

# *Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Temperatura Para un Equipo de Tratamiento Térmico Localizado En ACINDEC S.A*

Mayra E. Guerrero, Lizeth A. Pavón

**Resumen**—La implementación de una máquina para realizar tratamiento térmico localizado en acero al carbono en ACINDEC S.A.; consiste en el diseño del tablero de control y sus respectivos guarda fondos debido a que los existentes en el mercado no cumplían con los requerimientos de espacio para los distintos elementos, se realizaron pruebas a los transformadores que se reutilizaron para verificar su correcto funcionamiento. El proyecto plantea la optimización de tiempos con una mejora en el control de temperatura por lo que se realiza la automatización del proceso, ayudando así a disminuir errores, reduciendo esfuerzos internos, evitando daños en los elementos y en el personal, ya que se toma en cuenta todas las medidas de seguridad en el proceso de diseño e implementación, usando los mejores elementos disponibles en el mercado seleccionados después de análisis de sus bondades. Se detalla cómo se realizaron todas las etapas de diseño de software y hardware así como la comunicación empleada entre la interfaz HMI con el PLC y la obtención de los reportes que son entregados a los clientes.

**Palabras clave:** *Electrónica, Automatización, Tratamiento térmico, Soldadura, Acero.*

## I. INTRODUCCIÓN

Debido a la falta de uniformidad en la soldadura, ya que no todos los puntos a soldar se podrán realizar al mismo tiempo; se producen dilataciones diferentes en distintos puntos de la pieza en un mismo instante lo que ocasiona la pérdida de las propiedades físicas y químicas del acero; el tratamiento térmico de soldadura permite al material recuperar las propiedades perdidas, es aplicado generalmente a equipos de gran tamaño y difíciles de movilizar. En otros casos la parte a tratar esta fija y es imposible separarla físicamente del conjunto.

El Tratamiento Térmico a implementar se lo denomina localizado, consiste en calentar a la temperatura de tratamiento la unión soldada; para ello se colocan sobre la banda de calentamiento calefactores eléctricos flexibles de diversas configuraciones; estos se adaptan a la forma de la parte a tratar.

El equipamiento necesario para calentamiento por resistencias eléctricas incluye: aislación refractaria de fibra cerámica, fuente de poder, en general son equipos con un transformador, programadores de ciclo térmico, lo que indica que se puede realizar tratamientos distintos al mismo tiempo.

Mayra E. Guerrero T., Lizeth A. Pavón B., Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Automatización y Control, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador, E-mails: mayra\_egt@yahoo.com, lian\_pb36@hotmail.com

Registrador de temperaturas de termocuplas. Las termocuplas tipo K aisladas en seda de vidrio con resistencia ataques químicos, para ser soldada por descarga capacitiva.

El proyecto renovará y mejorará por completo el sistema de control de temperatura de una máquina empleada en tratamiento térmico, conformada por 6 zonas a controlar: sustituyendo los elementos electromecánicos obsoletos por nueva tecnología, controladores sin capacidad de hacer cambios en línea y carentes de comunicación Ethernet por controladores que poseen las características anteriormente mencionadas, además de dar la posibilidad de conectar módulos de temperatura, reóstatos por un control de tensión temporizado dependiendo del caso o tipo de acero, y el armario eléctrico por un gabinete de menor tamaño y fácil de movilizar; desarrollando también una interfaz HMI que permita a los operadores controlar, monitorear y supervisar la temperatura de las diferentes zonas de la máquina en una sola pantalla.

Con el diseño de hardware a utilizar, se procede al desarrollo del software para la interfaz HMI tanto como el proceso de los algoritmos de control que se usará en las distintas subrutinas de la máquina.

Al finalizar el desarrollo se procederá a la parte de implementación en la que se debe conectar los equipos nuevos sustituyendo los existentes y revisar cuidadosamente las conexiones antes de iniciar la siguiente etapa

## II. MARCO TEÓRICO

### A. *Tratamiento Térmico.*[1]

Es un proceso en el cual una herramienta o parte de una herramienta se somete intencionalmente a una secuencia específica de tiempo - temperatura.

El objetivo es conferirle a la pieza propiedades requeridas para procesos de transformación posteriores o para su aplicación final; además puede provocar transformaciones de los constituyentes estructurales sin modificar la composición química promedio del material.

Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil.

La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material.

El tratamiento térmico consta de tres etapas:

- **Calentamiento.**- Debe ser progresivo y uniforme para dar tiempo a que el corazón de la pieza también alcance la temperatura deseada. Los calentamientos rápidos son muy peligrosos en piezas gruesas y este efecto negativo se agrava cuando aumenta el contenido de carbono del acero.
- **Mantenimiento.**- Debe ser uniforme y no variar más del valor crítico permitido; El tiempo de permanencia oscila entre media hora y una hora por pulgada de espesor de pieza. Cuando el calentamiento se ha realizado lentamente, se mantiene media hora por pulgada y si el calentamiento ha sido rápido se eleva el mantenimiento a una hora por pulgada.
- **Enfriamiento.**- Es la etapa final del tratamiento la cual será la larga que las etapas anteriores debido a que los tiempos dependen de la pieza a tratar, pero como se tiene concentración de calor la temperatura disminuye en menor cantidad que cuando se está calentando.

En la Figura.1, se puede observar las etapas del tratamiento de manera gráfica, considerando que la etapa de mantenimiento es la más crítica, porque no puede salirse del rango de temperatura permitido.

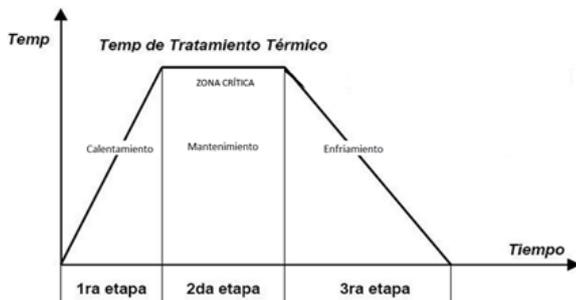


Figura. 1 Etapas del Tratamiento Térmico.

### B. Principales Tratamientos Térmicos.

**TEMPLE:** Su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia del acero. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior Ac (entre 900-950 °C) y se enfría rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, etc.

**REVENIDO:** Sólo se aplica a aceros previamente templados, para disminuir ligeramente los efectos del temple, conservando parte de la dureza y aumentar la tenacidad. Consigue disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada.

**RECOCIDO:** Consiste básicamente en un calentamiento hasta la temperatura de austenización (800-925 °C) seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza.

**NORMALIZADO:** Tiene por objetivo dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con

una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido.

### C. Tipos de Tratamiento Térmico.

| Tipos de Tratamiento Térmico |   |                        |
|------------------------------|---|------------------------|
| <b>Integral</b>              | Horno Estacionario                                      |                        |
|                              | Horno Portátil  |                        |
| <b>Localizado</b>            | Calefaccionado interno con quemadores de alta velocidad |                        |
|                              | Resistencia Eléctricas                                  | Calefactores Flexibles |
|                              | Inducción   |                        |
|                              | Radiación con lámparas de cuarzo                        |                        |
|                              | Radiación por calefactores a gas tipo infrarrojo        |                        |
|                              | Exotérmico  |                        |
|                              | Llama   |                        |

Tabla. 1 Tipos de Tratamiento Térmico.

El Tratamiento Térmico de Localizado se aplica generalmente a equipos de gran tamaño y difíciles de movilizar a diferencia de los tratamientos integrales que tratan a toda la pieza que dependiendo del tamaño de los hornos no puede ser muy grande.

### D. Tratamiento Térmico Localizado.[2]

Consiste en endurecer solamente las superficies externas sin afectar las partes internas, de tal manera que se eviten deformaciones en la pieza tratada.

Este tipo de tratamiento permite un alivio de tensiones en juntas soldadas según procedimientos de soldaduras especificados.

El procedimiento que se sigue es calentar una banda a cada lado del cordón soldado, cuyo ancho depende de cada caso.

Es importante aclarar que el Tratamiento Localizado solo puede ser aplicado a geometrías que permitan la libre dilatación como son las soldaduras circunferenciales.

Las soldaduras longitudinales y las uniones soldadas de conexiones a envolventes no deben tratarse localizadamente pues el material frío aledaño a la zona calentada no permite a esta la libre dilatación. En el caso de costuras longitudinales la zona calefaccionada no puede dilatarse libremente en la dirección del cordón y en el caso de conexiones a envolvente si calentamos el círculo alrededor de la conexión este no puede dilatarse porque está restringido por el material frío alrededor de él. En estos casos el material tiende a dilatarse en la dirección del espesor y como está caliente y blando por el efecto de la temperatura, se deforma plásticamente en esa dirección y se crean tensiones residuales longitudinales.

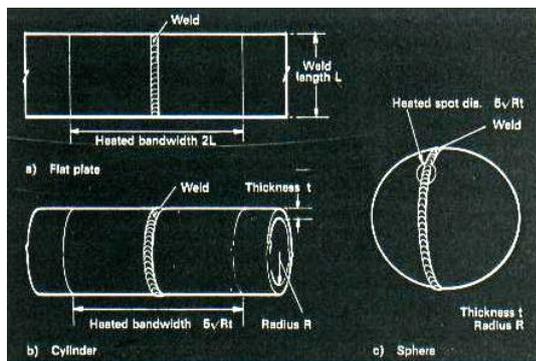


Figura. 2 Ancho de Banda de Tratamiento.

En la Figura.2, se observa la geometría de las soldaduras para tener en claro la diferencia entre una soldadura circunferencial y una radial.

Tratamiento térmico localizado disminuye la dureza de la zona afectada por el calor, el metal de soldadura y el material base; resultado una microestructura más dúctil y resistente a la fisuración.

Para realizar este proceso se colocan sobre la banda de calentamiento calefactores eléctricos flexibles de diversas configuraciones que se adaptan a la forma de la parte tratada. Estos calefactores como se observa en la Figura.3, se fabrican con un cable de nicron que oficia de resistencia eléctrica rodeado por cuentas cerámicas.



Figura. 3 Resistencia Fléxible

El equipamiento necesario para calentamiento por resistencias eléctricas incluye además:

- Aislación refractaria de fibra cerámica.
- Fuente de poder, en general son equipos con un transformador de 70-110Kw.
- Programadores de ciclo térmico, generalmente son seis (6) por equipo lo que indica que se puede realizar seis (6) Tratamientos distintos al mismo tiempo.
- Registrador de temperaturas de hasta 8 Termocuplas.
- Termocuplas tipo K aisladas en seda de vidrio con alambre de 0,5/0,8 mm de diámetro, para ser soldadas por descarga Capacitiva.
- Soldador de TC por descarga Capacitiva.

### E. Fijación de Termocuplas.

El método utilizado hoy día es para fijar cada alambre de la Termocupla por separado y a una distancia de aproximadamente cinco mm (5mm) a la superficie por intermedio es el de Soldadura por Descarga Capacitiva.

En la Figura 4. Se puede observar como esta compuesto el equipo para realizar la fijación de las termocuplas.

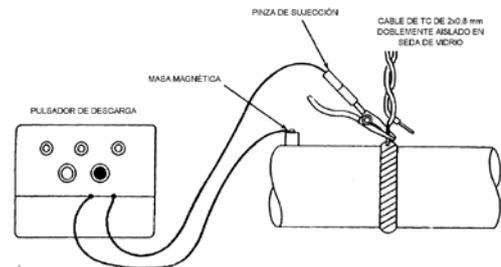


Figura. 4 Equipo de Soldadura Capacitiva.

## III. DISEÑO DE HARDWARE

### A. Definición de Parámetros y Variables de Proceso.

Las cuatro variables del ciclo térmico a controlar en el Tratamiento térmico son:

- La Velocidad de Calentamiento a partir de cierta Temperatura Específica.
- La Temperatura de Tratamiento o Temperatura de Mantenimiento.
- El Tiempo a la Temperatura de Mantenimiento.
- La Velocidad de Enfriamiento hasta cierta Temperatura Específica.

Las especificaciones según el tipo de acero limitan las velocidades de calentamiento y enfriamiento con el objeto de prevenir las tensiones térmicas producidas por las contracciones y/o dilataciones no homogéneas. Los gradientes de temperatura a través del espesor y en dirección longitudinal producen Tensiones Térmicas.

## IV. DESARROLLO DEL SOFTWARE

### A. Sistema de control implementado

El diagrama de bloque usado presenta las tres fases por las que atraviesa el proceso implementado, partiendo del nivel más bajo como son los sensores (termocuplas) y actuadores (resistencias calefactoras). En el nivel dos se encuentra el plc y módulos de Termocupla empleados, finalmente en el nivel tres se encuentra el computador desde el cual se visualiza el Tratamiento térmico.

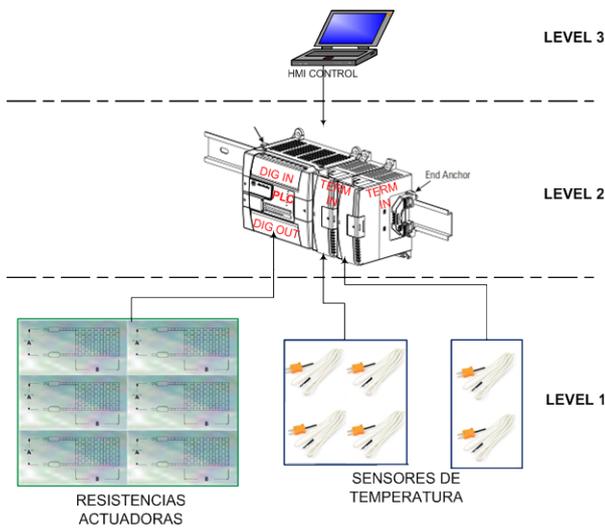


Figura. 5 Diagrama de Bloque Funcional

Este proyecto emplea para el control de temperatura un Control Todo o Nada [3], donde se va incrementando el set point de referencia conforme transcurre el tiempo, partiendo siempre del valor de ingresado en la interfaz como velocidad o rata de ascenso ó descenso según sea el caso. Al pasar a la etapa de mantenimiento el valor de referencia es reemplazado por la temperatura máxima, además se tiene una histéresis que la determina el rizado mínimo. Obviando para dicho caso el bloque generador de rampa.

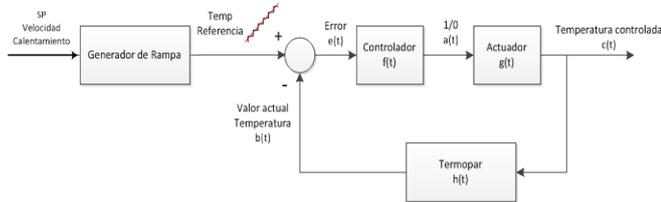


Figura. 6 Diagrama de Control On-Off.

### B. Diseño de Algoritmos de Control de Temperatura

El diagrama de flujo general presenta las subrutinas empleadas en el programa principal donde:

**Lectura de Termocuplas:** contiene los módulos SCP escalados dando como resultado un valor en grados Celsius según lo indica el manual de los módulos de Termocupla, debido al desgaste de material las termocuplas que se forman al momento de la soldadura se debe emplear un fórmula llamada de compensación para obtener el valor real de la lectura.

$$Compensa_x = (Valor_{SCP} * 1.008) + 2.381 \quad (1)$$

**Visualización Temperaturas:** Condiciona las variables que están ancladas a las salidas del controlador dependiendo si se trata de modo manual o automático.

**Manual:** A cada botón en el HMI le corresponde una salida, misma que se activa/desactiva con la única condición de que el panel se encuentre encendido.

**Automático:** Subrutina desde la cual se accede a las subrutinas de las etapas de tratamiento térmico: calentamiento, mantenimiento, enfriamiento.

**Asignación Entradas:** Encargada de encontrar la falla en alguna de las lecturas de termopar, entendiéndose por falla al observar que un valor de temperatura no varía a pesar de encontrarse encendida dicha salida.

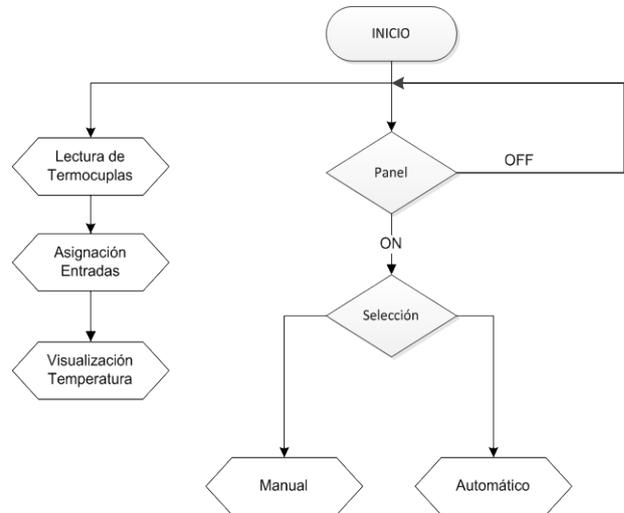


Figura. 7 Diagrama de flujo general.

**Subrutina de Calentamiento:** Conociendo el valor de la rata de ascenso, ingresado en HMI se calcula la fórmula para la obtención del tiempo que debería haber transcurrido hasta llegar a la temperatura menor de entre las 6 termocuplas. La fórmula a ejecutar es:

$$Tiempo_{in} = \frac{Menor * 3600}{Rata\ de\ Asc} \quad (2)$$

Para la obtención del valor de referencia al que deberán alcanzar todas las salidas se aplica:

$$Referencia_{temp} = \frac{Rata\ de\ Asc * Tiempo_{in}}{3600} \quad (3)$$

**Referencia\_temp** Indica el valor en el que se deben encontrar todas las lecturas, de tal manera que si algún termopar se encuentra en un valor menor a este se activa la salida del circuito correspondiente hasta que alcance la temperatura deseada.

**Subrutina Mantenimiento:** Al llegar a la temperatura máxima ingresada por el usuario se activa la subrutina de mantenimiento, donde se busca mantener el valor de las termocuplas en la temperatura máxima, si esta disminuye más allá del rizado mínimo (histéresis) las salidas se encienden hasta compensar este desfase, al conseguirlo se apagan.

**Subrutina Enfriamiento:** las salidas se mantendrán apagadas salvo que la temperatura en alguna de las 6 resistencias disminuya más allá del porcentaje de descenso establecido. Al finalizar esta etapa se envía una señal a la HMI indicando que el tratamiento llegó a su fin deteniendo el cronómetro. Las fórmulas aplicadas para este caso son:

$$Tiempo_{out} = \frac{Menor * 3600}{Rata\ de\ Dsc} \quad (4)$$

$$Rata\_Ref_{dsc} = \frac{Rata\ de\ Dsc * Tiempo_{out}}{3600} \quad (5)$$

### C. Diseño de la Interfaz HMI.

Para el diseño de la interfaz se tomó en cuenta las necesidades de las personas que usarían el sistema desarrollado, permitiendo de esta manera un fácil desenvolvimiento y control del sistema así como soluciones oportunas a los problemas que se podrían presentar en el desarrollo.

El software usado para el diseño de la HMI es RSView 32, mismo que permite control y monitoreo de sistemas y procesos automatizados, el cual proporciona comunicación sin precedentes con otros sistemas propiedad de Rockwell Automation.

- Pantalla de Inicio.- Tiene las opciones de ingreso en funcionamiento Manual o Automático según se requiera y así como el ingreso de usuario y contraseña con el que desea iniciar sesión como se observa en la Figura. 8.



Figura. 8 Pantalla de Inicio.



Figura. 9 Pantalla para ingreso a menú de Administrador.

El usuario y la contraseña para ingresar al modo de administrador se ingresan en la pantalla que se muestra en la Figura.9 y los datos se pueden ver en la Tabla.2.

|            | Administrador |
|------------|---------------|
| Usuario    | ADMIN         |
| Contraseña | ADMIN         |

Tabla. 2 Usuario y Contraseña.

- Pantalla de Modo Manual.- Permite al operador comprobar el estado de las termocuplas así como las salidas del PLC puesto que consta de un panel con botones para la activación individual de cada salida y de igual manera de las 6 en conjunto junto con luces indicadoras mismas que cambian de color al ser encendidas.



Figura. 10 Pantalla de Modo Manual.

En la Figura. 10, se observa la distribución de la pantalla de modo manual, la misma que está conformada por algunos paneles que son:

- o El Panel de Resistencias que permite la activación o desactivación de todas las salidas.
- o El panel de Medición de Temperatura que presenta la temperatura de cada una de las salidas con su respectivo color al lado izquierdo, que sirve para identificar a la salida en el trend.
- o La Barra de estado en donde se encuentra el botón de Menú que permite regresar a la pantalla de inicio; el botón de Imprimir que despliega la pantalla de impresión con los datos obtenidos hasta el momento; el botón de Ayuda que despliega un documento en formato .pdf donde se encuentra el manual del operador del sistema.
- o El Panel de Parada de Emergencia.
- o La leyenda que nos indica que usuario está usando la interfaz.
- Pantalla de Modo Automático.- Permite al operador realizar el tratamiento térmico de forma automática con solo ingresar los datos que son requeridos.



Figura. 11. Pantalla de modo Automático.

Le puede observar la pantalla en la Figura.11 , que está conformada por los siguientes paneles y elementos:

- El panel de Medición de Temperatura que presenta la temperatura de cada una de las salidas con su respectivo color al lado izquierdo, que sirve para identificar a la salida en el trend; también muestra el número de resistencias que deben estar conectada según el voltaje seleccionado.
- La Barra de estado en donde se encuentra el botón de Menú que permite regresar a la pantalla de inicio; el botón de Imprimir que despliega la pantalla de impresión con los datos obtenidos hasta el momento; el botón de Ayuda que despliega un documento en formato .pdf donde se encuentra el manual del operador del sistema.
- El Panel de Parada de Emergencia.
- La legenda que nos indica que usuario está usando la interfaz.
- El Panel de Estados del Proceso nos indica en qué etapa del proceso se encuentra así como cuando se presionó el paro de emergencia, se finalizó el tratamiento térmico y/o si ocurrió un problema con la lectura de la temperatura en las termocuplas.
- El Panel de Ingreso de Datos el usuario ingresará los parámetros para el desarrollo del tratamiento térmico a realizar.
- El Panel con el botón de Reset que nos permite borrar todos los datos ingresados.
- El Panel de Encendido con el cual iniciamos el proceso una vez se hayan ingresados los datos.

## V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Se consideraron todas las posibles fallas y las acciones que deberán ser tomadas dependiendo del caso que se pueda presentar; además se sometió al sistema a varios casos para verificar su correcto comportamiento y el de todos los elementos y dispositivos que conforman la máquina.

### A. Pruebas De Entradas Analógicas De Termocuplas

Se realizaron pruebas en los valores medidos por el módulo de termocuplas con ayuda de un pirómetro calibrado y certificado para medir el error presente en cada medición.

Los datos que se obtuvieron de la medición se los puede observar en la Tabla.3.

| Pirómetro (°C) | Programa (°C) | Error (%) |
|----------------|---------------|-----------|
| 116,3          | 113,4         | 2,494     |
| 114,2          | 111,1         | 2,715     |
| 113            | 109,5         | 3,097     |
| 111,6          | 108,3         | 2,957     |
| 110,3          | 106,5         | 3,445     |

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 106,1 | 103,5 | 2,451 |
| 103,5 | 100,1 | 3,285 |
| 101,3 | 97,3  | 3,949 |
| 98,7  | 95,8  | 2,938 |
| 95,8  | 92,6  | 3,340 |
| 93,4  | 90,3  | 3,319 |
| 91,1  | 88,2  | 3,183 |
| 88,7  | 85,8  | 3,269 |

Tabla. 3 Valores medidos en Pruebas.

Una vez tomados los datos se realizó una corrección para reducir el error hasta llegar a un valor aceptable menos del 3%.

Se obtuvo la siguiente ecuación:

$$y = (x * 1.008) + 2.381 \quad (6)$$

## VI. CONCLUSIONES

Se redujeron los esfuerzos internos y los tiempos muertos aproximadamente en un 66.66% al momento de la activación de las salidas (relés de estado sólido) en la etapa de calentamiento y mantenimiento pues con la automatización no se requiere de un operador para accionar las salidas correspondientes.

La interface HMI cubre todas las necesidades de un sistema de control centralizado, ya que cuenta con distintas pantallas para tener un fácil manejo de la misma al personal encargado, permitiendo controlar, monitorear y supervisar el proceso completo.

Para el control automático, se emplea control ON-OFF, donde el set point varía de manera incremental; cada dos segundos el valor de referencia varía y es solo durante ese tiempo en el cual se realiza el análisis, para determinar si la respuesta del sistema será activar o desactivar los circuitos finales, ya que al tratarse de relés de estado sólido estos soportan un cambio de estado constante sin afectar de manera significativa su tiempo de vida útil, además de no provocar ninguna clase de ruido.

## VII. REFERENCIAS

- [1] Ing. Cervantes, M. (2008). Relevado de Esfuerzos Mediante Resistencias Calefactoras y Gas. México.
- [2] Ing. Laufgang, S. (2004). Tratamiento Térmico de Localizado. En S. Ing. Laufgang, Tratamiento Térmico de Soldadura (págs. 12-32). Mexico: Termo Soldex S.A.
- [3] Ogata, K. (2003). Ingeniería de Control Moderna. Madrid: Prentice Hall.