

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA REPOTENCIACIÓN DE UNA MÁQUINA INYECTORA DE PLÁSTICO MARCA BJC EN LA EMPRESA ISISTEM

**Fernando Jácome**

**Harold Villacís**

Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”

Sangolquí, Ecuador

[fernandojacomer@gmail.com](mailto:fernandojacomer@gmail.com)

[haroldavidvj@hotmail.com](mailto:haroldavidvj@hotmail.com)

## RESUMEN

El presente proyecto trata sobre la automatización y repotenciación de una máquina inyectora de plástico de 60 gramos de capacidad que se encontraba fuera de servicio. Esta máquina basa su funcionamiento en un sistema hidráulico. Como elementos principales para la automatización se utilizó un PLC SIEMENS S7-1200 con un panel táctil SIMATIC KTP600 SIEMENS. Se implementará un modo de funcionamiento manual y automático para la operación de la inyectora. Además, se diseñará y construirá un sistema de enfriamiento para el fluido hidráulico y para los moldes.

## ABSTRACT

This project is about automating and repowering a plastic injection molding machine out of service, which has an injection capacity of 60 grams. This machine operation is based on a hydraulic system. The main elements for automation were a PLC SIEMENS S7-1200 and a SIMATIC KTP600 SIEMENS touch panel. Modes of operation manual and automatic operation will be implemented. In addition, a cooling system for hydraulic fluid and molds will be designed and constructed.

**Palabras Clave:** Automatización, Repotenciación, Inyectora de Plástico, Sistema Hidráulico, Panel Táctil.

## 1. INTRODUCCIÓN

En lo referente a la modernización en la industria, el costo de producción y la competitividad en el mercado actual han obligado a las industrias a tener que escoger entre dos opciones: remplazar la maquinaria antigua por una de última generación, o automatizar y modernizar los equipos antiguos. La primera opción representa una gran inversión y el desecho de la máquina antigua; para la segunda opción se requiere personal capacitado para llevar a cabo tal proceso. Por tal motivo, se debe incurrir en un análisis de tipo costo-beneficio para determinar qué opción es la más adecuada.

En el país, para abaratar costos y ya que actualmente no existe desarrollo de maquinaria, se ve la necesidad de invertir en la modernización de maquinaria y mantenimientos constantes de las mismas. Una de las aplicaciones de la Ingeniería Mecatrónica es la modernización y automatización de procesos y maquinaria de cualquier tipo de

industria, optimizar su funcionamiento y mejorar su producción.

Se propone como proyecto realizar la modernización y repotenciación de una máquina que se encuentra fuera de servicio por alrededor de 3 años, la cual se encontraba dada de baja por daños en sus sistemas, tanto mecánicos como eléctricos y de control, los cuales deben ser evaluados, corregidos o sustituidos para que la inyectora pueda volver a producir y a trabajar de una manera adecuada. La máquina mencionada es una inyectora de plástico horizontal que basa su funcionamiento en accionamientos hidráulicos, marca BJC, de aproximadamente 60 gramos de capacidad de inyección, motor de 15 HP marca Siemens. La inyectora trabaja con un voltaje 220 VAC para la parte de potencia, y con un voltaje 24VDC para la parte de control y señales de fines de carrera.

## 2. RECONOCIMIENTO DE LA MÁQUINA

Se realizó un Diagrama Modular del proceso de inyección de plástico (ver Figura 1), el cual permitirá desglosarlo por funciones, para luego determinar el estado de la máquina e identificar los problemas referentes a cada módulo de una manera ordenada, y que entregará una mejor visión de las acciones que se deben efectuar. Es así, que se tienen en orden los siguientes módulos: 1) Alimentación del material, 2) Encendido de la máquina, 3) Configuración y control de parámetros de funcionamiento, 4) Plastificación de la materia prima, 5) Inyección del material.

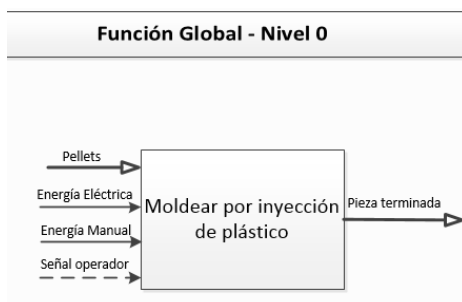


Figura 1. Función global del sistema

Una vez hecho el diagrama modular, se efectuó el reconocimiento de la máquina y se pudo observar que una vez energizada, el PLC se prendía; sin embargo, la inyectora no realizaba ninguna función.



Figura 2. Estado inicial de la máquina

Con respecto al sistema mecánico, los mecanismos estaban trabados, existían fugas de líquido hidráulico, y los actuadores como cilindros y motores no realizaban ningún movimiento. En cuanto al sistema eléctrico, se observó que el conexionado ha sido cambiado y adecuado a las necesidades que se presentaban, por lo que carecía de etiquetas y de una norma técnica en su implementación. El sistema de calentamiento del cañón utilizado para la fusión del plástico estaba en mal estado, y el sistema de enfriamiento adaptado no era el apropiado para el proceso de inyección. En lo concerniente al sistema de control, consistía en un PLC antiguo y controladores de temperatura con

salida a relé, los mismos que encendieron pero no realizaron ninguna operación. En la Figura 2 se aprecia el estado inicial de la máquina.

## 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA AUTOMÁTICO PARA REPOTENCIAR LA MÁQUINA

Ante la necesidad de realizar la automatización para la repotenciación de la máquina de inyección, es fundamental el establecimiento de los requerimientos del cliente que se deben satisfacer con el diseño a realizar (ver Tabla 1).

Tabla 1. Requerimientos del cliente

Nº	Requerimientos del cliente
1	Seguridad para el operario
2	Fácil manejo
3	Sistema automático (ciclo continuo) y manual
4	Sistema de control de temperatura adecuado para el proceso
5	Sistema robusto y eficiente
6	Menor costo posible

Es así, que en referencia al diagrama modular funcional y a los requerimientos del cliente, se planteará las diferentes alternativas de solución para cada módulo, las cuales serán sometidas a ciertos criterios de ponderación para poder determinar la mejor opción a ser desarrollada.

### a) Sistema Mecánico

#### Solución a problemas mecánicos

Se dio solución a los problemas mecánicos que presentaba la máquina, para lo cual se realizaron las siguientes acciones:

- Enderezado y refrentado del tornillo recíprocante.
- Refrentado y cambio de retenedores del pistón de inyección.
- Reparación de las válvulas de alivio mediante la fabricación de nuevos resortes.
- Filtrado del fluido hidráulico.
- Mantenimiento general del sistema hidráulico.

Fue necesario también la identificación del circuito hidráulico de la máquina para posteriormente realizar la programación de la secuencia del proceso de inyección.

### Sistema de Enfriamiento

El diseño de este sistema, comprende el enfriamiento tanto para la máquina como para los moldes y también la entrada de material desde la tolva hasta el cañón.

El circuito que se implementará se muestra en la Figura 3. El circuito empieza en el reservorio de agua, y para hacer circular el agua de enfriamiento se utilizará la bomba suministrada por el dueño de la máquina. A continuación, se colocará una válvula tipo bola para cerrar o abrir el paso del líquido hacia el sistema. Esto permitirá realizar mantenimientos, o detener la circulación del fluido si existe algún problema.

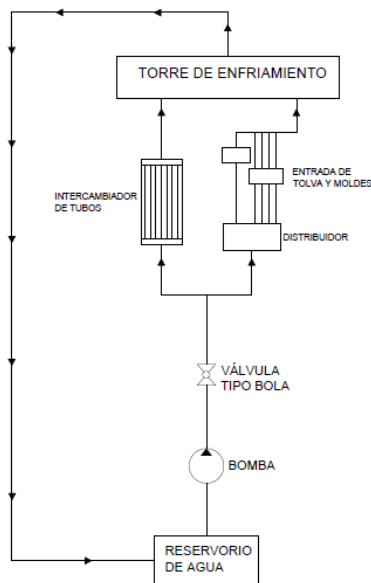


Figura 3. Circuito de enfriamiento

Se realizó el análisis de rendimiento del intercambiador existente para comprobar si es aplicable para el proceso. Para esto, se utilizó el Método de Kern. El intercambiador a analizar es de tubo y carcasa 1-1, en el cual el fluido frío pasa a través de los tubos y el fluido caliente a través de la carcasa. Este método se resume en la Figura 4.

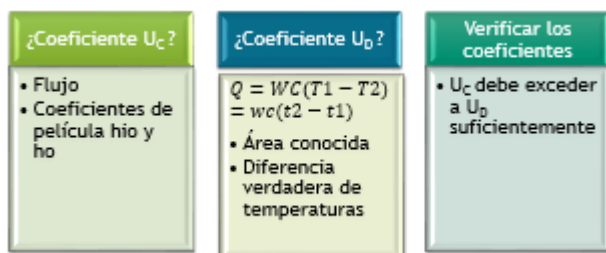


Figura 4. Método Kern

Los coeficientes de transferencia de calor obtenidos con este método fueron:

$$U_c = 844.46 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

$$U_D = 683.251 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

Con lo que se concluye que el intercambiador es aplicable en el proceso de inyección.

En cuanto al enfriamiento de moldes, se realizó un balance de calor para determinar si era suficiente el caudal de agua y conocer la temperatura de salida del agua de los moldes.

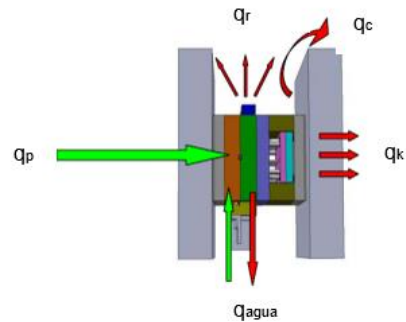


Figura 5. Balance de calor en moldes

En la Figura 5 se observa el balance de calor en moldes, en donde:  $q_p$  es el flujo de calor del polímero fundido,  $q_{\text{agua}}$  es el flujo de calor que el agua extrae del molde,  $q_k$  es el flujo de calor correspondiente a la conducción,  $q_c$  es el flujo de calor correspondiente a la convección,  $q_r$  es el flujo de calor correspondiente a la radiación.

Con este balance se comprobó que la temperatura de salida del agua es de 19.6°C, con lo que se determina que el agua aumenta 1.6°C cuando pasa por el molde.

Tabla 2. Tiempos de enfriamiento y diferencia de temperaturas de entrada y salida del agua en moldes

Material	Tiempo de enfriamiento (s)	Temperatura de salida de agua del molde (°C)	Diferencia de temperatura de agua de entrada y salida del molde (°C)
LD-PE	16.8	19.6	1.6
HD-PE	13.8	20.7	2.7
ABS	21.4	18.3	0.3
PP	15.8	19.7	1.7
PS	15.4	19.6	1.6
PVC-rígido	10.8	19.6	1.6
PVC-suave	8.1	19.8	1.8
POM	20.6	19.8	1.8

Para tener una distribución uniforme, es primordial que la diferencia entre las temperaturas de entrada

y de salida sea menor de  $6^{\circ}\text{C}$ . Este valor ha sido establecido mediante investigaciones y experimentación. Se comprobó que se cumple esta condición para los polímeros utilizados en la máquina. Esto se observa en la Tabla 2.

Para el diseño del circuito de enfriamiento se utilizó el software de simulación Pipe Flow Expert (ver Figura 6), el cual permitirá obtener los datos concernientes de velocidad, flujo, presión de la bomba, pérdidas, etc.

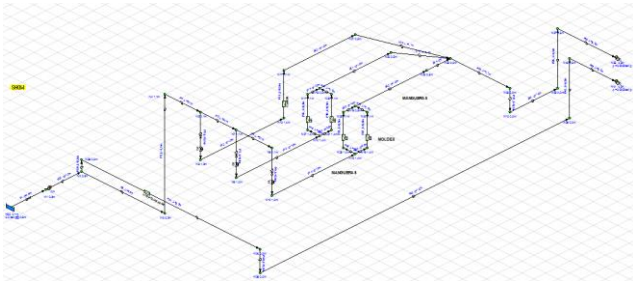


Figura 6. Simulación en Pipe Flow Expert

Luego de realizar el circuito en el software, como resultado, se obtuvieron las características para la bomba, donde se indica que la cabeza total mínima que debe tener la bomba es de 9,452 mca (13,44 psi), que es un valor relativamente bajo y se puede utilizar una bomba con un motor de 2 HP proporcionada por el cliente. Entonces se realizó la instalación del circuito como se indica en la Figura 7.



Figura 7. Circuito de enfriamiento de fluido hidráulico y moldes



Figura 8. Sistema de enfriamiento del agua

En cuanto al enfriamiento del agua, se decidió implementar un sistema con el principio de las torres de enfriamiento, en donde el agua

intercambia calor con el aire. Este sistema se muestra en la Figura 8.

### Análisis de temperatura del cañón

El análisis de temperatura por zonas del cañón se lo realizará para algunos materiales con el fin de determinar si algún material no es recomendable para utilizarlo en esta inyectora; además, permitirá identificar la mejor posición para colocar los sensores de temperatura (termocuplas), donde la temperatura "leída" indique una temperatura promedio.

El software *SolidWorks Simulation* se utilizó para realizar un estudio térmico en régimen transitorio; es decir, se simuló el comportamiento del aumento de temperatura en un tiempo dado, según la potencia de las niquelinas en las tres zonas, y se simuló un control ON/OFF, para cuando se llegue a las temperaturas recomendadas para cada material. En la Figura 9 se indica cómo se da la distribución de temperaturas en el cañón para el polímero ABS.

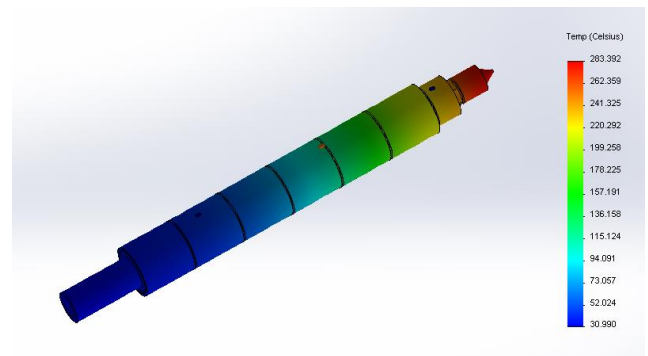


Figura 9. Distribución de calor en el cañón para el polímero ABS

Se analizaron los siguientes polímeros: ABS, HD-PE, LD-PE, POM, PP, PS, PVC rígido, PVC suave, y se determinó que se éstos se pueden usar en la máquina de inyección, a excepción del HD-PE, el cual exige mayores temperaturas del que las niquelinas instaladas están en capacidad de aportar.

### Diseño y análisis de llenado de cavidad

En la mecánica industrial en donde se encuentra la máquina de inyección de plástico, se requería la elaboración de nuevos moldes para la producción de tapas de botellas tipo spray. Una vez que se detalló las dimensiones y forma de la parte deseada se procedió a realizar el análisis de cavidad para dichos moldes. En la Figura 10 se indica la pieza para realizar el análisis de llenado de cavidad.

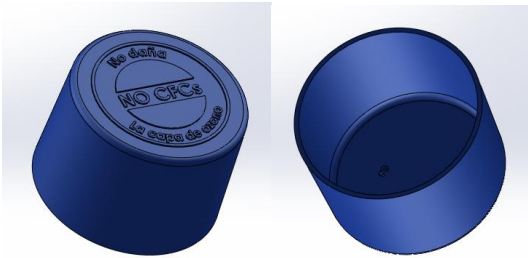


Figura 10. Tapa plástica de botellas tipo spray

Mediante la simulación en Solidworks Plastics se determinó que únicamente se puede inyectar una cavidad con la presión de inyección que tiene la inyectora (ver Figura 11). Además también se verificó que no existirían atrapamientos de aire en el proceso de moldeo (ver Figura 12 ).

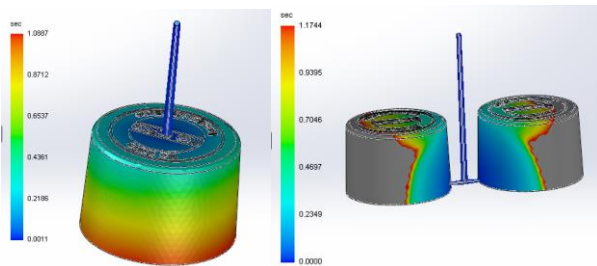


Figura 11. Pruebas de llenado con una y dos cavidades.

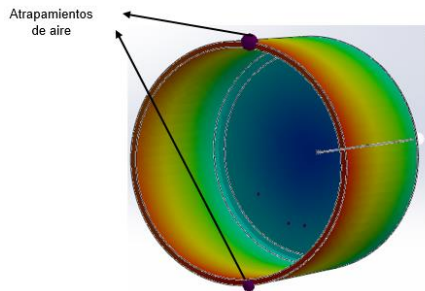


Figura 12. Atrapamientos de aire

**b) Sistema Eléctrico y Electrónico**

En esta sección se incluyen el diseño y la implementación del sistema eléctrico y electrónico de la máquina inyectora de plástico, tanto las conexiones de alimentación, como las de potencia y de control. En el Cuadro 1 se describen los gabinetes que se tendrán en la máquina.

Cuadro 1. Descripción de los gabinetes eléctricos

GABINETES ELÉCTRICOS	
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Gabinete 1	Conexión eléctrica principal: alimentación, circuito de control, circuito de potencia.
Gabinete 2	Conexiones de electroválvulas, finales de carrera y botonera sobre la máquina.
Gabinete 3	Conexiones de niquelinas, termocuplas, acondicionamiento, y sistema de enfriamiento.

Se diseñaron los circuitos de potencia para los motores de la bomba oleohidráulica y la bomba de agua, niquelinas, electroválvulas. Se realizó el diseño de la alimentación AC y DC de bajo voltaje.

En cuanto al diseño del circuito de control, se tiene que las entradas hacia el PLC deben ser señales de 24VDC, éstas constan de pulsadores, selectores y finales de carrera.

El conexionado del PLC Siemens S7-1200, se realizó tomando en cuenta la guía técnica respectiva. Se añadieron dos módulos, uno de entradas y salidas digitales, y otro de entradas analógicas para las señales de los sensores.

La disposición de los elementos en el gabinete se basó en los esquemas de la Figura 13 y Figura 14.

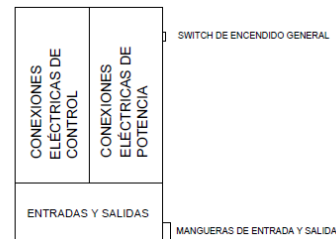


Figura 13. Disposición de los elementos según el tipo de conexiones

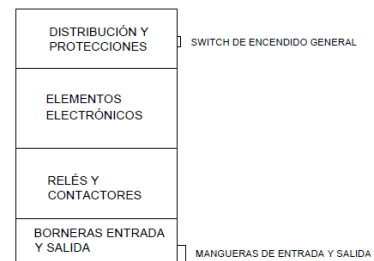


Figura 14. Disposición según el tipo de elemento

Se implementó otro gabinete donde se ubicarán las conexiones de potencia para el motor de la bomba utilizada para el sistema de enfriamiento. También se conectará la tarjeta para el acondicionamiento de las señales de las termocuplas, y las borneras correspondientes para la conexión de las niquelinas.

**Código de colores para cableado**

Es importante siempre utilizar una normativa acorde para la implementación de circuitos eléctricos. Una parte primordial es el uso de colores adecuados de cables según su tipo, y función. Esto permite una facilidad para reconocer fallas, implementar mejoras, entre otros. En la Figura 15 y Figura 16 se

observan las recomendaciones de la norma UL 508A se recomienda:

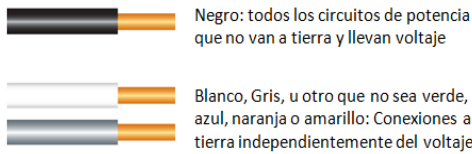


Figura 15. Colores de cables utilizados para potencia. Fuente: *UL 508A Control Panel Design Guide. Eaton Corporation.*

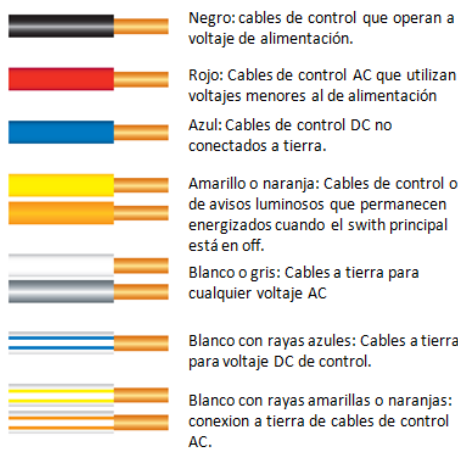


Figura 16. Colores de cables recomendados para circuitos de control. Fuente: *UL 508A Control Panel Design Guide. Eaton Corporation.*

Luego de haber diseñado las conexiones eléctricas, y la disposición de los elementos según lo explicado, se procedió a su implementación y prueba.

**c) Sistema de control**

Se diseñó un sistema de control que permite controlar tres zonas en el cañón, estas son: zona de alimentación, zona de compresión y zona de dosificación.

El sistema de control elegido es un control ON-OFF (ver Figura 17). La primera razón es que la temperatura no necesita una elevada precisión, en las recomendaciones de temperatura de cada material proponen un rango de temperaturas para cada zona, lo que implica que el sistema no debe ser muy preciso. Se ha pensado tener un desvío de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Otra razón es que una planta de temperatura responde muy lentamente. Esto significa que se necesita mucho tiempo para que exista un cambio de temperatura.

Se debe tener en cuenta para la implementación la inercia térmica, característica propiamente física que se da en el cañón. Esto produce un tipo de histéresis en el control, ya que al entrar en modo off, las niquelinas pese a que se desconectarán, seguirán transfiriendo calor al cañón calentándolo hasta encontrar un equilibrio térmico, lo mismo ocurre al cambiar a modo ON, las niquelinas tardarán de empezar a transferir calor hacia el cañón.

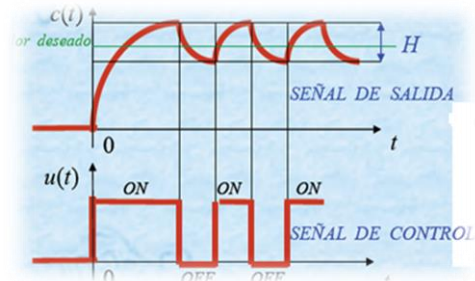


Figura 17. Comportamiento típico de un control ON-OFF con retraso en la conexión.

Luego de haber seleccionado el tipo de control, se procedió a determinar el comportamiento de la planta, para esto se realizaron dos pruebas. La primera prueba trata de determinar el comportamiento de temperatura de cada zona desde que se encienden las niquelinas a temperatura ambiente. La segunda prueba trata de identificar el comportamiento de la temperatura de cada zona cerca de una temperatura del set-point.

Gracias a estas pruebas, se determinó las acciones de control para cada zona de temperatura. Para la programación del control en el PLC se utilizó el criterio que se muestra en la Figura 18. En ésta se identificaron las principales características que se tiene en la respuesta de la temperatura a una entrada en escalón, donde e, es el error, y g, es la gradiente. Según estas características se toma en cuenta la implementación de las acciones de control.

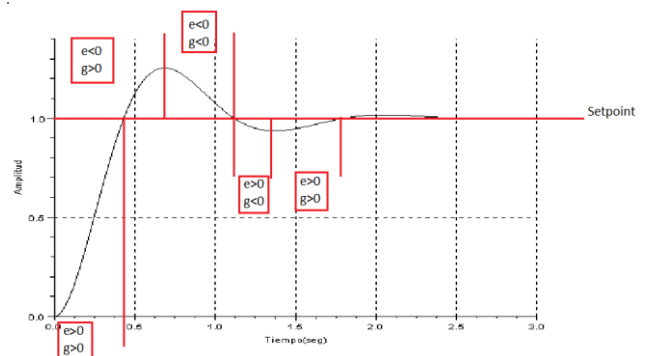


Figura 18. Comportamiento típico de temperatura de una planta a una entrada escalón.

### Adquisición de datos de los termopares

Para determinar la temperatura de cada una de las zonas, se sigue el siguiente procedimiento:

- Lectura de temperatura de los sensores en milivoltios.
- Acondicionamiento de la señal a un valor de 0 a 10 VDC donde 0 VDC es 0°C y 10 VDC representan 350 °C
- Digitalización de la señal.
- Normalización de la señal.
- Escalamiento.

Para el acondicionamiento de la señal, se diseñó una tarjeta electrónica basada en el uso de amplificadores de instrumentación AD620.

Estos amplificadores permiten tener una ganancia de hasta 1000 con el uso de una sola resistencia exterior al CI.

Entonces primero se debe determinar la ganancia que se necesita, para termopares tipo K se tienen los rangos de la Tabla 3:

Tabla 3. Rangos de trabajo del termopar tipo K.

Temperatura (°C)	Salida del sensor (mV)	Señal amplificada (V)
0	0	0
350	14.292	10

En la Tabla 4 se tiene los valores para termopares tipo J, como sigue.

Tabla 4. Rangos de trabajo del termopar tipo J.

Temperatura (°C)	Salida del sensor (mV)	Señal amplificada (V)
0	0	0
350	19.089	10

Con esto se determinó las ganancias que se debe tener como sigue a continuación.

Para el caso del termopar tipo K:

$$G = \frac{10 \text{ V}}{0,014292 \text{ V}}$$

$$G = 699.692 \approx 700$$

Para el caso del termopar tipo J:

$$G = \frac{10 \text{ V}}{0,019089 \text{ V}}$$

$$G = 523.862 \approx 524$$

Con esto se encuentran las resistencias de ganancia con la fórmula que se tiene a continuación.

$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

El amplificador AD620 permite tener un pin como referencia de medición, en este caso es la temperatura ambiente.

Para determinar la temperatura ambiente se utilizó un sensor LM35. Este, lee la temperatura ambiente y luego se trata su señal para que tenga la misma resolución de temperatura que el AD620 y se convierte en la referencia de temperatura.

### Programación del PLC

Luego de esto, se procedió a la programación del PLC, para ello se utilizó el software TIA Portal V11, el cual permite programar tanto el PLC como diseñar el entorno gráfico con una facilidad enorme en la interacción de estas dos partes.

La programación se la realizó en bloques. Teniendo los siguientes:

- Main.
- Modo manual.
- Modo automático.
- Salidas
- Control de temperatura.
- Calentamiento de boquilla.
- Avisos y advertencias

La programación de cada bloque se la realizó de tal manera que permita la identificación sencilla de cada proceso, para su fácil modificación y monitoreo.

### Programación del HMI

En el diseño del HMI se consideró la guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión (GEDIS), la cual se enfoca a ambientes industriales con supervisión computarizada y centralizada. El

principal objetivo del diseño del HMI es que sea de fácil manipulación para el operador, además de que debe ser intuitivo, para que la navegación entre pantallas sea de forma fluida.

La pantalla general nos permite la selección del tipo de modo, es decir, manual o automático (ver Figura 19).



Figura 19. Pantalla principal del HMI.

Cada modo tiene su propia pantalla, con las diferentes opciones de movimientos de la máquina y de parámetros de inyección. Estas se muestran en la Figura 20 y Figura 21.



Figura 20. Pantalla modo manual

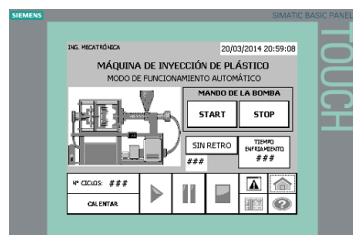


Figura 21. Pantalla modo automático.

#### 4. CONCLUSIONES:

- Se logró la recuperación de la inyectora de plástico, y todas sus funciones originales, con la mejora en la implementación de un sistema automático y una operación más sencilla y dinámica.
- La repotenciación del sistema mecánico de la máquina se logró con la reparación de los mecanismos que permiten su movimiento y con un exhaustivo mantenimiento del sistema hidráulico en su totalidad. El nuevo sistema de enfriamiento para la máquina y las piezas

plásticas, permitió una mejor calidad de las partes conformadas, debido a que se disminuye el encogimiento y la deformación en éstas; además, la incorporación de este sistema implica un ahorro de este recurso.

- El re-diseño del gabinete eléctrico permite una correcta distribución de los elementos de potencia y de control, además de facilitar la identificación de las conexiones para los procesos de mantenimiento.
- Se implementó un control de tipo ON/OFF con un rango de error permisible de  $\pm 3$  °C
- Mediante pruebas de campo, se determinó que se puede alcanzar temperaturas de hasta 220°C para la fusión de materiales plásticos en la máquina inyectora, siendo necesario implementar niquelinas de mayor potencia en caso de materiales que requieran de mayor temperatura de fusión como el HD-PE.

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Crawford, R. J. (2002). *Plastics Engineering*. En R. J. Crawford, *Plastics Engineering*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- Rosato, D., Rosato, D., & Rosato, M. (2000). *Injection Molding Handbook*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.
- Michaeli, W., Greif, H., Kretschmar, G., & Ehrig, F. (2001). *Training in Injection Molding*. Cincinnati: Hanser Gardner Publications.
- Márquez, J. (s.f.). *Diseño y Transformación de Plásticos. Análisis Térmico de la Inyección - Variación de las temperaturas en el ciclo*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.