

## **AUTOMATIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DE BOLÍGRAFOS: EL CASO DEL ESTAMPADO**

### **AUTOMATION IN THE PEN INDUSTRY: THE CASE OF PRINTS**

**Luis E. Galindo C.<sup>1</sup>**

**Alfonso A. Aguilera R.<sup>2</sup>**

**Luis A. Rojas C.<sup>3</sup>**

Fecha de envío: Febrero de 2011  
Fecha de recepción: Marzo de 2011  
Fecha de aceptación: Abril de 2011

#### **Resumen:**

Entre muchos objetivos de la automatización, se cuenta la búsqueda de correctos desempeños en los procesos industriales. El sector industrial no es la excepción, allí es importante implementar sensores de alta calidad y calibración para disminuir los tiempos de las paradas falsas de la maquinaria. En este artículo se describe el modelamiento e implementación de un controlador PID para la automatización de la estación de estampado en una máquina ensambladora de bolígrafos, por medio de un PLC SIEMENS® referencia CPU226 y una HMI (interfaz humano máquina) SIEMENS® TP177; se adiciona el control de la temperatura utilizando un módulo de termocuplas en el PLC.

#### **Palabras clave:**

Interface Humano maquina (HMI), Controlador lógico Programable (PLC), Gráfico Funcional de Control de Etapas y Transiciones (GRAFCET), Diagrama de contactos (LADDER).

#### **Abstract:**

Among the many objectives of automation, there is the search for correct performance

in industrial processes. The industrial sector is no exception since it is important to implement high-quality sensors and calibration to reduce the number of unnecessary machinery halts. From this perspective, this article describes the modeling and implementation of a PID controller for the automation of the print station of a pens-assembly machine, using a CPU226 SIEMENS ® PLC and a TP177 SIEMENS ® HMI (human machine interface). Temperature control is added

1 Tecnólogo en Electrónica, Universidad Distrital. Correo: enriqueud@hotmail.com

2 Tecnólogo en Electrónica, Universidad Distrital. Correo: alfonsoaguilera30@gmail.com

3 Ingeniero Electricista y Magister en Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Colombia. Docente de planta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo: larojasc@udistrital.edu.co

using a thermocouple module together with the PLC.

### Key Words:

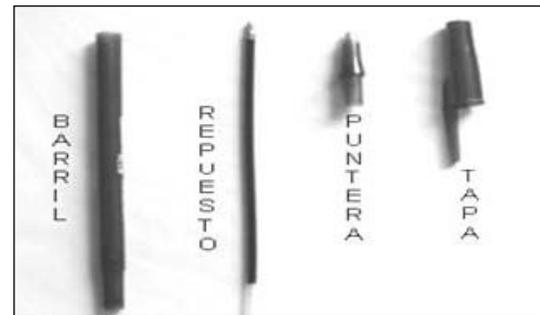
Human Machine Interface (HMI), Programmable Logic Controller (PLC), Transitions and Stage Control Functional Graph (GRAF-CET), contacts diagram (LADDER).

## 1. Introducción

Dentro de los procesos industriales dedicados al mercado de bolígrafos, algunas multinacionales han requerido la automatización de sus líneas de producto más importantes. En este caso se determinó el modelo matemático y se implementó la automatización de una máquina ensambladora de bolígrafos con el diseño de un controlador PID para control de temperatura de la estación de estampado, instalación de sensores y diseño del programa de funcionamiento de la pantalla HMI y el PLC, lo cual mejoró el ambiente gráfico y físico eléctrico de la máquina, lo que produjo un aumento de la producción de bolígrafos y disminuyó la pérdida de materia prima y los tiempos de parada. Las máquinas existentes en el mercado no presentan ningún tipo de estadística, y resulta necesario un control de temperatura externo; por otro lado, en dichas multinacionales no poseen planos de ninguna de sus máquinas motivo por el cual las paradas por fallas eléctricas son muy frecuentes. Adicionalmente, para operar la máquina es necesario tener clara cada una de las piezas que conforman el bolígrafo, como podemos observar en la Figura 1. Estas piezas se almacenan en tolvas alimentadas manualmente.

Posterior a ello tenemos que la máquina está dividida en estaciones: 1. estación de barril: estación posterior a la alimentación en la tolva que vibra constantemente con el fin de lle-

**Figura 1. Piezas del bolígrafo.**



var el barril a la bajante. Dentro de ella los bolígrafos se organizan uno tras otro, el nivel de la bajante se mantiene por medio de un motor intermitente, es decir, que se activa o desactiva manteniendo el nivel adecuado para el buen funcionamiento del mismo; esta zona tiene además un sensor, el cual es un cilindro accionado por un final de carrera que detecta si el barril viene al revés o viene con defecto de inyección; 2. estación de repuesto: en esta estación se procede a suministrar el repuesto (o mina) en su respectiva posición; en este caso solamente posee un sensor de barrera que en el momento adecuado debe detectar la presencia del repuesto; 3. estación de puntera: en esta estación se coloca la puntera por medio de un eje mecánico ciclo tras ciclo. En esta se hallan dos sensores, uno de los cuales es de fibra óptica y detecta el nivel de puntera en la bajante; el otro es de barrera y detecta si la puntera se colocó de manera adecuada; 4. estación de estampado: donde se estampa la marca del bolígrafo por medio de una cinta caliente. En esta parte se implementó el controlador PID especificado más adelante. Adicionalmente, acá se encuentra un sensor inductivo que determina que el ensamblado del bolígrafo sea el correcto; 5. estación de tapado: en esta parte las tapas se introducen en una tolva que vibra constantemente mientras ellas van cayendo una tras otra a unos rodillos que las mantienen organizadas. Aquí, hay

un sensor para mantener un nivel intermedio en los rodillos.

Para el desarrollo se implementó un controlador lógico programable (PLC) Siemens de referencia S7200 y una pantalla touch screen de la misma marca de referencia TP177 micro, los cuales fueron programados con Step 7 y WINCC flexible micro, respectivamente, realizando la comunicación entre ellos de tal manera que se lograra una interfaz adecuada con el usuario. Durante la ejecución de este proyecto se implementó un controlador PID con el fin de manejar la temperatura de la estación de estampado. Cabe resaltar la importancia de dicho controlador, pues con él se cumplió el objetivo principal. La aplicación se realizó tomando los datos teóricos del comportamiento de la estación de estampado y observando su funcionamiento para, con base en ellos, encontrar las constantes adecuadas y así introducirlas en el asistente de PID. Por otro lado, el programa del PLC se desarrolló por medio de Grafcet pasándolo luego a Ladder por medio de reglas generales. En primer lugar, se dará una breve explicación del hardware y software que se utilizó y, posteriormente, del controlador y de cada una de las herramientas que complementaron dicha modificación.

## 2. Materiales

Los sensores empleados son de tres tipos: inductivo, de fibra óptica y de barrera, con un voltaje de alimentación para todos de 24 VDC, con el fin de que su salida sea de fácil adaptación al PLC. El sensor inductivo telemecánico, de referencia XS612B1PAM12, permite la detección de cualquier metal. Los sensores telemecánicos de fibra óptica, de referencia XUDA2PSML2, fueron instalados para la detección de bajo nivel de boquilla,

nivel alto de barril y nivel bajo de barril. Los sensores de barrera –de tipo fotoeléctrico de horquilla telemecánica, de referencia XUV-H0312– fueron empleados en las estaciones de repuesto, de boquilla y contador de unidades para realizar la estadística de producción de la máquina [1].

### 2.1. Equipos

Las características del PLC Siemens CPU 226 son: puerto PPI adicional, que proporciona más flexibilidad; 40 entradas/salidas a bordo; expansión máxima con siete módulos de ampliación [2]. Adicionalmente, se instaló un módulo de expansión de termocuplas, referencia EM231, para obtener el dato físico de la temperatura en la estación de estampado y su posterior procesamiento [3]. En cuanto a la pantalla, HMI TP177micro, Siemens 6AV6650-0DA01-0AA0 touch screen, la cual se implementó por ser sus herramientas las más adecuadas (Figura 2).

### 2.2. Software

El Simatic WINCC flexible micro, Windows control center, es un programa que se utiliza para crear el ambiente gráfico de las inter-

**Figura 2. Pantalla touch screen Siemens.**

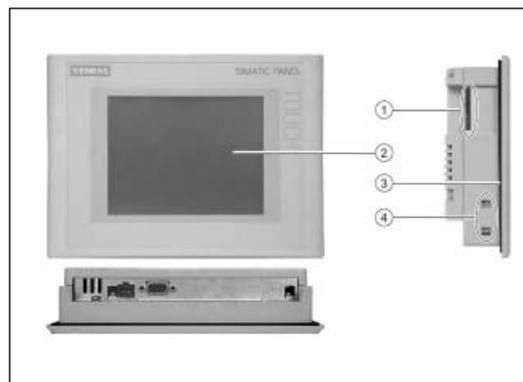


Figura 3. software Step 7



faces humano máquina (HMI) de Siemens; dependiendo de la versión, permite a los operarios interactuar con la aplicación directamente en la máquina o desde un centro de control. En la Figura 3 se observa el esquema general de la pantalla. El Micro Win Step7® es un software para programar PLC de la gama S7-200 y, al igual que la mayoría de programas, posee tres ventanas principales (Figura 4): barra de navegación, árbol de operaciones y editor de programa.

Figura 4. Ventanas Step 7.

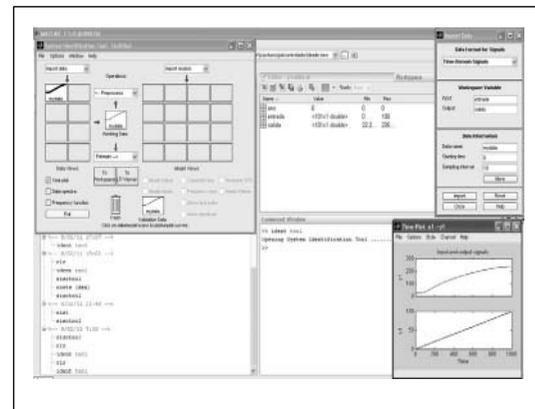


### 3. Diseño de controlador PID estampado

Para el diseño del controlador se realizó primero una toma de muestras teóricas generando una señal PWM al sistema y observando su comportamiento.

Se estableció un tiempo de ciclo de 10 segundos, lo cual se introdujo como tiempo de ciclo de PWM en el PLC, con ello se tomaron muestras de la temperatura y se determinaron los vectores de entrada-salida necesarios para hallar la función de transferencia [4] y se los introdujo en Ident Tool de Matlab®, como se muestra en la Figura 5:

Figura 5. Ident Tool.

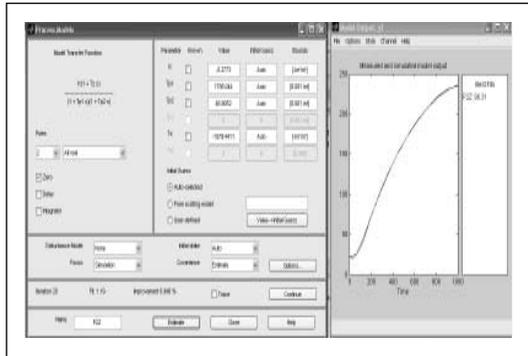


Luego, por medio de Process Models®, se simuló un modelo para los datos de entrada, y los de salida se obtuvieron con un cero y dos polos con una aproximación de 98,31% de concordancia con la función de entrada [5], como se observa en la Figura 6:

De acuerdo con la buena aproximación al comportamiento de la planta, con las variables obtenidas se procedió al cálculo de la función de transferencia, cuya simulación fue:

$$\frac{k(1 + T_z s)}{(1 + T_{p1} s)(1 + T_{p2} s)} \quad (1)$$

**Figura 6. Obtención de la función de transferencia de la planta utilizando Process Models® de MatLab®.**



Donde:

$$\begin{aligned} T_z &= -1579.4411 & T_{p_2} &= 46.8052 \\ T_{p_1} &= 1795.044 & k &= -5.2773 \end{aligned} \quad (2)$$

Obtenemos la función de transferencia de los datos anteriores:

$$\frac{-5.2773(1 + (-1579.4411)s)}{(1 + (1795.044)s)(1 + (46.8052)s)} \quad (3)$$

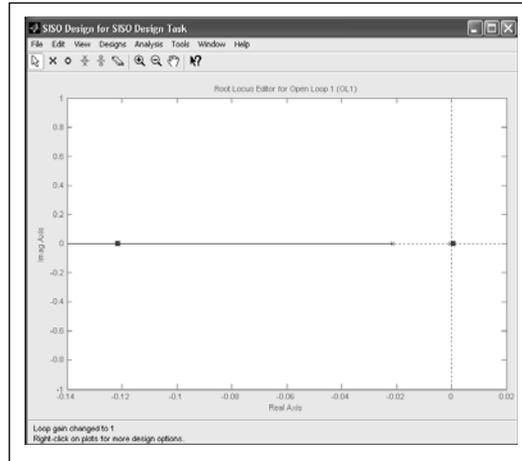
$$\frac{8335.1845s - 5.2773}{1 + 46.8052s + 1795.044s + 84017.3934s^2} \quad (4)$$

$$\frac{8335.1845s - 5.2773}{84017.3934s^2 + 1841.849s + 1} \quad (5)$$

La función de transferencia obtenida por medio de Ident Tool es la que se observa en (5) y, como se mencionó anteriormente, posee una aproximación del 98,31% a los datos obtenidos de la planta.

Ahora realizamos el análisis por el método del lugar de las raíces [6] para la obtención del comportamiento del controlador, de tal manera que se identifiquen las variables y se las introduzca en el controlador PID. Usamos Sisotool® de MatLab® para hallar la ubica-

**Figura 7. Lugar de las raíces.**



ción de los polos en la función, y obtenemos el lugar de las raíces (Figura 7) importando la función sist y observando la ubicación de los polos:

El siguiente paso para el cálculo de las constantes se realizó en la pestaña Automated Tuning, opción PID con filtro derivativo, de donde obtenemos la función del controlador [7], con una ganancia para el controlador de 2,2673 y dos ceros de 0,039 y -0,000929; agregamos las restricciones de diseño con un sobreimpulso de 5%.

Finalmente, del controlador obtenido hallamos matemáticamente las variables y obtenemos que la función del controlador es:

$$\frac{2.2673(1 + 0.039s)(1 - 0.000929s)}{s} \quad (6)$$

De donde se realiza el siguiente despeje para obtener las constantes:

$$k = 2.2673 \quad a = 0.039 \quad b = -0.000929 \quad (7)$$

Tenemos que:

$$k \frac{(1 + as)(1 - bs)}{s} \quad (8)$$

Solucionamos el polinomio (8) y luego separamos la ecuación para obtener los términos del control PID (4).

$$k \frac{abs^2 + s(a - b) + 1}{s} \quad (9)$$

$$kabs + k(a - b) + \frac{k}{s} \quad (10)$$

Donde el primero es la parte derivativa del controlador; la segunda es la ganancia y la tercera es el integrador; reemplazamos los valores y obtenemos la función observada en (11):

$$0.000082146s + 0.0380 + \frac{2.26}{s} \quad (11)$$

Donde los valores de las constantes obtenidas son:

$$K_p = 0,0380 \quad K_i = 2,26 \quad K_d = 0,000082 \quad (12)$$

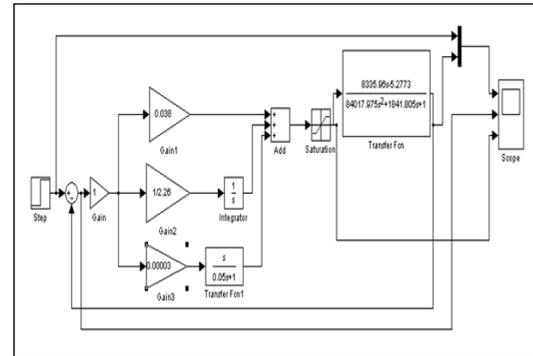
Dichos valores fueron probados por medio del Simulink® de MatLab®. Hay que anotar que el valor de la ganancia requirió ajuste, puesto que este valor tan pequeño puede hacer muy oscilatoria la respuesta [8], y se empleó el modelo por medio de ganancias con un filtro en la ganancia derivativa, para eliminar el ruido que pueda generar, como se ve en la Figura 8:

Como la respuesta al modelo posee demasiado amortiguamiento, se ajustó la constante proporcional a 3 y se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 9:

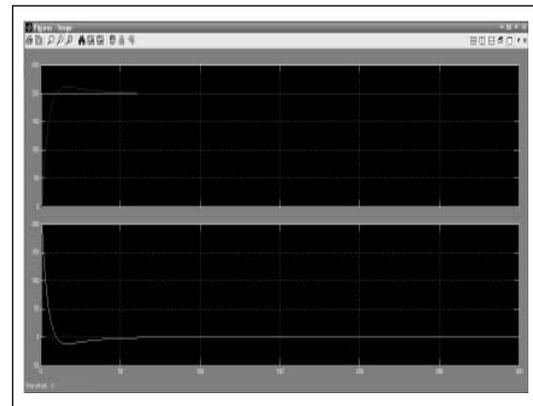
Donde el sobreimpulso es menor a 5% para 200. Como se puede observar, el sobreimpulso es de alrededor 8, por lo que dicha función es adecuada para nuestro proceso. Entonces las variables utilizadas son:

$$K_p = 3; K_i = 2,26; K_d = 0,000082 \quad (13)$$

**Figura 8. Montaje Simulink con filtro adicional para eliminación de ruido.**



**Figura 9. Respuesta ante una constante proporcional de valor 3.**



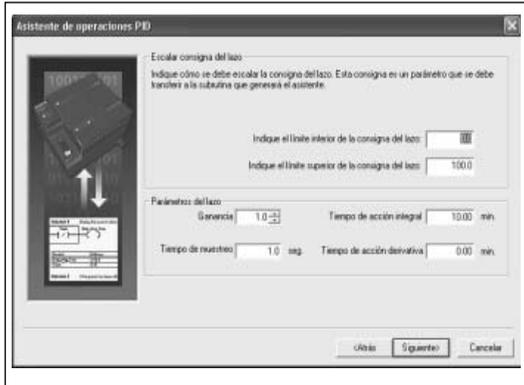
Posterior a ello, obtenidas las constantes, se utilizó el asistente de configuración PID de Siemens para implementarlo en el Step 7-MicroWin (Figura 10):

Dicho asistente contiene más ventanas, pero estas son las utilizadas en la implementación del controlador para obtener una respuesta lógica [9].

## 5. Estadística

La pantalla de estadística permite observar la producción de la máquina en los turnos ante-

**Figura 10. Asistente de operaciones PID.**

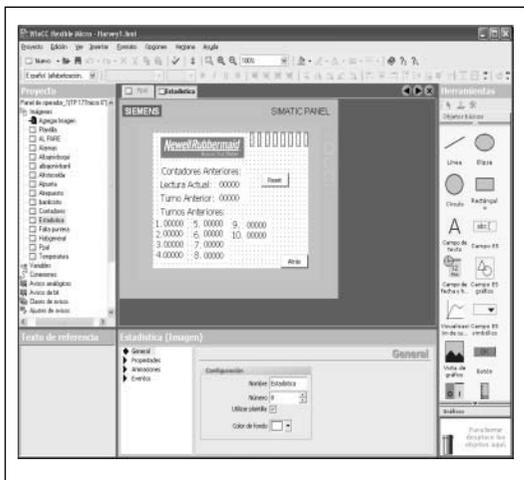


riores y, por tanto, la productividad. Para realizarlo se empleó un sensor de barrera que determina la presencia o no del bolígrafo y así llevar un conteo de las unidades terminadas en la pantalla, a la cual se accede por medio de clave, con el fin de evitar que cualquier persona acceda a los datos de producción (Figura 11).

## 6. Programa PLC

Para realizar la programación del PLC se utilizó el programa Microwin Step 7 progra-

**Figura 11. Pantalla de estadística.**



mándolo por medio del lenguaje listado de instrucciones (Ladder); dichas instrucciones fueron obtenidas por medio de mapas de funciones secuenciales (Grafcet) y posteriormente se tradujeron a Ladder [10].

### 6.1. Grafcet o mapa de funciones secuenciales (SFC)

El Grafcet o mapa de funciones secuenciales (SFC) es un modelo aprobado por la Internacional Electrotechnical Commission [11], donde se especifica un lenguaje estándar o esquema de contactos:

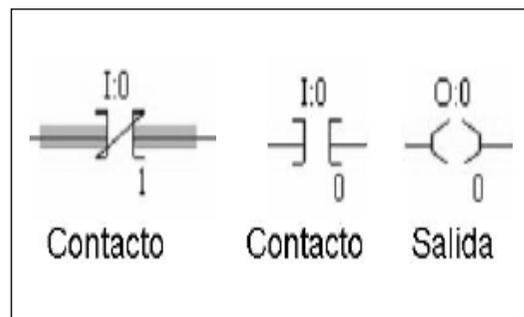
### 6.2 Esquema de contactos o Ladder (LD)

Dicho esquema es un lenguaje gráfico que viene derivado del la lógica de relés; por medio de símbolos en la Figura 12 la cual está representada por contactos solenoides etc. Posee la ventaja de que se encuentra normalizada según las normas National Electrical Manufacturers Association (NEMA) y dicha norma la emplean todos los fabricantes.

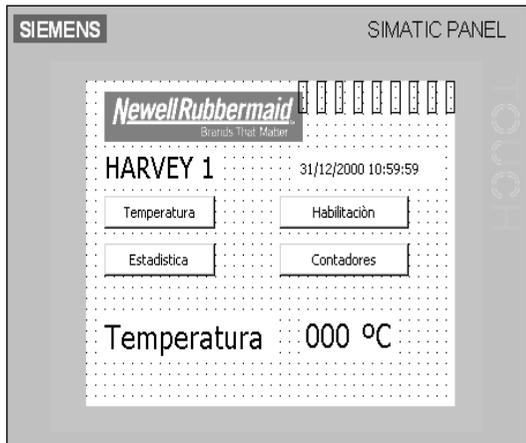
## 7. Programa pantalla

El diseño de la pantalla principal es el que se muestra en la Figura 13. Como se mencionó anteriormente, el programa que se utilizó es el WinCC Flexible Micro.

**Figura 12. Lógica de contactos Ladder.**



**Figura 13. Pantalla principal HMI.**



Consideramos importante mencionar que las variables deben ser creadas antes de su utilización. Como sabemos, algunos software

requieren primero la creación de variables antes de su utilización, mientras que en otros estas simplemente ya se encuentran creadas dentro de una memoria.

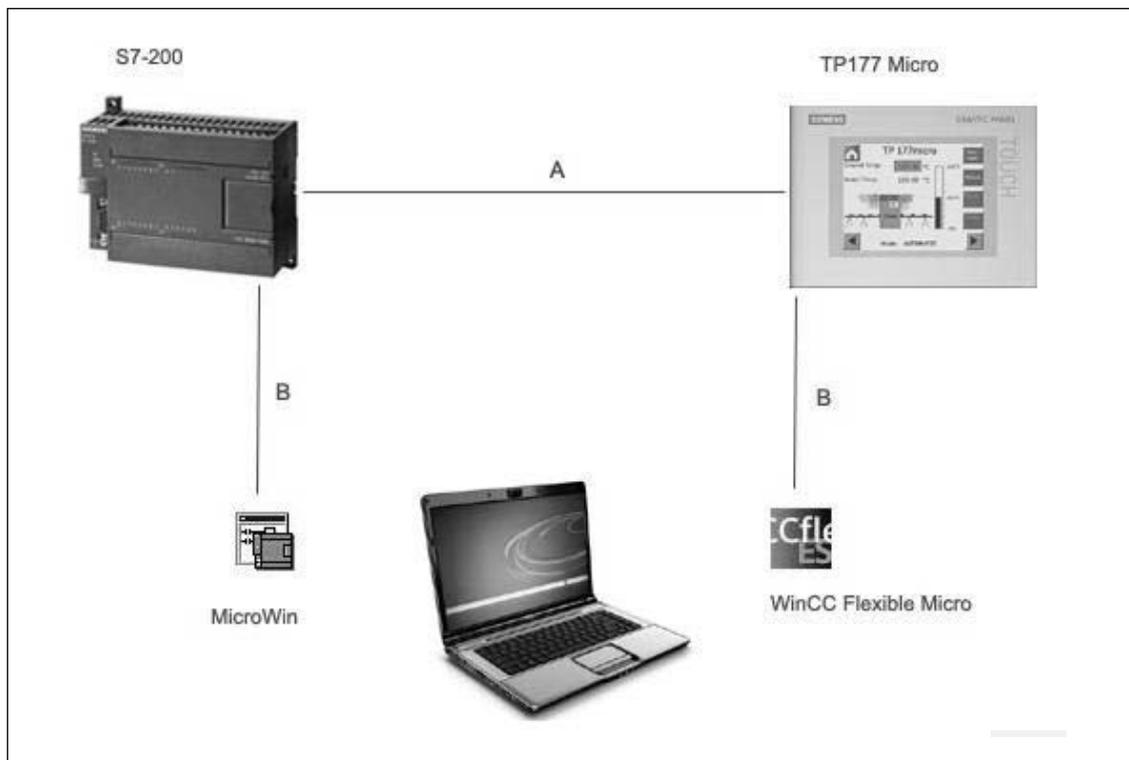
## 8. Comunicación PLC-Pantalla

Las herramientas necesarias para realizar dicha comunicación son:

- PLC S7-200 CPU226.
- Pantalla TP177 Micro.
- WinCC Flexible Micro.
- Microwin Step 7.

Mostradas en la Figura 14.

**Figura 14. Comunicación PLC-pantalla.**



## 9. Resultados alcanzados

### 9.1. Pérdida de material

Como primera medida, y la más importante, la instalación del controlador permitió cumplir con el objetivo principal, que era disminuir la pérdida de material por mal estampado. Dicho control muestra que cada vez que la máquina se detiene por cierta cantidad de tiempo, al arrancarla de nuevo no presenta ninguna pérdida. Los datos obtenidos de las pérdidas de material se muestran en la Tabla 1 y fueron obtenidos en el departamento de calidad de Newell Rubbermaid a partir de la producción diaria promedio de la máquina en un mes.

**Tabla 1. Producción del mes.**

Pérdida total turno 1	240 unidades
Pérdida total turno 2	220 unidades
Pérdida total turno 3	100 unidades
Pérdida total	560 unidades

El estándar de la máquina es de 32.000 unidades por turno, 4.000 por hora, 96.000 diarios, 5 kilos de material representan en el promedio del mes de abril 560 unidades, y nuestro objetivo inicial era disminuir tal pérdida en 15%.

Finalmente, la pérdida por mal estampado de la máquina, obtenida el mes de diciembre, es la que se muestra en la Tabla 2:

**Tabla 2. Producción de diciembre.**

Pérdida total turno 1	134 unidades
Pérdida total turno 2	127 unidades
Pérdida total turno 3	97 unidades
Pérdida total	358 unidades

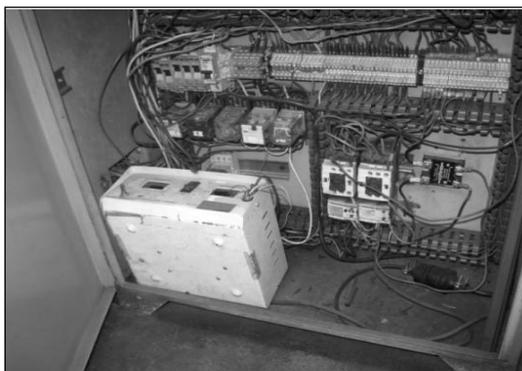
Esto muestra una disminución de 36.071% en la pérdida de material, como se muestra a continuación:

### 9.2. Tiempos de parada

Otro de los problemas que logramos mejorar en la máquina es que dichas máquinas tienen el problema que fueron traídas desde hace varios años y sin ningún tipo de información (planos, programas, etc.), como se observa en las figuras 15 y 16.

Por tal motivo, cuando se presentaban fallas eléctricas, se complicaba su revisión y esto generaba paradas por largos períodos

**Figura 15. Tablero principal.**



**Figura 16. Máquina de control.**



de tiempo; en consecuencia, se marcó el cableado que se utilizó en el montaje y se realizaron los planos eléctricos.

## 10. Conclusiones

La pirámide de automatización en todos sus niveles lleva a un correcto desempeño de los procesos industriales. Con esto en mente, se trazó el objetivo fundamental de lograr una reducción en el desperdicio generado por la máquina. Además de cumplir con él, se obtuvo un porcentaje de 30%, que es mayor al esperado, gracias a la implementación adecuada de sensores y al diseño del controlador PID.

Se observó que existen diversos modelos para identificar satisfactoriamente cualquier sistema, pero depende de la experimentación que posea el diseñador para optimizar el tiempo de búsqueda del modelo más adecuado para cada planta, encontrando que el modelo más adecuado para este tipo de plantas es de segundo orden, con un porcentaje óptimo para el diseño entre el 98% y 99%.

Como herramienta de gran utilidad para el diseño de sistemas de control, Matlab® permitió llevar a cabo un control adecuado para la planta, permitiendo evaluar rápidamente la respuesta de los modelos planteados, con resultados exactos, y facilitando su análisis. Es importante resaltar que se necesita obtener los datos teóricos más precisos posibles de la planta y así usar adecuadamente dichas herramientas.

Los sensores son elementos básicos que en la actualidad permiten la automatización de maquinaria industrial, por tal motivo estos carecen de fallas por efectos de perturba-

ciones mecánicas externas. En este proyecto, la utilización de sensores de alta calidad permitió facilitar la calibración de cada una de las estaciones con gran precisión en los tiempos. Además, se concluyó que cuando se realice cualquier automatización de maquinaria que requiera de sensores es preciso realizar su instalación en una ubicación óptima, para evitar conflictos de programa y paradas falsas de la máquina.

Para realizar un controlador adecuado en una planta se debe tener claridad acerca de los fenómenos que suceden a su alrededor, para así parametrizarlos de manera adecuada y evitar divagaciones en el control implementado; encontramos que dicha planta modelada presentaba una dinámica lenta y así observamos con facilidad los fenómenos existentes modelándolos de una manera adecuada.

## Reconocimientos

Se reconoce la disposición de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas a la investigación y desarrollo de soluciones en el sector productivo; y a la empresa Newell Rubbermaid por apoyar esta investigación, permitiendo implementar, desarrollar y poner en marcha la automatización propuesta.

## Referencias

- [1] R. Pallás-Areny y J. G. Webster. *Sensors and signal conditioning*. Oxford: Wiley-Blackwell, 2008.
- [2] Enrique Mandado Perez, Jorge Marcos Acevedo, Celso Fernandez Silva. *PLC and Automation Systems*. Marcombo, 2009.

- [3] Simatic Operator Panel User Manual tp177 micro Siemens, 2010.
- [4] R. Cherrez. *Diseño e implementación de un sistema de control Siemens*. Escuela Politecnica Nacional, Ecuador, 2009.
- [5] Ogata Katsuhiko. *Modern control Engineering*. 5 ed. Boston: Prentice Hall, 2009.
- [6] V. Méndez Arias. *Ecuaciones para la sintonización de controladores PID utilizando funciones de costo del tipo ITE*. San José: 2006.
- [7] A. Creus Solé. *Instrumentación industrial*. México: Alfaomega, Marcombo, 1997.
- [8] D.C. Hanselman y B. Littlefield. *Mastering Matlab: a comprehensive tutorial and reference*. Nueva Jersey: Prentice-Hall, 2001.
- [9] K. Ogata. *Control engineering problems using Matlab*. Madrid: Prentice-Hall, 2000.
- [10] B. C. Kuo. *Automatic control systems*. México: Continental Hoboken, 2010.
- [11] Internacional Electrotechnical Commission. Norma IEC, pp. 1131-1133.