el uso de la Raspberry para crear aplicaciones en el sector educativo en el área rural y para diferentes aplicaciones de la educación.

Los PLC's que se tienen en el laboratorio de automatización de la Facultad de Ingeniería de la UAEM son usados en aplicaciones industriales, debido a ello, tienen un alto coste; además la escasez de los mismos no permite a alumnos realizar prácticas de manera efectiva, ya que se tienen que compartir entre los estudiantes y esperar tiempo para su turno, provocando pérdidas de tiempo y retraso en sus prácticas.

Debido a lo expuesto y como posible alternativa, se propone en este trabajo la utilización de dispositivos de bajo coste, usar la tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B y una tarjeta PiFace Digital 2 para controlar una planta industrial. Hasta ahora no se ha encontrado una proposición en este sentido, en la que ambas tarjetas sean usadas para controlar procesos o para utilizarlos como Controladores Lógico Programables (PLC's), obteniendo así un sistema de control sustentable para la Universidad e industria.

## DESARROLLO

Como se mencionó anteriormente, la propuesta de este trabajo es utilizar dispositivos de bajo coste para controlar una planta. Dos de los dispositivos de bajo coste usados en el control de la planta son: tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B y tarjeta de expansión de entradas y salidas I/O PiFace Digital 2, ambas tarjetas ensambladas proporcionan prestaciones adecuadas al control, ya que inicialmente la primera, Raspberry Pi 2 Modelo B, no fue concebida para interactuar con sistemas de control; para subsanarlo, la tarjeta PiFace Digital 2 proporciona entradas y salidas digitales acondicionadas para activar sistemas de control.

## HARDWARE.

La tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B es la última versión de la tarjeta Raspberry Pi, salió al mercado en febrero de 2015; su base es una placa de computadora personal de bajo coste, creada con el objetivo de estimular la enseñanza en ciencias de la computación en escuelas (Raspberry Pi 2 Modelo B 2015).

Su diseño está basado en un sistema modelo soc (System on a Chip), es decir, integran gran parte de módulos componentes de un computadora en un único chip modelo Broadcom BCM2836. Este chip integra un procesador Quad-Core Cortex-A7 cluster a 900 MHz y una memoria RAM de 1GB para el almacenamiento permanente. La tarjeta establece comunicación con los periféricos (teclado, ratón y webcam) a través de los puertos USB. El monitor se conecta

mediante un conector en formato digital al puerto HDMI, también tiene una conexión de audio y 40 pines entrada-salida GPIO. Además, la tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B establece comunicación con la red a través del puerto Ethernet y tiene una ranura para tarjeta micro SD; la tarjeta se energiza por el puerto de alimentación vía tipo micro USB.

Por otro lado, la tarjeta PiFace Digital 2 (PiFace Digital 2015) es el rediseño de la anterior tarjeta interface PiFace Digital. Ensamblada sobre la tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B permite su conexión con el mundo real de forma fácil y rápida, para ello la tarjeta PiFace Digital 2 integra 4 interruptores, 2 relevadores, 8 entradas digitales y 8 salidas a colector abierto. Tiene 8 leds indicadores y un simulador gráfico. La tarjeta PiFace Digital 2 se ensambla sobre la tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B a través del conector de expansión de 40 pines (como se muestra en la Figura 1). Este conjunto tiene aplicación en educación, automatización industrial y sistemas domóticos; además permite el monitoreo de seguridad, internet de las cosas, monitoreo remoto, etcétera.

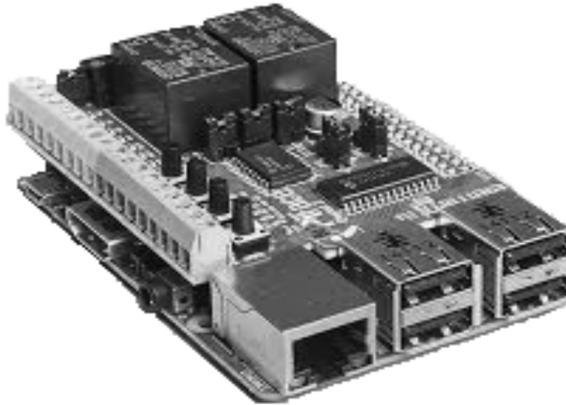


Figura 1. Tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B y PiFace Digital 2.  
Fuente: elaboración propia.

Las principales características de las tarjetas ensambladas se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS RASPBERRY PI MODELO B Y PIFACE DIGITAL 2

SOC	Broadcom BCM2836
CPU	ARM Quad-Core Cortex-A7 cluster a 900 MHz
RAM	1 GB
Periféricos	8xGPIO, SPI, I <sup>2</sup> C, UART
Puerto	4 USB 2.0
Puerto	HDMI, Ethernet
Entradas	8 entradas digitales

Salidas	8 salidas a colector abierto
Memoria	micro SD $\geq$ 4GB
Interruptores	4 táctiles
Relés	2 relés de conmutación

Fuente: elaboración propia.

Las salidas digitales de las tarjetas Raspberry Pi 2 Modelo B y PiFace Digital 2 proporcionan 5V, además tiene 2 salidas a relé para conectar cargas superiores. La tarjeta PiFace Digital 2 permite la comunicación con dispositivos externos directamente sin utilizar un circuito de acondicionamiento de la señal.

Los relevadores son usados cuando se activan con señales de baja potencia, aíslan el control y los circuitos a controlar. La corriente directa que le llega a la bobina del relé crea un campo magnético que atrae y cambia los contactos del interruptor, lo que provoca que el relé tenga 2 estados: encendido-apagado.

## SOFTWARE

### *Sistema operativo*

Sobre la tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B es necesario instalar un sistema operativo compatible, entre los disponibles, Raspbian (Raspberry Pi, RASPIAN, 2015) es el más utilizado en soluciones de automatización, éste es un sistema operativo de libre distribución de Linux (Debian), las ventajas del sistema operativo Raspbian es que tiene un entorno de escritorio basado en ventanas y tiene software preinstalado que permite la edición de código; Raspbian se descarga de la web (Raspberry Pi, RASPIAN, 2015) y crea una imagen Raspbian (un archivo) que se descarga en la tarjeta micro SD para que las tarjetas Raspberry Pi 2 Modelo B y PiFace Digital 2 se inicialicen.

### *Runtime*

Las tarjetas Raspberry Pi 2 Modelo B y PiFace Digital 2 pueden funcionar como PLC, para ello, necesitan de la instalación de un runtime que permita la ejecución de programas de automatización; en este trabajo, el runtime empleado es codesys Control for Raspberry Pi. Runtime se ejecuta sobre el sistema operativo Raspbian, el runtime de codesys se puede descargar desde la web (codesys Store 2015).

## SISTEMA DE DESARROLLO.

CODESYS es una plataforma software libre diseñada especialmente para cumplir los requisitos de proyectos modernos de automatización industrial, ésta proporciona una herramienta de programación IEC 61131-3 (IEC, 2013) como el centro del sistema de desarrollo. Además incluye soluciones integradas y amigables para dar soporte al usuario en el desarrollo de proyectos, entre ellos: ingeniería, visualización, seguridad, runtime, fieldbus y servicios. El software de desarrollo CODESYS también se puede descargar desde la web (CODESYS 2015).

IEC 61131 es el estándar de los Controladores Lógico Programables (PLC's), computadora industrial usada para monitorear entradas, basado en su programa lógico, controlar (encender o apagar) salidas para automatizar una máquina o un proceso.

La parte 3 del estándar IEC 61131 se encarga de los lenguajes de programación de los sistemas de automatización. IEC 61131-3 estandariza los lenguajes de programación en la automatización industrial, haciendo el trabajo independiente de cualquier compañía. En la IEC 61131-3 se recogen las especificaciones de sintaxis y semántica de los lenguajes de programación, incluyendo el modelo de software y su estructura.

IEC 61131-3 define 5 lenguajes de programación, de los cuales 2 son textuales: Texto Estructurado (ST), Lista de Instrucciones (IL) y 3 son gráficos: Diagrama de contactos (LD), Diagrama de Bloques Funcionales (FBD) y Gráfica de Función secuencial (SFC) (Vyatkin, 2003).

Las principales características de CODESYS son: posibilidad de programar con los lenguajes de dicho estándar IEC 61131-3, creación de una interfaz Hombre-Máquina HMI y trabajar en modo simulación del proceso a controlar (Molas 2006).

### *Metodología.*

Para realizar el proyecto propuesto se siguió la metodología mostrada en la Figura 2, tomando en cuenta los siguientes elementos: computadora, la cual tiene instalado el sistema de desarrollo CODESYS; switch para comunicar la computadora con las tarjetas; tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B y tarjeta PiFace Digital 2. Además del sistema de automatización se dispone de una maqueta para la simulación de la planta industrial a controlar a través de las tarjetas.

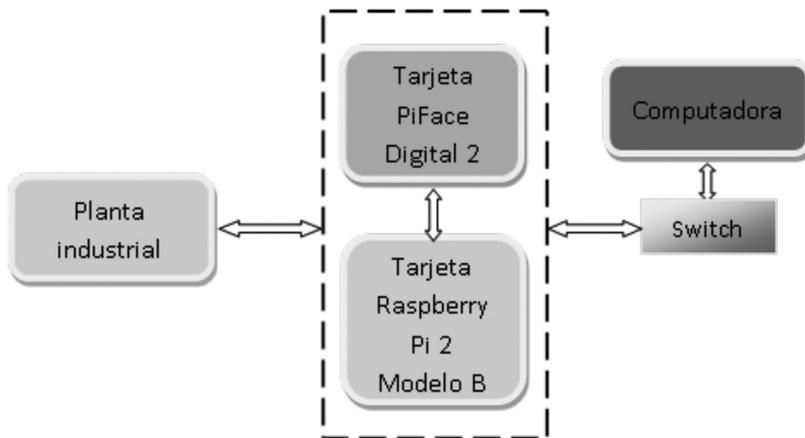


Figura 2. Metodología del control de la planta.  
Fuente: elaboración propia.

La metodología es la siguiente:

1. Instalar y Configurar el Sistema Operativo: como se mencionó anteriormente, es necesario descargar desde la página oficial de Raspberry Pi el sistema operativo Raspbian y grabar el so en una memoria micro sd. Después se debe insertar la memoria a las tarjetas Raspberry Pi 2 Modelo B y PiFace Digital 2, conectar el ratón, teclado, monitor, cable de red y, finalmente, la alimentación.

Una vez que se inicia el sistema operativo es necesario configurar la tarjeta y cambiar alguna de sus características como: a) habilitar que se inicie la tarjeta desde escritorio, b) configurar teclado, c) configurar los parámetros de la red y d) habilitar el servidor ssh para acceder al dispositivo desde una computadora y que la tarjeta reinicie en entorno gráfico.

2. Instalar el runtime: una vez descargado el runtime de codesys es necesario trasladarlo a la memoria micro sd y después ejecutar dicho runtime

3. Probar la comunicación entre las tarjetas y la computadora: la computadora y tarjeta Raspberry Pi 2 y PiFace Digital 2 se conectan empleando los cables de red a través del switch. En el sistema de desarrollo codesys se debe crear un nuevo proyecto y agregar un dispositivo de tipo codesys Control for Raspberry Pi. En el menú del dispositivo se configura la dirección ip de la tarjeta. Después se observa cómo se enciende un led de color verde mostrando la correcta comunicación entre las tarjetas y la computadora.

4. Realizar el programa de control: en el sistema de desarrollo codesys y dentro del proyecto antes creado es posible elegir el lenguaje de programación bajo la IEC 61131-3. Una vez seleccionado permite programar el control aplicado al caso de estudio y ejecutarlo en modo simulación para verificar su funcionamiento.

5. Descargar el programa en las tarjetas Raspberry Pi 2 Modelo B y PiFace Digital 2: para realizar la descarga del programa a la tarjeta Raspberry Pi 2 Modelo B desde el entorno de desarrollo codesys se debe desactivar el modo de simulación y activar el modo en línea. Una vez descargado es posible ejecutar el programa.
6. Realizar prueba del control en el caso de estudio: cuando se inicia la ejecución del programa, el usuario puede comprobar el funcionamiento del sistema de automatización e incluso realizar el depurado de la aplicación de control.

### CASO DE ESTUDIO

Se aplicó a un caso de estudio la metodología anterior.

Después de realizar los 3 primeros pasos generales, sin importar la aplicación, se procede a la selección del caso de estudio. Se tomaron en cuenta varios factores: costo, seguridad y sencillez. Facilidad de ilustrar aspectos teóricos de interés y al mismo tiempo no debe alejarse demasiado de plantas realmente existentes en la industria.

La conexión del control a la planta industrial se muestra en la Figura 3; la planta consta de 2 tanques de agua que se llenan al mismo tiempo. Se tiene una bomba de agua que sirve para llenar los tanques. El control aplicado a la planta es un tipo de control ON-OFF con un interruptor enciende la bomba para el llenado de los tanques y con otro apaga la bomba para dejar de suministrar agua a los tanques.

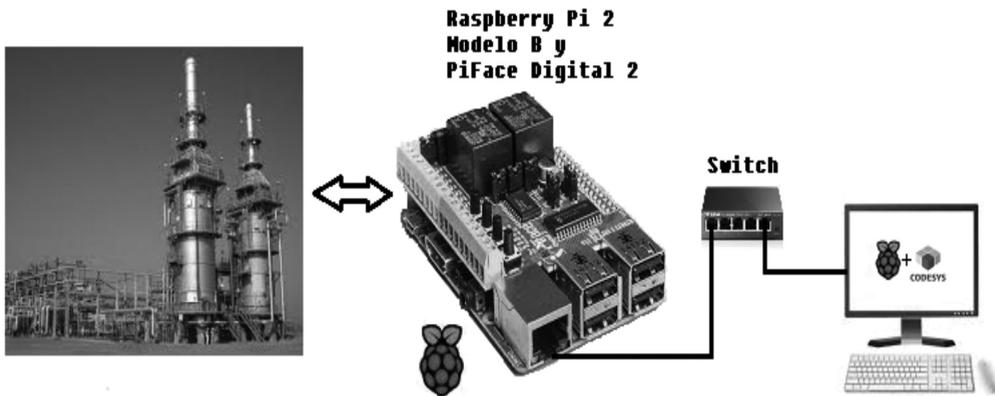


Figura 3. Control de la planta industrial.  
Fuente: elaboración propia.

Con base al funcionamiento de la planta a controlar, se continuó con el paso 4; se programó en el lenguaje de diagrama de contactos (*Ladder*) dentro del entorno de codesys (Figura 4); se ejecutó el programa en modo simulación. Este recurso permite a los alumnos simular sus programas antes de descargarlos a las tarjetas y verificar su correcto funcionamiento.

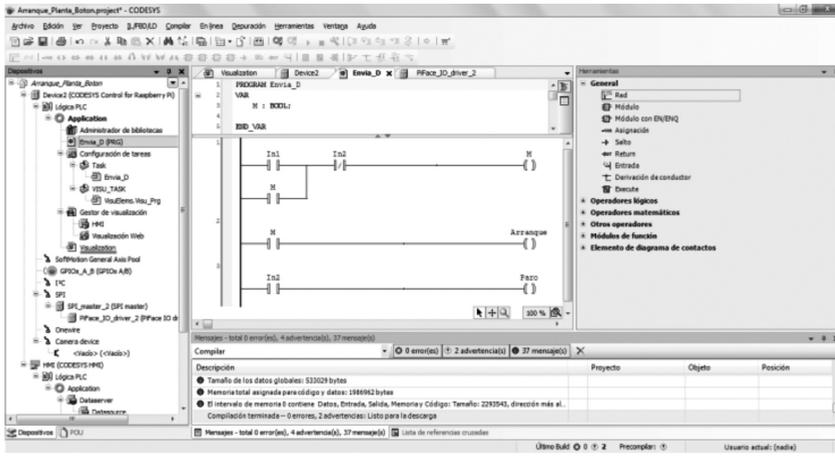


Figura 4. Programa del control de la planta.

Fuente: elaboración propia.

Para realizar el paso 5, dentro del entorno de CODESYS, se cambió el modo de simulación a modo en línea, se descargó y ejecutó el programa en las tarjetas a través de Ethernet. La prueba del programa de control se demostró con la activación de las salidas correspondientes, que a su vez están conectadas físicamente a la planta.

El funcionamiento del paso 6 se llevó a cabo a través de una interfaz hombre-máquina HMI que se generó dentro del entorno de CODESYS. La HMI es generada después de crear una visualización con base al funcionamiento de la planta. La visualización creada consta de 2 interruptores y 2 lámparas (Figura 5). Un interruptor de encendido de la bomba de agua en la planta y uno de apagado.



Figura 5. HMI para el control de la planta.

Fuente: elaboración propia.

Para la prueba de la HMI se realizó en modo simulación y modo línea junto con las tarjetas y la puesta en marcha de la Planta a controlar.

La implementación en el caso de estudio se llevó a cabo con las pruebas de puesta en marcha de la planta, se ejecutó el software y se mostró la HMI. (Figura 6). Su funcionamiento es el siguiente: se presiona el interruptor del lado izquierdo para encender la bomba de agua, se comprueba de manera visual el funcionamiento, Figura 6, ya que automáticamente al presionar el interruptor se visualiza gráficamente el cambio de color del botón, produciendo una señal de salida en las tarjetas y la planta; se enciende el led de color verde situado en la parte izquierda.

Para apagar la bomba de agua se presiona el interruptor del lado derecho, se comprueba de manera visual el funcionamiento (Figura 6), se enciende el led de color rojo situado en la parte derecha que se visualiza gráficamente, lo cual provoca que la bomba y el led de color verde se apaguen.

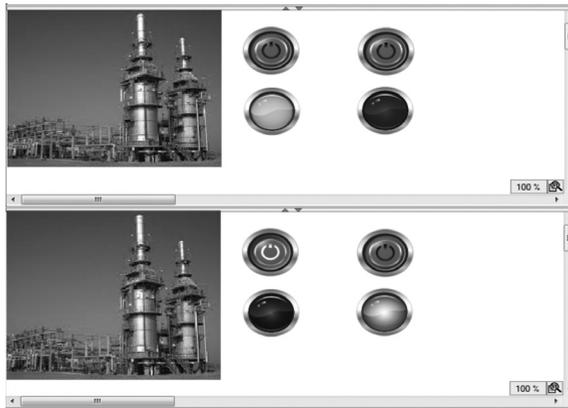


Figura 6. Funcionamiento de la HMI para el control de la planta.  
Fuente: elaboración propia.

La conexión física de las tarjetas Raspberry Pi 2 Modelo B y la tarjeta PiFace Digital 2 con el switch y la computadora se muestran en la Figura 7.



Figura 7. Interconexión física de las tarjetas.  
Fuente: elaboración propia.

El coste promedio de una solución comercial oscila entre 4 mil 500 y 5 mil pesos mexicanos y el coste de la propuesta a la fecha es 450 pesos, lo que muestra una diferencia en la comparación de ambas soluciones de 10 veces.

## CONCLUSIONES

La principal aportación de este artículo es la difusión del uso de tecnologías de bajo coste en diferentes áreas, educación, control y automatización, para la mejora del aprendizaje continuo del estudiante.

Este artículo presenta un enfoque de cómo desarrollar y ejecutar programas para PLC's en tarjetas Raspberry Pi 2 Modelo B y PiFace Digital 2, proporcionando un sistema de automatización completo y con un coste económico comparado con un PLC industrial.

Otra ventaja de utilizar las tarjetas Raspberry Pi 2 Modelo B y la PiFace Digital 2 es su bajo consumo de recursos, resultando que el proyecto sea energéticamente sostenible. La utilización del sistema operativo Raspbian y el entorno de desarrollo CODESYS son de libre distribución, además el sistema de desarrollo es compatible con IEC 61131-3 y es posible programar el sistema de automatización en cualquiera de los 5 lenguajes de programación, tal como se realizaría en un PLC industrial.

El estudiante puede aprender a integrar toda una serie de conocimientos previos del área de Ingeniería Electrónica y adquiridos.

Debido a la escasez de PLC's en el laboratorio de automatización de la Facultad de Ingeniería de la UAEM, el proyecto propuesto puede utilizarse para realizar prácticas docentes de la unidad de aprendizaje de Control de Procesos Industriales de la carrera de Ingeniería en Electrónica y la unidad de aprendizaje Control 2 de la carrera de Ingeniería Mecánica, donde se imparte Automatización de Procesos. Esta unidad de aprendizaje incluye programación y aplicación de PLC's. Las prácticas desarrolladas son interactivas y de vital importancia para el ámbito laboral del estudiante.

Se comprueba con el caso de estudio el control de una planta con la activación de la bomba de agua industrial. Como futuras aplicaciones de este proyecto, está la creación de kits de desarrollo didácticos a bajo coste, así como utilizar estos dispositivos para comunicarlos a través de comunicaciones industriales para PLC's como Modbus, EtherCat o Profinet.

## REFERENCIAS

- codesys (2015). [En línea], disponible en <https://www.codesys.com/> (consultado el 15 de octubre de 2015).
- codesys Download-Center (2015). [En línea], disponible en <https://www.codesys.com/download.html> (consultado el 13 de noviembre de 2015).
- codesys Store (2015). [En línea], disponible en <https://www.codesys.com/download.html> (consultado el 13 de noviembre de 2015).
- García, M., Pérez, F., Calvo, I., López, F., Morán, G. (2015), “Desarrollo de CPPS sobre IEC-61499 basados en dispositivos de bajo coste”, *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, 2-5 de Septiembre de 2015, Bilbao, España.
- Ibarra, M., Huaraca, C., Ataucusi, P., Mamani, E., Chiclla, E. (2015) “Mini Servidor Web de bajo costo para la educación rural basado en Raspberry Pi”, *6TH International Symposium on Innovation and Technology ISIT2015*, 13-14 de Agosto de 2015, Mar de la Plata, Argentina.
- IEC, International Electrotechnical Commission (1993), “IEC 61131-3:2013. Programmable controllers-Part 3: Programming Languages”. [En línea], disponible en [www.iec.ch/publication/4552](http://www.iec.ch/publication/4552) (consultado el 1 de diciembre de 2015).
- Molas, L., Ferrater, C., Gomis, O., Sudirà, A., Boix, O., Benítez, I., Sicchar, R., Gomes, M., Roldán, F., Arias, K., Villafruela, L. (2006), “Integración internacional de plataformas de enseñanza a distancia de automatización con PLCs”. *IEEE-Revista Iberoamericana de Tecnologías de Aprendizagem- IEEE-RITA*, 1(1).
- Olvera, G. (2013), “Plan Rector de Desarrollo Institucional PRDI 2013-2017”, México, Universidad Autónoma del Estado de México.
- PiFace Digital (2015). [En línea], disponible en <http://www.farnell.com/datasheets/1684425.pdf> (consultado el 13 de octubre de 2015).
- Raspberry Pi 2 Modelo B (2015). [En línea], disponible en <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/> (consultado el 14 de noviembre de 2015).
- Raspberry Pi, RASPBIAN (2015). [En línea], disponible en <https://www.raspberrypi.org/downloads/> (consultado el 14 de noviembre de 2015).
- Romo, R., Mazaeda, R., Martí, R. (2015), “Laboratorio docente de PLC's para controlar plantas virtuales basadas con RaspberryPi”, *Actas de la XXXVI Jornadas de Automática*, 2-5 de Septiembre de 2015, Bilbao, España.
- Simón, J., Blet, N., Bender, C., Recanzone, R., Sosa, J., Torres, A., (2013), “Sobre la utilización de sistemas embebidos para la enseñanza de la programación en una carrera de Ingeniería Electrónica”, *IV Congreso de Microelectrónica Aplicada* (uEA 2013), Bahía Blanca, Argentina.
- Soriano, A., Marín, L., Juan, R., Cazalilla, J., Valera, A., Vallés, M., Albertos, P. (2013), “Plataforma Robótica de bajo coste y recursos limitados basada en arduino y dispositivos móviles”. *Actas de la XXXIV Jornadas de Automática*, 4-6 de Septiembre de 2013, Terrassa, Barcelona.

- Valera, A., Soriano, A., Vallés, M., (2014), “Plataformas de bajo coste para la realización de trabajos prácticos de Mecatrónica y Robótica”. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. 11(2014),pp.363-376.
- Vyatkin, V., y Hanisch H.-M. (2003), “Verification of distributed control systems in intelligent manufacturing”, *Journal of Intelligent Manufacturing* ,14, pp. 123-136.