

# Control automático global sobre transporte neumático de productos en una planta de pastelería industrial



## Global automatic control over pneumatic conveying for food products in an industrial bakery



Basil Mohammed-Al-Hadithi<sup>1,2</sup>, José A. Perales-Gómez<sup>1</sup>, Agustín Jiménez-Avello<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Madrid. Calle Ronda de Valencia, 3 - 28012 Madrid. Tfno: +34 913 36 76 99.

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid-CSIC. Centro de Automática y Robótica. Calle José Gutiérrez Abascal, 2 - 28006 Madrid. Tfno: +34 913 36 30 60

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7848> | Recibido: 27/01/2015 • Aceptado: 17/10/2015

### ABSTRACT

• The main idea of this article seemed focused on designing a system of total control to become the transport system ingredients specializes in the manufacture of food products in a completely automated factory. The system must know at all times the demand for the products in each workstation, as well as other key features in the making.

At first automation is implemented only with the aid of a PLC logic controller (PLC) and a screen human machine interface (HMI) to allow an operator to monitor and control the entire installation without leaving your job. However, it was decided to carry out automation with a wide and varied selection of electronic devices. So also we implemented a Field Programmable Gate Array (FPGA), a microprocessor Arduino. The timing of all these devices can not only get a more economical and effective, but also a success of broad industrial interest, to cover several typical areas of Engineering.

• **Keywords:** Automation, FPGA, Communication, PLC, Food Industry, Microprocessor.

### RESUMEN

La idea principal de este artículo se ve enfocada en diseñar un sistema de control total que convierta el sistema de transporte de ingredientes de una fábrica especializada en la elaboración de productos alimenticios en un proceso completamente automatizado. El sistema debe saber en todo momento la demanda de los productos en cada estación de trabajo, así como otras características clave en la fabricación.

En un primer momento se implementa la automatización únicamente mediante la ayuda de un autómata *programable logic controller* (PLC, Controlador Lógico Programable) y una pantalla *human machine interface* (HMI, Interfaz Humano Máquina) que permite a un operario monitorizar y controlar toda la instalación sin moverse de su puesto. Sin embargo, se decide llevar a cabo una automatización con una selección más amplia y variada de dispositivos electrónicos. Así, se implementa además una *Field Programmable Gate Array* (FPGA, Vector Matriz de Puertas Programable), y un microprocesador Arduino. Con la sincronización de todos estos dispositivos se consigue no solamente un sistema más económico y eficaz, sino también un caso de éxito de amplio interés industrial, al abarcar varias áreas típicas de la Ingeniería.

**Palabras clave:** Automatización, FPGA, Comunicaciones, PLC, Alimentación, Microprocesadores.

### 1. INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria incluye los colectivos de negocios y manufacturas que, en conjunto, proporcionan productos alimentarios a la gente para ser consumidos<sup>[1]</sup>. El control de la higiene y la calidad son las principales prioridades en sus procesos. Para asegurar la calidad y seguridad en la comida, se deben implementar procesos de automatización y control en las operaciones de manufacturación de alimentos<sup>[2][3][4]</sup>. Dichos procesos son realizados implementando una serie de dispositivos programados en base a una lógica determinada, y usando las diferencias entre los valores medidos de las variables controladas y sus valores deseados para regular el proceso de salida<sup>[5][6][7]</sup>.

Inicialmente se cuenta con una fábrica especializada en la producción de productos alimenticios centrados en la pastelería. Las máquinas empleadas para ello responden a un sistema de control manual o semi-automático, así como los sistemas de transporte. Además contamos con unos silos en los cuales se depositan los ingredientes para los distintos productos.

Este trabajo se ve enfocado en diseñar un sistema de control total que convierta los sistemas de transporte de ingredientes de la fábrica en un proceso completamente automatizado. El sistema sabrá en todo momento las distintas cantidades de ingredientes que se encuentran en los silos, la demanda de los productos en cada estación de trabajo, así como otras características clave en la fabricación. Es decir, se intentará controlar todo el proceso de producción, de manera que éste se pueda realizar sin intervención humana y sabiendo en todo momento las condiciones de contorno de cada punto del sistema, empleando para ello las tecnologías adecuadas, tales como automatización de procesos con PLCs, pantallas de diálogo hombre-máquina, *Field Programmable Gate Array* (FPGA, Vector Matriz de Puertas Programable), microcontroladores y redes de comunicación.

En la Figura 1 se exponen las distintas partes del proceso a automatizar. Se han eliminado las referencias a los distintos nombres de los componentes dentro de la instalación y a la propia empresa donde se realizó por motivos de privacidad.

De izquierda a derecha del esquema, el sistema se comporta del modo:

- Contamos con tres silos de ingredientes, de los cuales uno contiene azúcar y los otros dos portan harina. Dichos silos llevan incorporados un fondo vibrante y una válvula de mariposa cada uno. La válvula de mariposa ha de abrirse para extraer el contenido de los mismos, mientras el fondo vibrante se activa para facilitar su vaciado.

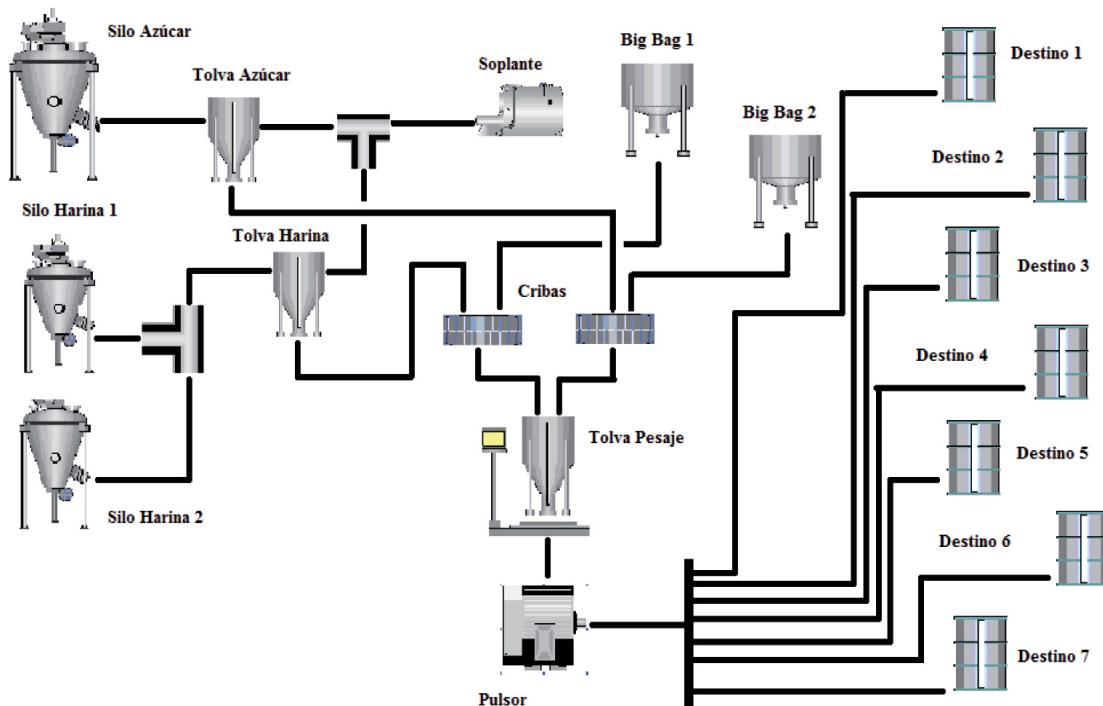


Fig. 1: Esquema explicativo de los componentes a automatizar dentro de la instalación

- Por medio de tuberías los silos están conectados a dos tolvas, una para el azúcar y otra para la harina. Los dos silos de harina convergen en la misma tolva, pero el contenido de estos no debe mezclarse, por lo que un desviador se encargará de conectar únicamente un silo con esta tolva. Cada tolva dispone de sensores que nos indican cómo de llenas están y una válvula que se abrirá cuando la tolva requiera ser vaciada.
- Para efectuar el transporte de ingredientes desde los silos hasta las tolvas de harina y azúcar contamos con un motor soplante, que dispone de una válvula rompe-vacío de seguridad, el cual aspirará el contenido de los silos hasta las tolvas correspondientes. Con el objetivo de evitar que los ingredientes lleguen al soplante, se han instalado filtros en las dos tolvas, los cuales necesitan un soplido de aire cada cierto tiempo para evitar que se atasquen mientras estén funcionando.
- También disponemos de dos contenedores portátiles llamados Big Bag (Mochila Grande en inglés). Uno de ellos se usa para introducir en el sistema azúcar glas, de manera que se ha instalado un tamiz para su filtrado. En el otro Big Bag se puede colocar cualquier ingrediente que se desee, funcionando como entrada alternativa de ingredientes dentro de la instalación.
- Las tolvas de harina y azúcar, y el Big Bag que no dispone de tamiz están conectados mediante tuberías a dos cribas de filtrado. Los ingredientes circularán por ella mediante la acción de tornillos sin fin. Tras ser filtrado, el material, mediante la acción de otros tornillos sin fin, será conducido hasta una tolva especial denominada Tolva de Pesaje. Dicha tolva consta de un volumen inferior al de las otras tolvas, pero dispondrá de un sensor especial que nos indicará el peso de ingrediente contenido en la misma.
- Cuando la Tolva de Pesaje sea llenada con la cantidad deseada del ingrediente pedido, su válvula se abrirá y verterá su contenido con la ayuda de otro tornillo sin fin a un pulsor.

Sin embargo, se decidió instalar entre la Tolva de Pesaje y el pulsor un separador de metales para evitar que el ingrediente no pueda contener ningún residuo metálico, mejorando la calidad del mismo.

- El pulsor es una máquina especial que se encargará de enviar el ingrediente al destino deseado mediante el aumento de presión dentro de su compartimento, por lo que el contenido será empujado al mismo. Disponemos de un total de siete destinos diferentes, cada uno situado en una parte de la fábrica. La necesidad de instalar dicho pulsor, y no otro sistema compuesto por una tubería y un tornillo sin fin, viene dada por el hecho de que las distancias entre esta parte del sistema y los distintos destinos es bastante elevada.
- Para la elección del destino correcto, se ha instalado una válvula especial con distintas etapas. El modelo comercial idóneo para este caso es una válvula de diez etapas, pues no existen de siete etapas, y además, así se prevé la adición de más destinos en un futuro.

Abordaremos el problema de la automatización del sistema de transportes, presentando los inconvenientes y planteamientos iniciales, así como el método a desarrollar para poder solucionarlos adecuadamente y respondiendo a las necesidades del cliente. Se verá cómo la automatización al completo estará gobernada por un PLC. El operario podrá comunicarse con él por medio de una pantalla táctil HMI para poder comprobar el estado del proceso e indicarle las acciones que la automatización debe llevar a cabo. Sin embargo, observaremos las diferentes mejoras en ciertas partes de la automatización para crear un sistema más efectivo. Se expondrá como desarrollar unos sensores de pesaje con un microprocesador, el cual podrá medir cualquier peso que le pidamos y transmitirá un número entero al PLC, para que este traduzca el valor a peso que estamos buscando. Así estos sensores de pesaje serán flexibles y en un futuro podremos implementarlos en cualquier parte de la instalación que se vaya precisando. Incluso hemos utilizado un dispositivo semiconductor denominado FPGA para controlar el arranque del motor utilizado para aspirar los ingredientes de los

silos. De esta forma conseguiremos que el autómata tenga menos responsabilidades y podamos ahorrar, al poder elegir modelos más económicos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se exponen tanto los problemas iniciales a la hora de automatizar la instalación como las soluciones tomadas. Para una mayor comprensión, se ha dividido en varios apartados, cada uno correspondiente a un dispositivo en concreto utilizado.

### 2.1. AUTÓMATA DEL PROCESO

Todos los dispositivos posteriores descritos en este capítulo deberán ser conectados por medio de un autómata para su sincronización. Dicho autómata tendrá que ser capaz de recibir las diferentes señales de cada uno de ellos, tomar las decisiones acertadas y poder enviar señales de salida hacia los distintos dispositivos para que éstos realicen las acciones deseadas en ese preciso momento del proceso.

Sin embargo, su principal función será controlar la mayoría de los sensores y actuadores de toda la instalación. Adoptará por tanto la lógica más compleja y elaborada de todos los dispositivos. En otras palabras, será el núcleo de la automatización y pieza indispensable del mismo. Se decidió que dicho autómata fuera un modelo PLC por diversas consideraciones:

- A día de hoy, los PLCs han resultado ser de los dispositivos más fiables del mercado para el desarrollo de las tareas que se precisan realizar con nuestro autómata, con una capacidad de memoria, una velocidad de comunicación<sup>[8]</sup> y un abanico de recursos a la hora de programar más que aceptables<sup>[9]</sup>.
- Posibilidad de programar un código en diversos lenguajes dentro del mismo PLC. Esto facilita en gran medida la tarea del programador al poder aprovechar las mejores ventajas de cada uno de los lenguajes empleados, lo que se traduce en una reducción de horas empleadas en la programación, que equivale a una reducción del coste de la automatización.
- Capacidad de añadirle adaptadores Ethernet y Puerto Serie para comunicarlo tanto con la pantalla HMI como con los sensores de pesaje que hemos desarrollado.

Todos los demás dispositivos enviarán al autómata señales de distinta índole (digitales, analógicas, puerto serie y protocolo MODBUS), que recogerá y analizará para generar la toma de decisiones acertada. Tras esto, el PLC enviará señales a todos los dispositivos indicándoles qué deberían hacer.

La instalación tiene dos Big Bag que pueden ser cargados con cualquier ingrediente y tres silos: dos de harina y uno de azúcar. Los ingredientes depositados en estos cinco contenedores irán a parar a siete destinos diferentes de la fábrica. Se podría programar únicamente el envío de un tipo de ingrediente específico a cada destino, puesto que por regla general solamente va a enviarse un tipo de ingrediente a cada destino. Sin embargo, por petición del cliente, se debe hacer una programación en la que se pueda enviar cualquier tipo de ingrediente a cualquier destino. Esto es debido a que el cliente desea poder enviar cualquier ingrediente a cualquier destino si así fuera necesario.

La Figura 2 muestra los distintos módulos de programación. Como puede observarse, a la izquierda de los nombres de las secciones hay un cuadrado con las letras "LD" y "SFC", el cual hace referencia al lenguaje en el que se han escrito. LD corresponde a lenguaje *Ladder*, extensamente utilizado para la programación de autómatas. SFC corresponde a Diagrama Funcional Secuencial. Es

un lenguaje inspirado en los grafcet, el cual permite realizar programas de forma muy organizada y de fácil lectura.

En primer lugar, el programa recoge toda la información de las entradas del PLC, la proporcionada por la pantalla HMI a través de comunicaciones por protocolo MODBUS, y el valor enviado por puerto serie desde el sensor de pesaje elaborado con el microprocesador *Arduino*. Con dicha información, las demás secciones pueden empezar a trabajar y tomar decisiones.

Se ha dividido las secciones para que administren una parte del proceso cada una. Cada sección se dividió a su vez en dos secciones, una escrita en SFC y otra en LD. Las secciones SFC están programadas de manera similar a un grafcet, indicando, según la información y las decisiones tomadas en todo el proceso, en qué estado se encuentra la sección correspondiente. Las secciones LD analizan el estado en el que se encuentra su sección SFC correspondiente, y en función de ello toman las decisiones pertinentes.

Tras ejecutarse todas las secciones anteriores, la última parte del programa recoge las decisiones (en forma de señales del PLC) producidas durante la ejecución, y ordenan activar los actuadores que deban funcionar en ese momento preciso del proceso. También recogen los posibles errores producidos para parar la sección o secciones correspondientes si fuera necesario, y preparan la información que enviarán por comunicaciones a la pantalla HMI para que ésta se muestre al operario.

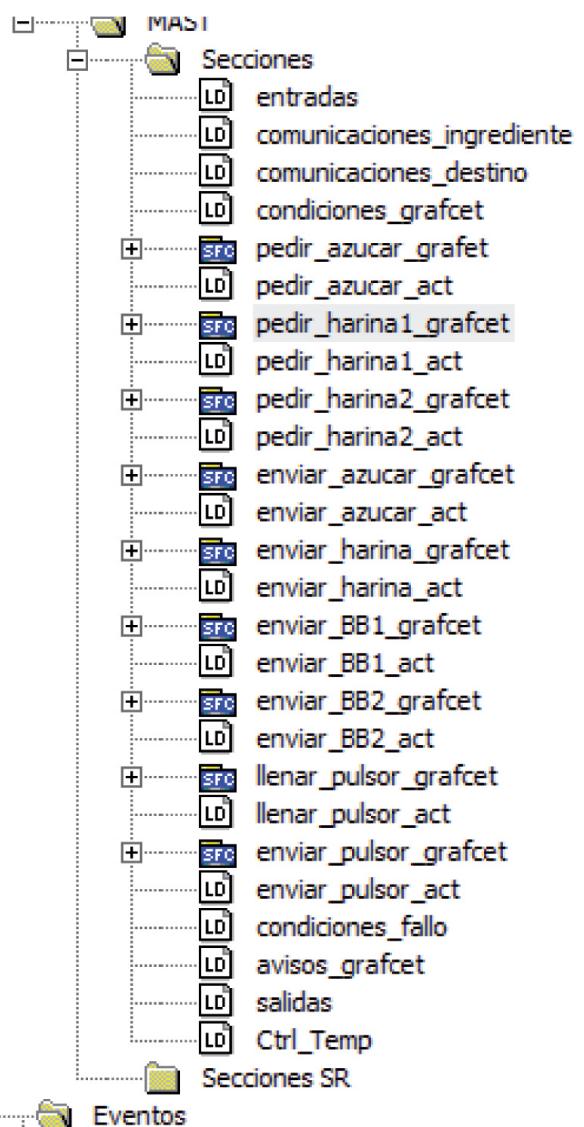


Fig. 2: Conjunto de secciones que componen el programa del PLC

## 2.2. CONTROL DEL SOPLANTE MEDIANTE FPGA

Los soplantes de aire son usados extensamente en la industria [10]. El rendimiento de dichos soplantes depende principalmente de que su diseño permita un buen aprovechamiento de la presión de aire. Para un buen funcionamiento del soplante que suministra ingredientes a las tolvas pulmón, se deben controlar además de este un determinado número de válvulas.

Con el objetivo de controlar de la manera más eficiente posible dicho soplante, se ha decidido implementar una FPGA en el sistema que funcione como una caja negra. Su tecnología hace del proceso de modelado una tarea simple y reduce el tiempo de diseño del sistema [11][12]. Otras razones por las que se ha elegido su implementación son la oportunidad de poder mejorar la automatización en un futuro (por ejemplo, añadiendo un control robusto) sin tener que emplear otro dispositivo [13][14][15] y su bajo coste [16].

Por un lado, al comienzo de funcionar el soplante, este tiene que trabajar sin vacío para evitar un sobreesfuerzo. Dispondremos para ello de una válvula rompe-vacío, la cual tendrá que abrir el sistema de tuberías cuando el soplante se arranque, y cerrarse a los tres segundos, para, con el soplante en pleno funcionamiento, crear un vacío que permita a los ingredientes desplazarse hasta la tolva pulmón correspondiente.

Antes de que el soplante comience a funcionar, el sistema de tuberías debe de estar conducido hacia la tolva pulmón deseada. Hay dos caminos disponibles, la tolva pulmón de harina y la tolva pulmón de azúcar. Hay que controlar que esté abierta la válvula del ingrediente deseado, y solo esa. De lo contrario, no se podrá

activar el soplante, pues los ingredientes podrían mezclarse antes de tiempo.

También, al tiempo que se comprueba que las válvulas que conducen el material están en la posición correspondiente, se deben activar la rotativa y el fondo vibrante del silo correspondiente, para que el material fluya mejor desde el silo hasta la tolva correspondiente.

## 2.3. PESAJE DE SILOS

Disponemos de tres silos, uno de azúcar y dos de harina. Los silos presentan una forma cilíndrica, achatada en la parte inferior. Están sujetos por una estructura con tres columnas. Debajo de cada silo hay un fondo vibrante y una rotativa para conducir los ingredientes desde los silos a las tolvas pulmón. Se necesita medir el pesaje de los distintos silos del sistema.

El principal inconveniente es que no se puede situar un único sensor en el centro, dado que esa zona está ocupada. Se tratará de resolver con tres sensores de pesaje situados en las columnas. Para unirlos, utilizaremos micro-controladores, dado que, para un sensor, el coste de una FPGA sería excesivo, y con un micro-controlador se solucionaría perfectamente, ahorrando en costes.

La idea principal es diseñar un microcontrolador que le lleguen las tres señales de los tres postes de forma analógica, hacer un algoritmo para sumarlas y mandar el valor del pesaje como una salida, ya sea analógica o digital.

De forma teórica, se ha desarrollado un circuito que cuenta con tres puentes de Wheatstone<sup>[17]</sup> con una resistencia piezoeléctrica

cada uno que sea capaz de resistir la tercera parte del peso total como mínimo. Esto es debido a que los tres puentes están situados en las tres columnas del silo de forma equidistante y formando un triángulo equilátero, por lo que las fuerzas se distribuyen equitativamente entre los tres.

Un circuito perfectamente válido para la toma de señales podría ser el que se encuentra en la Figura 3. La señal de salida del puente de Wheatstone posiblemente sea muy pequeña, por lo que habría de amplificarla. Para ello, empleando un amplificador operacional que regule su ganancia para conseguir un voltaje de 0-5V es suficiente.

La ventaja de este circuito es que, debido al uso del primer amplificador operacional, la salida será lineal, lo que nos evitará muchos fallos más adelante. Además, regulando las dos resistencias R1 y R2 podremos ajustar la ganancia a la deseada. La ecuación (1) recoge el valor de la tensión de salida en función de las resistencias empleadas.

$$Vs = \frac{R2 \cdot V}{2R1} x \quad (1)$$

Estos resultados son teóricos. En la práctica si el circuito resultante emplease amplificadores operacionales

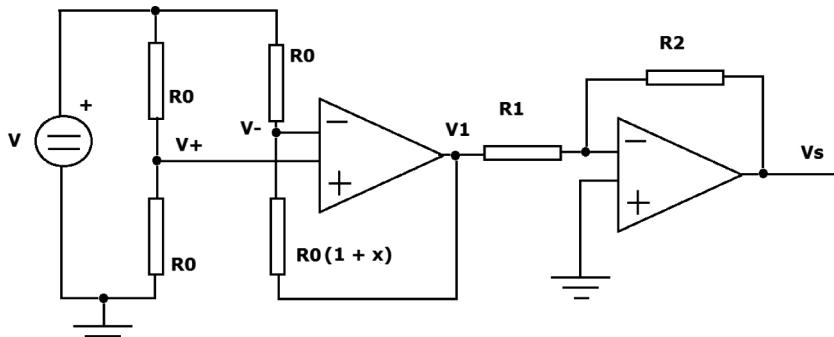


Fig. 3: Circuito teórico de acondicionamiento de la señal de entrada al Arduino

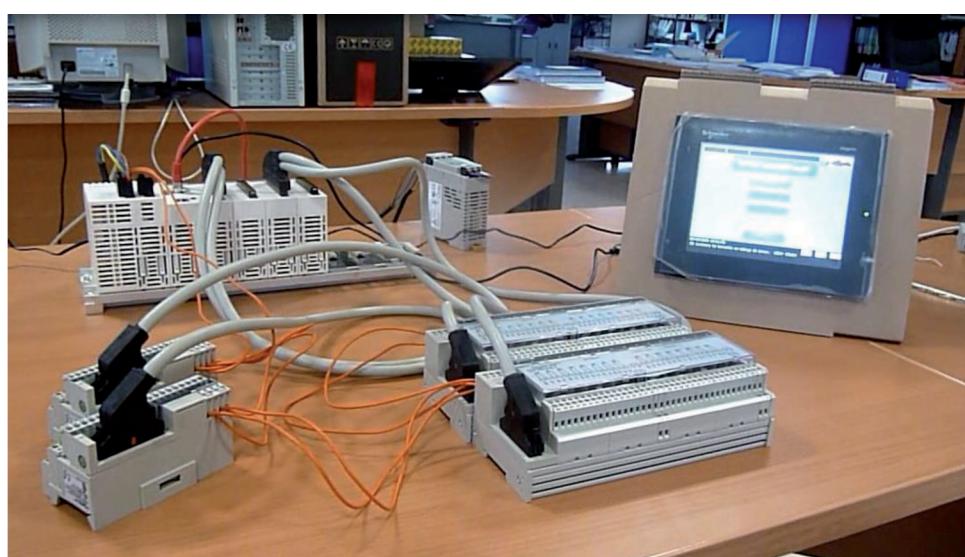


Fig. 4: Conjunto del autómata PLC y la pantalla HMI empleados en la automatización, conectados mediante protocolo MODBUS

normales y resistencias piezoeléctricas con esta configuración, se vería muy influenciado por el ruido eléctrico y sería poco preciso.

Para la práctica se recomienda utilizar células de carga industriales [18] [19]. Estas células de carga tienen un circuito ya integrado, y en la hoja de características el fabricante especifica el voltaje que devuelve en función del peso, y el peso máximo permitido, por lo que simplemente sería conectarlas a las columnas del silo.

#### 2.4. PANTALLA HMI

Para un correcto funcionamiento del proceso, el operario debería poder tener alguna forma de interactuar con toda la instalación, tanto para realizar las peticiones de material como visualizar las fases en las que se encuentra. Existen varios dispositivos capaces de realizar tal función, cuyas diferencias tanto de calidad como precio varían hasta dar lugar a un amplio catálogo de posibilidades [20] [21] [22].

En la industria, el uso de las pantallas HMI se ha extendido exponencialmente debido a varios factores, como su gran flexibilidad [23] y su capacidad de poder comunicarse con otros dispositivos [24]. Por estas razones, se ha decidido implementar una pantalla HMI en la instalación para que el operario pueda visualizar todo el proceso sin moverse de su puesto al tiempo que pueda realizar las peticiones deseadas. Para mayor comodidad tanto para el operario como para el programador, elegiremos una pantalla táctil.

Una vez establecida la conexión, para compartir una variable, basta con declararla en los dos dispositivos y asignarle la misma dirección de memoria. Por ejemplo, si disponemos de una variable llamada "ejemplo", y la declaramos en los dos dispositivos en el hueco de memoria M200.1, al cambiarla en un dispositivo será cambiada automáticamente en el otro. Ante dos cambios de la variable, se ha decidido que predomine la acción del PLC, al tener este más peso dentro de la instalación.

### 3. RESULTADOS

Tras los cálculos, desarrollos y programaciones realizadas, se consiguió automatizar satisfactoriamente el sistema de transporte de ingredientes de la fábrica.

Toda la automatización está gobernada por el PLC, el cual recoge el valor de la mayoría de los sensores implementados en la instalación, toma decisiones según los datos obtenidos, y en base a esas decisiones acciona los actuadores correspondientes. Por medio del protocolo MODBUS, está comunicado con una pantalla HMI, que muestra toda la información del proceso al responsable de la planta. En la Figura 4 puede observarse el PLC conectado a la pantalla HMI mediante el protocolo MODBUS por medio de una red.

El PLC controla que todo el proceso funcione perfectamente, elaborando las decisiones pertinentes para que el pedido deseado se realice correctamente. Existe la posibilidad de "conectarnos online" al PLC mientras está realizando su labor, y, gracias al lenguaje SFC, podemos observar el estado exacto en el que se encuentran cada una de las secciones, por lo que su comprensión resulta extremadamente sencilla. En la Figura 5 puede observarse una de las secciones durante una simulación de un pedido.

Desde la pantalla, el trabajador puede realizar cualquier pedido que desee, especificando el ingrediente, la cantidad y el destino que desee. El autómata será el encargado de coordinar todo el proceso para que el sistema lleve a cabo dicho pedido. Además, el responsable de planta puede observar mediante la pantalla el estado actual de su pedido y de todo el sistema de transportes. También le informará de los posibles fallos que hayan acontecido durante la realización del mismo.

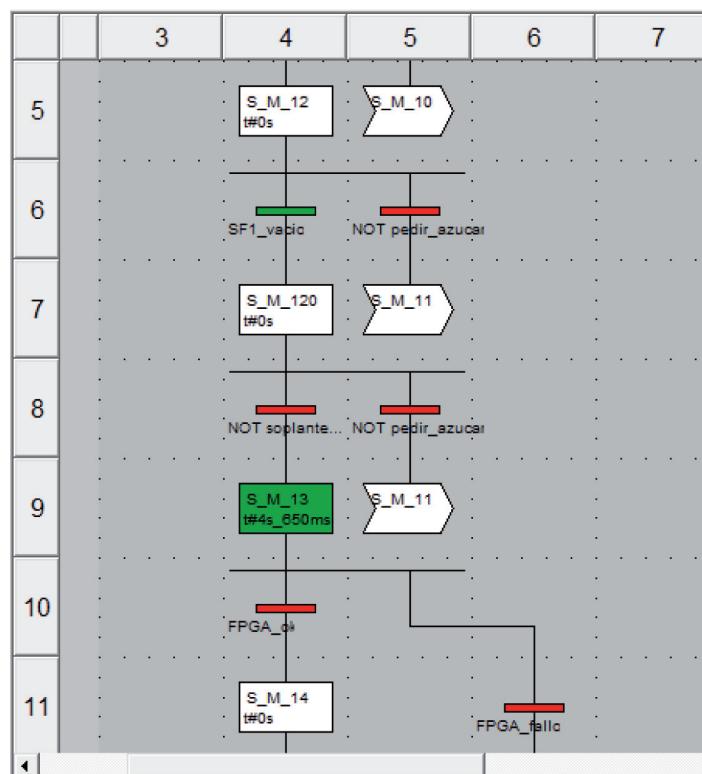


Fig. 5: Sección del PLC durante una simulación. Se muestra en qué estado está y las distintas condiciones

El PLC consta de un total de 21 entradas y 23 salidas. Gracias a la inclusión de la FPGA que controla el soplante, hemos ahorrado entradas y salidas dentro del PLC, lo cual ha abaratado el coste de la instalación al no tener la necesidad de adquirir más módulos de entradas y salidas [25].

Sin embargo, la principal ventaja que nos ha aportado la FPGA es el hecho de tratar el arranque del motor soplante y el llenado de las tolvas de harina y azúcar como una caja negra. El autómata únicamente ha necesitado de tres salidas y dos entradas para controlar toda esa sección dentro del proceso. Las salidas del PLC necesarias indican al entorno del soplante si se desea azúcar o harina, una señal de marcha para que comience a extraer y una señal de emergencia por si se necesita detener el proceso. Como entradas al PLC, éste recibe del entorno del soplante si la extracción se está llevando a cabo correctamente y si se ha producido algún fallo.

Para comprobar sus resultados, se realizó la simulación de su código mediante un *testbench*, mostrado en la Figura 6. El tiempo de simulación que necesitamos es muy superior al que nos podía ofrecer el simulador, por lo que se realizó una reducción proporcional del tiempo. Es decir, conseguimos una simulación que comprobase de igual forma el funcionamiento de la FPGA, pero en un tiempo menor y proporcional para evitar fallos.

La simulación comienza pidiendo un envío de azúcar, prosigue gestionando un envío de harina, y termina comprobando posibles situaciones en las que pudiera darse un error. El funcionamiento general de la FPGA, como puede observarse, es posicionar el desviador hacia el silo determinado, activar el motor soplante, y una vez se ha posicionado el desviador correctamente, poner en funcionamiento la válvula de mariposa y el fondo vibrante del silo correspondiente. Al tiempo la válvula rompe-vacio actúa, comenzando la extracción. Cada 30 segundos, se produce un pulso de aire para evitar que el filtro de la tolva se atranque.

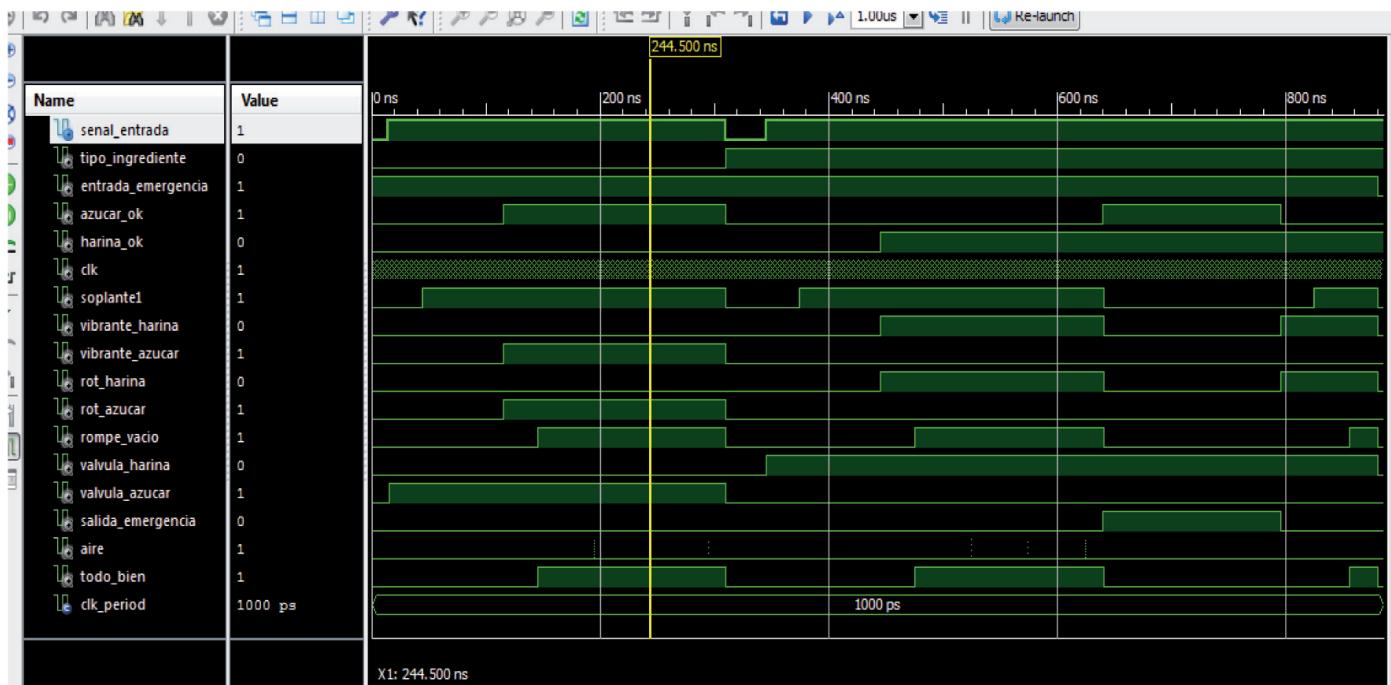


Fig. 6: Simulación de FPGA mediante su testbench

El desarrollo del sensor de pesaje con un microprocesador Arduino nos ha dado la posibilidad de, no solamente ahorrar en la automatización, sino también disponer de sensores universales que en un futuro, si se desea, podrán implementarse en otras partes de la instalación. Las placas Arduino recogen el resultado de la medición del circuito electrónico y la envían a través de su puerto serie al PLC. Pero esta medición no es de carácter absoluto, sino proporcional. La placa Arduino envía un valor entero comprendido entre 0 (valor enviado cuando el depósito a medir se encuentre vacío) y 3072 (valor enviado cuando el depósito se encuentra lleno). Se han empleado tres circuitos, uno por cada pata, por lo que la placa lee tres voltajes, traduce cada voltaje en un número entero de 0 a 1024 (para valores entre 0V y 5v) y los suma. De ahí que el valor máximo sea 3072.

Este valor es recogido por el autómata y convertido al valor real del peso del depósito medido por medio de una linealización del resultado. La mayor ventaja de este sensor es que puede ser implementado en cualquier depósito que queramos medir y tendremos un valor fiable acerca de su peso, ya que su error relativo es siempre el mismo. Por tanto, hemos conseguido un sensor de pesaje flexible a un precio muy económico [26] [27] [28] y con un error que, aunque dependa del peso máximo permitido en el depósito a medir, siempre será aceptable y cumplirá los requisitos para poder ser incluido en la automatización [29].

En definitiva, hemos realizado la automatización del sistema de transportes de la fábrica de forma satisfactoria y económica, gracias al empleo de conocimientos y dispositivos de diversas áreas de la Ingeniería. Se adjunta una tabla con precios orientativos para la realización de la automatización:

Nombre	Precio
Autómata único con módulos suficientes para la realización de la automatización	800€
Pantalla HMI	400€
FPGA	80€
Arduino	25€

Tabla I: Lista de precios orientativos

Si bien es verdad que el uso de tantos dispositivos distintos podría presentar un coste mayor a priori [30], sin duda a largo plazo resultará más eficiente y económico, puesto que en el momento que se desee implementar un control más avanzado en la instalación o dotarle de mayor complejidad para abarcar más áreas dentro de la planta, no tendremos que invertir en más dispositivos o dispositivos mejores, pues con este diseño la mejora tecnológica de la instalación puede realizarse sin inconveniente alguno [31].

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. CONCLUSIONES

Se podría haber automatizado todo el proceso con una serie de autómatas conectados a la pantalla HMI. Sin embargo, se ha decidido incluir tal variedad de dispositivos para poder realizar mejoras en el proceso en un futuro. Nuestro artículo constituye, de esta forma, un nexo de unión entre varias áreas de Ingeniería Electrónica Industrial.

Se ha demostrado así, que a pesar de ser de artes distintos, pueden unirse entre sí para conseguir resultados tremadamente eficaces, tanto en términos de calidad, pues la automatización ha resultado ser bastante eficiente en su cometido, como en términos económicos, debido a que gracias a la inclusión de diferentes dispositivos, el autómata escogido no precisa de una gran capacidad, por lo que puede elegirse modelos más baratos.

Quizás el resultado más importante del artículo ha sido la creación de una zona dentro de la fábrica que no dispone de la necesidad de la acción humana más allá de la supervisión. Hemos conseguido, a través de la pantalla HMI, poder comunicarnos con la fábrica de manera que la maquinaria haga todo el trabajo, logrando una automatización completa.

### 4.2. FUTUROS TRABAJOS

Observando el desarrollo del artículo, las futuras labores a desempeñar pueden tomar dos vías distintas: mejora de la automatización, o automatización de otras partes de la fábrica. Dentro de la propia automatización, podría estudiarse si los protocolos de

comunicación empleados son los óptimos en estos tipos de automatización, o por el contrario, hay protocolos mejores o más avanzados. Incluso, podría estudiarse la posibilidad de comunicar los dispositivos de manera inalámbrica.

Con vistas al resto de la fábrica, podría continuarse la automatización de las instalaciones, avanzando en el proceso y evaluando si sería necesaria la instalación de más autómatas a lo largo del sistema. En una situación óptima, podría llegar a poder crearse una fábrica completamente automatizada en la que la acción del ser humano, como ya hemos conseguido en esta parte de la instalación, sea inexistente en una ausencia de fallos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Khodabandehloo, "Robotics in food manufacturing", en Advanced Intelligent Mechatronics '97. Final Program and Abstracts, IEEE/ASME International Conference on, (Page: 10), Conference Location: Tokyo, Japan, Year: 1997. DOI: 10.1109/AIM.1997.652868
- [2] T. Mäkinen, T. Varkoi and J. Soini, "Integration of Software Process Assessment and Modeling" en Management of Engineering and Technology, Portland International Center for (Page(s): 2476 – 2481), Conference Location: Portland, OR, Year: 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PICMET.2007.4349583>
- [3] X. Wang, Y. Zhao, Y. Liao, "Dynamic Performance Analysis of PID Controller with one Memristor" en Information Science and Technology (ICIST), International Conference on (Page(s): 1234 – 1237), Conference Location: Nanjing, Year: 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIST.2011.5765194>
- [4] M. Khalid and S. Omatu, "A neural network based control scheme with an adaptative neural model reference structure" en Neural Networks, IEEE International Joint Conference on (Volume: 3, Page(s): 2128 – 2133), Conference Location: Singapore, Year: 1991. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IJCNN.1991.170702>
- [5] G. H. Lee and S. Jung, "Control of Inverted Pendulum System Using a Neuro-Fuzzy Controller for Intelligent Control Education" en Mechatronics and Automation, 2008, ICMA 2008. IEEE International Conference on (Page(s): 965 – 970), Conference Location: Takamatsu, Year: 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMA.2008.4798889>
- [6] F. Gondino and M. Rebaudengo, "On Improving Automation by Integrating RFIP in the Traceability Management of the Agri-Food Sector" en Industrial Electronics, IEEE Transactions on (Volume: 56 , Issue: 7 Page(s): 2357 – 2365), Year: 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2019569>
- [7] P. Dao-gang, Z. Hao, Y. Li, L. Hui, "Design and Realization of Modbus Protocol Based on Embedded Linux System" en Embedded Software and Systems Symposia, ICESS Symposia '08. International Conference on (Page(s): 275 – 280), Conference Location: Sichuan, Year: 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICESS.Symposia.2008.32>
- [8] J. Huidobro. (2003). "La PLC, Alternativa Para El Acceso". DYNA, 78(4). 24-26
- [9] M. Gandiaga-Alberdi. (2002). "Automatización En Líneas De Proceso Continuo". DYNA, 77(3). 27-32
- [10] L. Jitang, L. Zhouhang, L. Jianfeng et al., "Air Flow Simulation in High-pressure Air Blower with Splitter Blade" en Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011 International Conference on (Page(s): 1969 – 1972), Conference Location: Wuhan, Year: 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICEICE.2011.5777012>
- [11] I. Garcia-Pacheco, E. Guzman-Ramirez, E. Guerrero-Ramirez, C. Pacheco-Agüero. (2015). Design Of FPGA-Based Experiments At Engineering Education To Control Direct Current Motors. DYNA, 90(4). 372-379. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7049>
- [12] X. Weikun, Z. Huibin and Z. Qiuli, "Testing FPGA Devices on a Automatic Test Equipment" en IEEE Journal of Applied Physics (Volume: 99 , Issue: 11, Page(s): 114302 – 114304), Conference Location: Singapore, Year: 2013.
- [13] M. Y. Niamat, K. M. Attravanam, M. Alam, "Testing FPGAs using JBits RTP cores", en Circuits and Systems, 2005. 48th Midwest Symposium on (Volume: 2, Page(s): 1131 – 1134), Conference Location: Covington, KY, Year: 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MWSCAS.2005.1594305>
- [14] E. Sanchez-Tapia, J. Melo-Uribe. (2010). "Low Cost Control For Haptic Devices". DYNA, 85(3). 237-244. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3018>
- [15] F. Mayer-Lindenberg, "High-level FPGA programming through Mapping Process Networks to FPGA Resources" en Reconfigurable Computing and FPGAs, 2009. ReConfig'09. International Conference on (Page(s): 302 – 307), Conference Location: Quintana Roo, Year: 2009. DOI: 10.1109/ReConfig.2009.73
- [16] Jian Gong, Tao Wang, Jiahua Chen et al, "An Efficient and Flexible Host-FPGA PCIe Communication Library" en Field Programmable Logic and Applications (FPL), 2014 24th International Conference on (Page(s): 1 – 6), Conference Location: Munich, Year: 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/FPL.2014.6927459>
- [17] R. Ab Rahim, A.N. Nordin, N. Abd Malik, B. Bais, B.Y. Majlis, en "Fabrication of monolithic Wheatstone bridge circuit for piezoresistive microcantilever sensor", Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2015 Symposium on, (Pages: 1 – 5), Conference Location: Montpellier, Year: 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DTIP.2015.7160998>
- [18] Y. A. Badamasi, "The Working Principle of an Arduino" en Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 2014 11th International Conference on (Page(s): 1 – 4), Conference Location: Abuja, Year: 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997578>
- [19] A. A. Galadima, "Arduino as a learning tool" en Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 2014 11th International Conference on (Page(s): 1 – 4), Conference Location: Abuja, Year: 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997577>
- [20] B. Dorninger, W. Beer, M. Moser, R. Zailinger and A. Kern, "Automated Reengineering of Industrial HMI Screens by Static Analysis" en Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 2014 IEEE (Page(s): 1 – 4), Conference Location: Barcelona, Year: 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ETFA.2014.7005269>
- [21] P. Falkman, E. Helander and M. Andersson, "Automatic Generation: A way of ensuring PLC and HMI standards" en Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2011 IEEE 16th Conference on (Page(s): 1 – 4), Conference Location: Toulouse, Year: 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ETFA.2011.6059201>
- [22] J. Cancelas-Caso, F. Mateos-Martín, (2001). "Aplicaciones De La Informática En La Industria". DYNA, 76(4). 29-36
- [23] P. Dao-gang, Z. Hao, Y. Li, L. Hui, "Design and Realization of Modbus Protocol Based on Embedded Linux System" en Embedded Software and Systems Symposia, 2008. ICESS Symposia '08. International Conference on (Page(s): 275 – 280), Conference Location: Sichuan, Year: 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICESS.Symposia.2008.32>
- [24] E. Mandado, J.M. Acevedo, C. Fernández, J.I. Armesto, S. Pérez, "Autómatas programables. Entorno y aplicaciones", Universidad de Vigo (Page: 464-465), Editorial: Ediciones Paraninfo, S.A. Year: 2005
- [25] E. Mandado, J.M. Acevedo y S. Pérez, "Controladores lógicos y autómatas programables" (Page: 112-282), Editorial: Boixareu Editores, Year: 1992
- [26] J. Amador, "Electrónica Industrial", (Page: 261-268), Ed. EUITI, Universidad Politécnica de Madrid, Year: 2004
- [27] Castro-Gil, M., García-Villa, P., Martín-Gutierrez, S. (2015). "ANDROID APP FOR WIRELESS SYSTEM CALCULATION OF HYDRIC FLOW IN OPEN FOIL WITH WINDLASS HYDROMETER". DYNA New Technologies, 1(1). DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7340>
- [28] Suarez-Marcelo, J., Fernandez-Muñoz, J., Moreno-Rabel, M.. (2015). A SUPERVISED EMERGENCY STOP ELECTRONIC DEVICE FOR INDUSTRIAL MACHINERY. DYNA, 90(5). 556-562. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7481>
- [29] J.M. Angulo, I. Angulo, "Microcontroladores PIC. Diseño práctico y aplicaciones" (Page: 1-4), Editorial: McGraw Hill, Year: 1997.
- [30] Rodriguez-Mendez, M., Carcel-Carrasco, F.. (2014). COST OF THE CHANGE PROCESS OF TOOLS. DYNA, 89(5). 504-509. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7139>
- [31] Otero-Mateo, M., Pastor-Fernandez, A., Portela-Nuñez, J.. (2015). CREATION OF VALUE THROUGH THE PROJECT DIRECTION AND MANAGEMENT. DYNA, 90(1). 18. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7182>.

## AGRADECIMIENTOS

A OPEGASA S.L., pues ayudó a financiar los dispositivos empleados en las simulaciones e implementaciones de la automatización. El trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, proyecto DPI 2014-53525-C3-1-R, Navegación Asistida Mediante Lenguaje Natural.