

a) Planteamiento del problema

El relevado de esfuerzos está conformado por tres etapas, calentamiento, sostenimiento y enfriamiento, en las cuales, en la primera la temperatura del la flecha debe aumentar a una velocidad constante hasta la temperatura objetivo, que según el material, oscila entre los 650 °C hasta los 800 °C; una vez llegado a la temperatura objetivo, el material debe permanecer a esa misma temperatura durante un tiempo determinado, pudiendo llegar a las 6 horas. Después de terminada esta fase continúa la etapa de enfriamiento, en la cual la temperatura a la cual la flecha está sometida debe disminuir gradualmente y de manera controlada.

Con estos parámetros, se pueden definir las variables principales con las que se trabajarán, las cuales se presentan a continuación:

- Tiempo de la fase de calentamiento
- Tiempo de la fase de sostenimiento
- Tiempo de la fase de calentamiento
- Temperatura de sostenimiento

Cabe señalar que la ejecución del control de dicha temperatura varía dependiendo de la metodología que se elija. La propuesta presentada en el presente documento consiste en un controlador proporcional, el cual a diferencia de un control *ON/OFF*, este sistema se encarga de suministrar la corriente necesaria en función de la temperatura requerida; en este sentido, en la fase de calentamiento, si la velocidad con la que está aumentando la temperatura es mayor a lo que se requiere, el sistema se encargará de suministrar menos corriente en proporción al error que exista entre la velocidad de calentamiento ideal y la velocidad de calentamiento actual, de la misma manera, si la temperatura está aumentando pero en una velocidad menor a la ideal, el sistema ajustará la corriente de las resistencias en proporción al error. En el caso de la fase de sostenimiento, se busca compensar con un ajuste proporcional la temperatura actual con la ideal y en la tercera fase se ejecutará de forma inversa a la fase de calentamiento.

De esta manera se establecen los siguientes casos por fase que se pueden presentar.

Fase de calentamiento

- ***Caso 1:***

Descripción: El primer caso se ejecutará cuando la temperatura actual sea menor a la temperatura ideal, la diferencia de temperatura entre la actual y la anterior sea mayor a la velocidad de calentamiento y si la diferencia de temperaturas es mayor o igual al doble de la velocidad de calentamiento.

Operación: Este caso representa que la pieza se está calentando al doble de la velocidad de la ideal o mayor, por lo que la corriente suministrada a las resistencias será reducida al 98.83%.

- ***Caso 2:***

Descripción: El segundo caso se ejecutará cuando la temperatura actual sea menor a la temperatura ideal, la diferencia de temperatura entre la actual y la anterior sea mayor a la velocidad de calentamiento y si la diferencia de temperaturas es menor al doble de la velocidad de calentamiento.

Operación: Este caso representa que la pieza se está calentando más rápido de lo que debería, sin embargo no excede el 100% del valor ideal, por lo cual, del error presentado se obtiene el porcentaje respecto a la velocidad ideal, y el resultado se resta al valor actual de la salida analógica del PLC.

- ***Caso 3:***

Descripción: El tercer caso se ejecutará cuando la temperatura actual sea menor a la temperatura ideal y la diferencia de temperatura sea igual a la velocidad de calentamiento.

Operación: En este caso, como la velocidad de calentamiento es igual a la diferencia, quiere decir que está estable, por lo cual el valor analógico de salida se mantiene igual.

- **Caso 4:**

Descripción: El cuarto caso se ejecutará cuando la temperatura actual sea menor a la temperatura ideal, la diferencia de temperatura sea menor a la velocidad de calentamiento y sea mayor a 0.

Operación: Este caso representa cuando la pieza se está calentando más lento de lo que debería, por lo tanto se realiza una resta de la velocidad ideal y el error, del resultado se obtiene el porcentaje que representa respecto al valor ideal y ese porcentaje se aumenta al valor actual de la salida analógica.

- **Caso 5:**

Descripción: El quinto caso se ejecutará cuando la temperatura actual sea menor a la temperatura ideal, la diferencia de temperatura sea menor a la velocidad de calentamiento y sea menor o igual a 0.

Operación: Este caso representa cuando la velocidad de calentamiento es menor a lo que debería y además está disminuyendo la temperatura. En este caso el valor de la salida analógica se aumentará en un 98.83%.

Fase de sostenimiento

- **Caso 1:**

Descripción: Este caso se ejecuta cuando la temperatura actual sea mayor a la temperatura ideal.

Operación: En este caso se aumentará el valor de la salida analógica respecto al porcentaje que la diferencia de temperaturas representa respecto a la temperatura ideal.

- **Caso 3:**

Descripción: Este caso se ejecuta cuando la temperatura actual es igual a la temperatura ideal.

Operación: El valor de la salida analógica se mantendrá igual, puesto que el sistema está en la temperatura ideal.

- **Caso 2:**

Descripción: Este caso se ejecuta cuando la temperatura actual es menor a la temperatura ideal.

Operación: En este caso se disminuirá el valor de la salida analógica respecto al porcentaje que la diferencia de temperaturas representa respecto a la temperatura ideal.

Fase de enfriamiento

- **Caso 1:**

Descripción: Se presenta cuando la temperatura actual es mayor a la temperatura ambiente, la diferencia de temperatura entre la actual y la anterior es mayor a la velocidad de enfriamiento y cuando la diferencia es mayor o igual a 0.

Operación: Representa que la temperatura en lugar de estar disminuyendo está aumentando, por lo tanto el valor de salida se disminuirá un 98.83% respecto al valor actual.

- **Caso 2:**

Descripción: Se presenta cuando la temperatura actual es mayor a la temperatura ambiente, la diferencia de temperatura entre la actual y la anterior es mayor a la velocidad de enfriamiento y cuando la diferencia es menor a 0.

Operación: En este caso el porcentaje que representa el error respecto a la velocidad de enfriamiento ideal se restará al valor de salida analógico actual.

- **Caso 3:**

Descripción: Se presenta cuando la temperatura actual es mayor a la temperatura ambiente y la diferencia entre temperaturas es igual a la velocidad de enfriamiento.

Operación: Al ser la diferencia de temperaturas igual a la velocidad de enfriamiento, se mantiene el valor actual de la salida analógica.

- **Caso 4:**

Descripción: Se presenta cuando la temperatura actual es mayor a la temperatura ambiente, la diferencia de temperatura entre la actual y la anterior es menor a la velocidad de enfriamiento y cuando la diferencia es mayor al doble de la velocidad de enfriamiento.

Operación: En este caso el porcentaje que representa el error respecto a la velocidad de enfriamiento ideal en su valor absoluto se sumará al valor de salida analógico actual.

- **Caso 5:**

Descripción: Se presenta cuando la temperatura actual es mayor a la temperatura ambiente, la diferencia de temperatura entre la actual y la anterior es menor a la velocidad de enfriamiento y cuando la diferencia es menor o igual al doble de la velocidad de enfriamiento.

Operación: En este caso al estar disminuyendo la temperatura más rápido o igual al doble de lo ideal, se aumentará la salida analógica un 98.83% respecto a su valor actual.

b) Identificación de variables de entrada y salida

Habiendo planteado la lógica del sistema, se procede a identificar las entradas y las salidas de nuestro sistema, las cuales se muestran a continuación.

Tabla X. Entradas con nombre y asignación PLC

Nombre	Descripción	Clave TIA PORTAL
Temp_Actual	Variable que guarda el valor de la temperatura actual.	DB1.DBD12
Temp_Anterior	Variable que guarda la temperatura anterior (1 minuto).	DB1.DBD16
Temp_Diferencia	Variable que guarda la resta de la temperatura actual menos la anterior.	DB1.DBD20
Temp_Error	Variable que guarda el error (Velocidad o Temperatura).	DB1.DBD24
Cool_Speed	Variable donde se guarda la velocidad de enfriamiento.	DB1.DBD28
Heat_Speed	Variable donde se guarda la velocidad de calentamiento.	DB1.DBD32

INICIO_B	Variable booleana enlazada con el botón de Inicio de la HMI.	DB1.DBX154 0
RESET_B	Variable booleana enlazada con el botón de Reset de la HMI.	DB1.DBX154 1
PARO_B	Variable booleana enlazada con el botón de Paro de la HMI.	DB1.DBX154 2
CONTINUAR_B	Variable booleana enlazada con el botón de Continuar de la HMI.	DB1.DBX154 3
EMERGENCIA	Variable de salida definida por las pulsaciones de los botones de paro y continuar.	Q7.0

Además de las variables de entrada por las cuales se rige el sistema, se incluyen TIMERS o temporizadores, los cuales ayudan a realizar las transiciones de estados a estados.

Tabla x. Timers y asignación PLC

Nombre	Descripción	Clave TIA PORTAL
Tiempo_Muestreo/T1	Temporizador de muestreo de 1 minuto en la primera fase.	DB4
Timer_02/T2	Temporizador de 0.5 segundos para realizar operaciones en la fase 1.	DB6
Tiempo_Muestreo_Sostenimiento/T3	Temporizador de muestreo de 1 minuto en la segunda fase.	DB21
Timer_M07/T4	Temporizador de 0.5 segundos para realizar operaciones en la fase 2.	DB16

Tiempo_Muestreo_Enfriamiento/T5	Temporizador de muestreo de 1 minuto en la tercera fase.	DB9
Timer_M14/T6	Temporizador de 0.5 segundos para realizar operaciones en la fase 3.	DB12
Tiempo_de_Sostenimiento/T_S	Temporizador que marca el tiempo que dura la segunda fase según la magnitud que haya ingresado el usuario.	DB7

En este caso en particular, la única salida que el sistema cuenta es la salida analógica del PLC, la cual se muestra a continuación.

Tabla X. Salidas y asignación PLC

Nombre	Descripción	Clave TIA PORTAL
Analog_Output_02	Salida analógica del PLC	QW114

c) Arquitectura

Debido a la complejidad que representa la creación de un sistema de automatización industrial, el método seleccionado para realizar la programación del control es la carta ASM. Esta metodología está basada en estados de memoria, denotados por la letra *M*, los cuales se activan dependiendo de las entradas que reciban y dentro de estos estados se pueden activar actuadores o simplemente ser estados de transición.

Uno de los primeros pasos para realizar la programación con carta ASM es definir la arquitectura del sistema, en este caso la carta procesa las entradas y los TIMERS, a cambio el sistema devuelve salidas, sin embargo los mismos temporizadores reciben retroalimentación de los estados que son activados para operar, por lo tanto el esquema de la arquitectura queda de la siguiente manera.

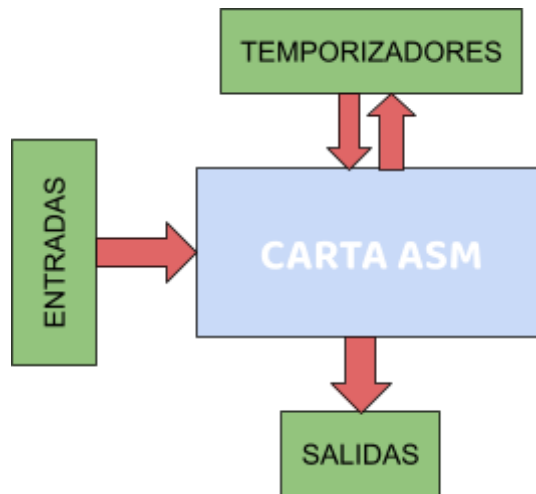


Figura X. Arquitectura de la carta ASM

d) Carta ASM

Al encender el sistema, el estado en el que se encuentra en primer lugar corresponde al **M0.0**. En este estado el usuario permanecerá hasta que se presione el botón de inicio **IB_I**, de no ser así, el sistema se mantendrá en dicho estado.

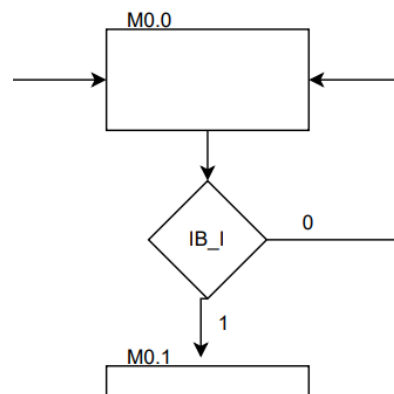


Figura.X Inicio del sistema.

Más adelante, cuando se presiona el botón de inicio **IB_I** estando en el **M0.0**, el sistema pasa al estado **M0.1**, en el cual se iniciará la primera etapa, la fase de calentamiento. Este primer estado de la fase 1 realiza el muestreo de la temperatura, con el propósito de obtener un valor anterior de la misma. Del mismo modo, cuando se active este estado el TIMER del muestreo de esta fase se activará, y estará disponible hasta que el tiempo se acabe o sea activada la entrada de emergencia **B_E**. Este estado de emergencia **M3.0** permanecerá activo mientras no sea desactivado.

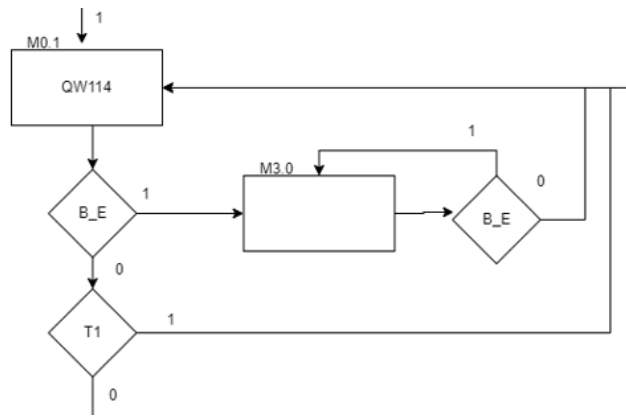


Figura.X Muestreo de la fase 1.

Acabado el tiempo del muestreo, se procede a revisar la temperatura de la pieza **T_A**, si esta es igual o mayor a la temperatura que se quiere llegar, automáticamente el sistema pasará a la siguiente fase, comenzando en el estado **M0.6**. En el caso en el que todavía no se llegue a dicha temperatura se pasará al estado **M0.2**, el cual permite realizar las operaciones correspondientes para ajustar la salida analógica del PLC. Al igual que el estado anterior, se revisará la entrada de emergencia, y cuando se desactive la emergencia el sistema pasará al estado **M0.1**. Cuando se acabe el tiempo de operación **T2**, el sistema revisará si la temperatura actual es mayor o igual a la temperatura máxima, si esta aseveración es falsa el sistema se regresará al estado **M0.1**, buscando ajustar la velocidad de calentamiento y a su vez llegar a la temperatura deseada.

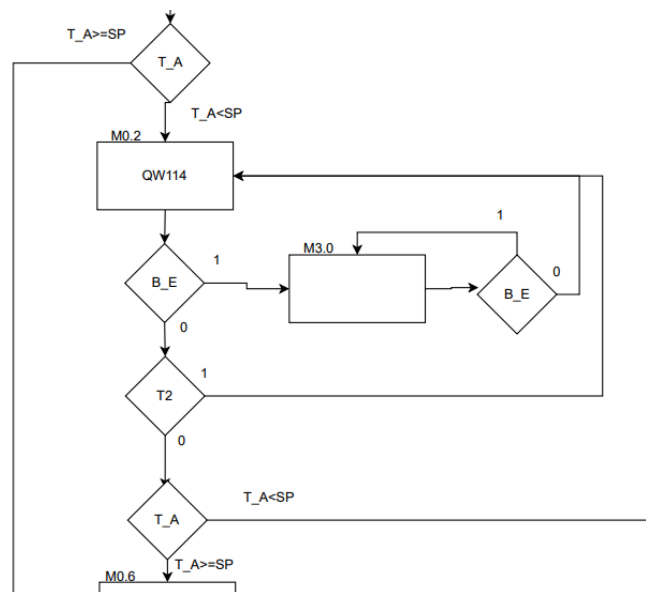


Figura.X Operaciones de la fase 1.

En el caso en el cual se cumpla que la temperatura actual es mayor o igual a la máxima, el sistema pasará al estado **M0.6**, el cual inicia la fase de sostenimiento. A la par de que este estado se activa, el temporizador de la fase de sostenimiento **T_S** se activa, el cual tiene la función de indicar si el sistema todavía se encuentra en dicha fase. Cabe mencionar que esta segunda etapa tiene un funcionamiento similar a la anterior fase, es decir, se encuentra dividida en dos estados, uno para capturar la temperatura anterior, **M0.6**, y el otro para realizar operaciones, **M0.7**, cada estado con su respectivo temporizador. De igual forma siempre se está revisando la entrada de emergencia y en esta

fase, el estado que cumple dicha función es el **M3.0**. Esta fase se mantendrá operando siempre y cuando el temporizador este activado; cuando este acabe se pasará automáticamente a la fase de enfriamiento.

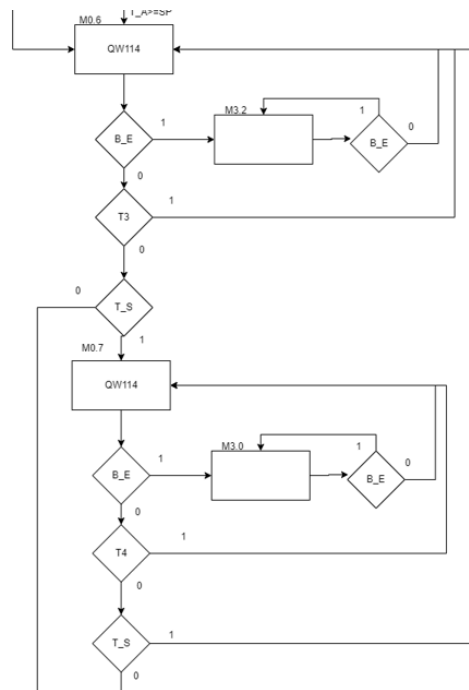


Figura.X Fase de sostenimiento.

Finalmente, la última fase se activa cuando en alguno de los estados de la fase de sostenimiento se acaba el tiempo de dicha fase. La fase de enfriamiento comienza en el estado **M1.3**, siendo este el muestreo, seguido del estado **M1.4** en el cual se realizan las operaciones correspondientes para ajustar la velocidad de enfriamiento. Esta fase se mantendrá activa mientras la temperatura de la flecha no llegue a la temperatura ambiente. Al igual que las fases anteriores se puede pasar al estado de emergencia para apagar la salida, en este caso corresponde al estado **M3.1**. Los temporizadores del muestreo y operaciones son **T5** y **T6** respectivamente.

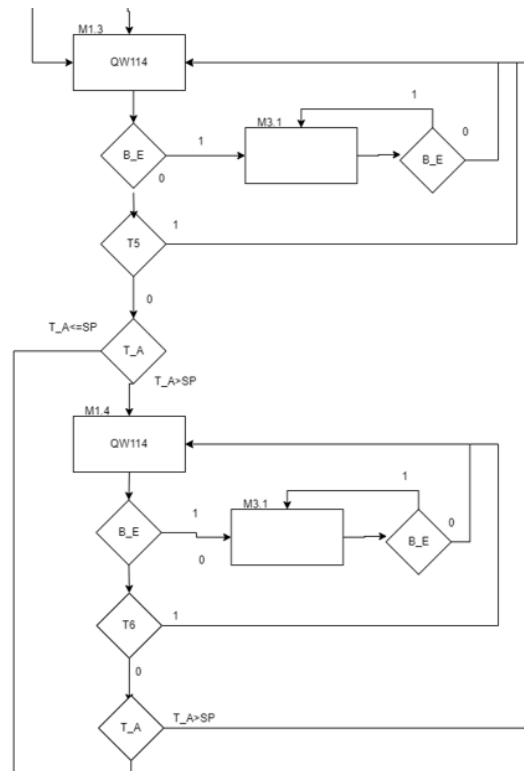


Figura.X Fase de enfriamiento.

Finalmente, cuando el sistema alcance la temperatura ambiente, realizará la transición al estado M2.0, el cual permanecerá activo hasta que el botón de Reset, **I_R** se presione. En el caso en el que se presione automáticamente pasará al estado de inicio **M0.0** a la espera de un nuevo relevado de esfuerzos.

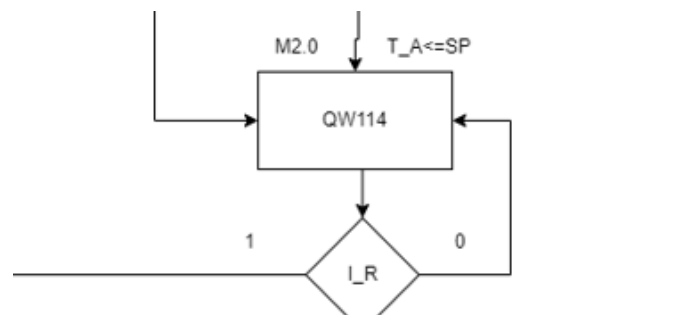


Figura.X Fin del proceso.

Link para visualizar la carta ASM completa:

https://drive.google.com/file/d/1iPD8iIiHbw4mPqUIhMNQMYBf_luq7PTB/view?usp=share_link

e) Obtención de ecuaciones

Parte fundamental para la programación por carta ASM es la formación de las ecuaciones que activarán los estados. A continuación se muestran las tablas de las ecuaciones de dichos estados y las ecuaciones de las salidas.

Tabla X. Ecuaciones de los estados del sistema.

Estado siguiente	Estado presente	Condición	Función
M0.0	M0.0 M2.0	$\overline{IB_I}$ I_R	$M0.0 = M0.0 \overline{IB_I} + M2.0 I_R$
M0.1	M0.0 M0.1 M3.0 M0.2	$\overline{IB_I}$ $\overline{B_E} T1$ $\overline{B_E}$ $\overline{B_E} T2 T_A < SP$	$M0.1 = M0.0 \overline{IB_I} + M0.1 \overline{B_E} T1 + M3.0 \overline{B_E} + M0.2 \overline{B_E} T2 T_A < SP$
M0.2	M0.1 M0.2 M3.0	$\overline{B_E} T1 T_A > SP$ $\overline{B_E} T2$ $\overline{B_E}$	$M0.2 = M0.1 \overline{B_E} T1 T_A > SP + M0.2 \overline{B_E} T2 + M3.0 \overline{B_E}$
M0.6	M0.2 M3.2 M0.6 M0.7	$\overline{B_E} T2 T_A = SP$ $\overline{B_E}$ $\overline{B_E} T3$ $\overline{B_E} T4 T_S$	$M0.6 = M0.2 \overline{B_E} T2 T_A = SP + M3.2 \overline{B_E} + M0.6 \overline{B_E} T3 + M0.7 \overline{B_E} T4 T_S$
M0.7	M0.6 M3.0 M0.7	$\overline{B_E} T3 T_S$ $\overline{B_E}$ $\overline{B_E} T4$	$M0.7 = M0.6 \overline{B_E} T3 T_S + M3.0 \overline{B_E} + M0.7 \overline{B_E} T4$
M1.3	M0.6 M0.7 M1.3 M3.1 M1.4	$\overline{B_E} T3 T_S$ $\overline{B_E} T4 T_S$ $\overline{B_E} T5$ $\overline{B_E}$ $\overline{B_E} T6 T_A > SP$	$M1.3 = M0.6 \overline{B_E} T3 T_S + M0.7 \overline{B_E} T4 T_S + M1.3 \overline{B_E} T5 + M3.1 \overline{B_E} + M1.4 \overline{B_E} T6 T_A > SP$
M1.4	M1.3	$\overline{B_E} T5 T_A > SP$	$M1.4 = M1.3 \overline{B_E} T5 T_A > SP + M3.1 \overline{B_E}$

	$M3.1$ $M1.4$	$\overline{B_E}$ $\overline{B_E} \overline{T6} T_A > SP$	$+ M1.4 \overline{B_E} \overline{T6} T_A > SP$
$M2.0$	$M1.3$ $M1.4$ $M2.0$	$\overline{B_E} 5 T_A \leq SP$ $\overline{B_E} \overline{T6} T_A \leq SP$ $\overline{I_R}$	$M2.0 = M1.3 \overline{B_E} 5 T_A \leq SP + M1.4 \overline{B_E} \overline{T6} T_A \leq SP + M2.0 \overline{I_R}$
$M3.0$	$M0.1$ $M3.0$ $M0.2$ $M0.7$	B_E B_E B_E B_E	$M3.0 = B_E (M0.1 + M3.0 + M0.2 + M0.7)$
$M3.1$	$M1.3$ $M3.1$ $M1.4$	B_E B_E B_E	$M3.1 = B_E (M1.3 + M3.1 + M1.4)$
$M3.2$	$M0.6$ $M3.2$	B_E B_E	$M3.2 = B_E (M0.6 + M3.2)$

Tabla X. Ecuaciones de las salidas del sistema.

Salida	Estados que la habilita	Ecuación
$QW114$	$M0.1, M0.2, M0.6, M0.7,$ $M1.3$ y $M1.4$	$Q8.2 =$ $M0.1 + M0.2 + M0.6 + M0.7 +$ $M1.3 + M1.4$

f) Programación en TIA Portal

Una vez obtenidas las ecuaciones de la estructura general de funcionamiento del sistema, se procedió a realizar la programación en el software de Siemens. El programa cuenta con 59 segmentos de código, los cuales se distribuyen entre parametrización de los datos, establecimiento de tiempos, tratamiento de entradas y salidas analógicas y estados principales del sistema.

Para inicializar el sistema se utiliza el método de ONE-HOT, el cual consiste en colocar una línea con todos los estados negados a un temporizador de 1 milisegundo; esto genera que el primer estado sea verdadero al encender el sistema.

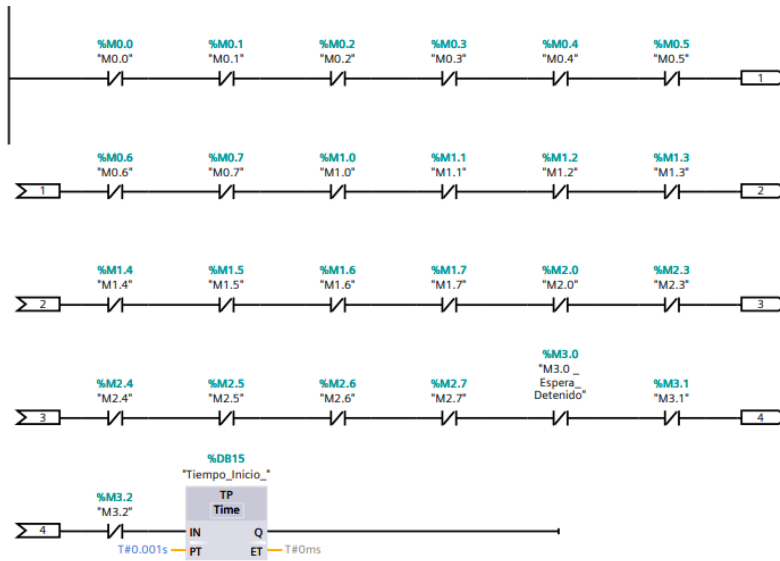


Figura.X Inicialización del programa.

Con el fin de simplificar el sistema se decidió crear una estructura para el botón de emergencia, el cual el botón de Paro manda a Set o 1 la salida y el botón de Continuar manda a Reset o 0 a la salida.

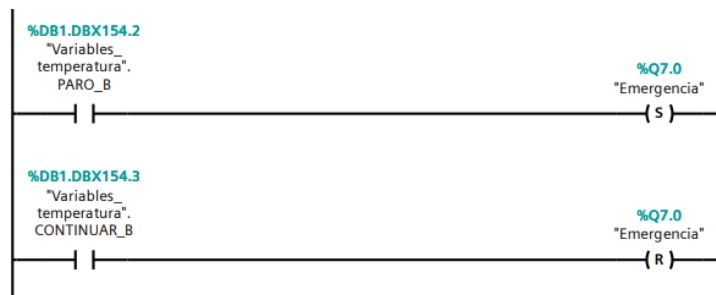


Figura.X Estructura del botón de emergencia.

Uno de los aspectos más importantes del programa es la obtención del valor analógico del termopar. Para esto se utilizó la entrada IW118, la cual al ser de 0 a 10 V es de 14 bits, sin embargo como la señal del termopar va desde 0 a 5V ya acondicionada se utilizó como rango de 0 a 13824 combinaciones. Se realizó el escalado de la señal con dos bloques importantes, NORM_X y SCALE_X. El primero de ellos se encarga de normalizar el dato que le llega dentro del rango establecido, después el segundo bloque escala la variable normalizada y entrega un número real entre 25°C y 800°C.

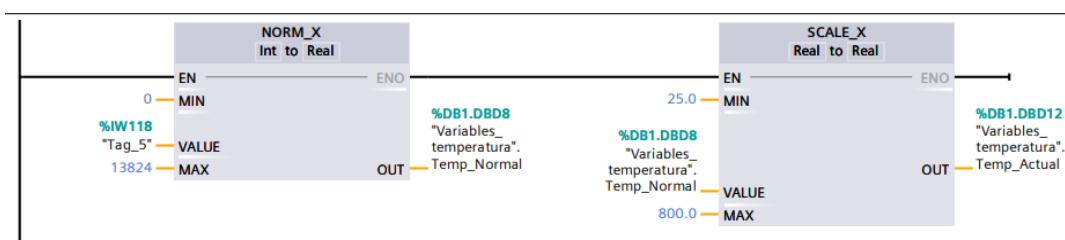


Figura.X. Obtención y conversión de la señal analógica del termopar a temperatura.

Otro aspecto que se consideró fue la salida analógica, la cual se manda a la salida QW114 con el mismo procedimiento que el anterior, solo que en este caso se recibe el dato en variable real y se convierte en bits.

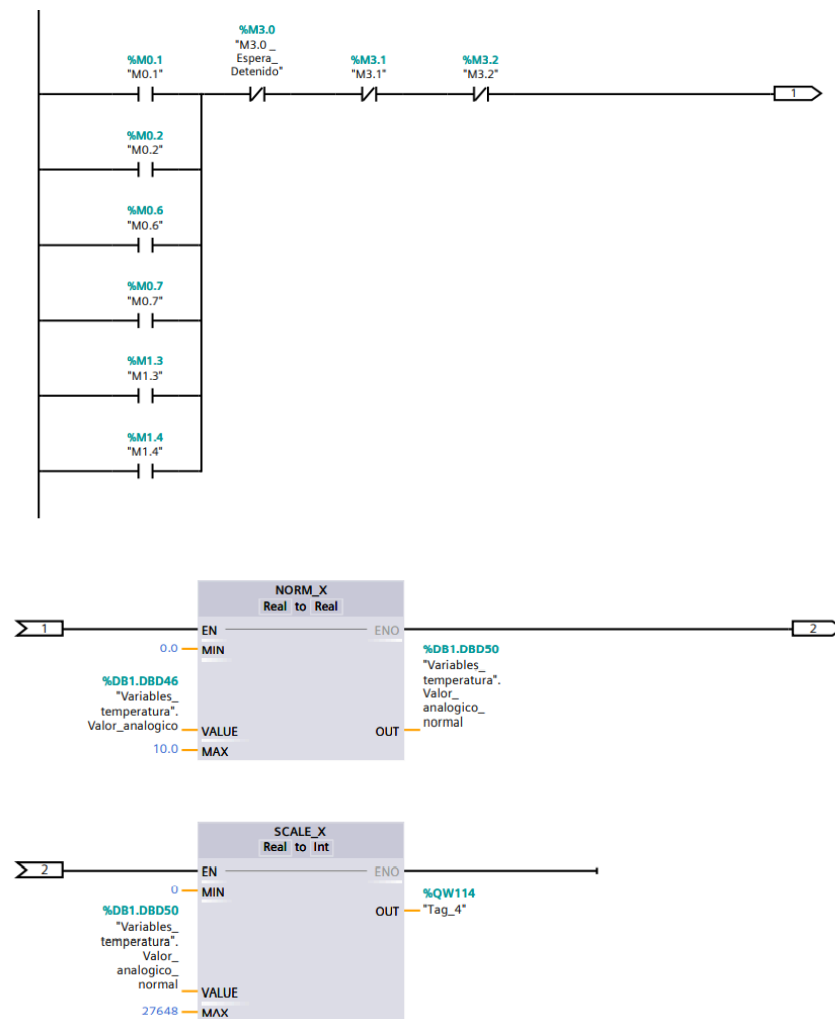


Figura.X. Salida analógica del sistema.

Además de los estados, se realizaron segmentos en los cuales se realizan operaciones para que los parámetros que se ocupen durante el control proporcional estén siempre disponibles y actualizados. A continuación se muestran dichas funciones.

Tabla X. Parametrización de datos.

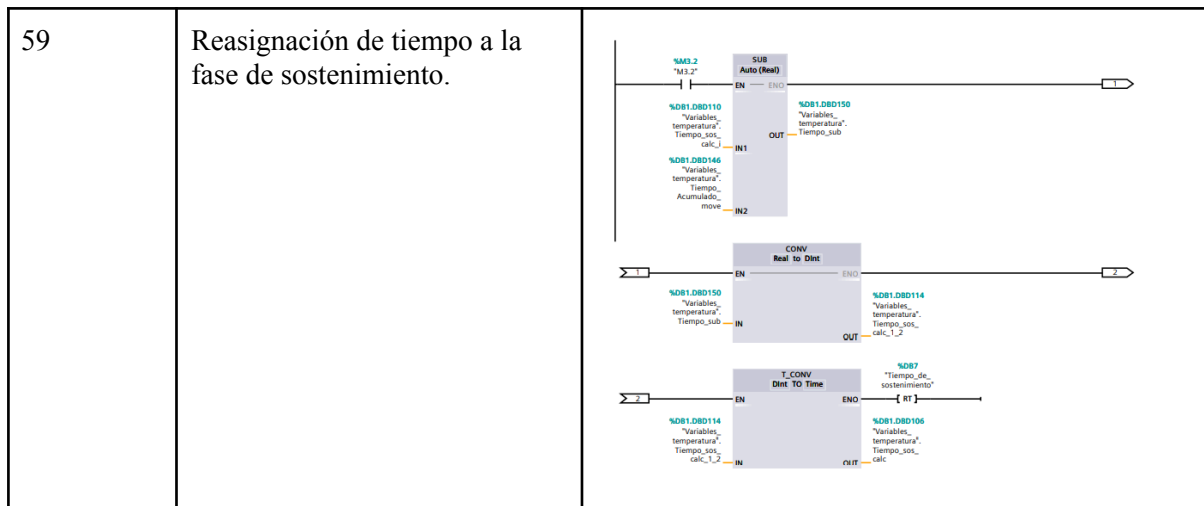
Segmento	Descripción	Código
----------	-------------	--------

1	Obtiene el valor del doble de la velocidad de calentamiento para los casos 1 y 2.	
2	Obtención de las velocidades de calentamiento y enfriamiento	
3	Obtiene el valor del doble de la velocidad de enfriamiento para los casos 4 y 5.	
4	Establece un valor analógico de salida inicial.	
5	Establece un límite para el valor analógico de salida.	

8	Obtiene el valor anterior de temperatura en calentamiento	
9	Obtiene el valor anterior de temperatura en sostenimiento.	
10	Obtiene el valor anterior de temperatura en enfriamiento.	
11	Cálculo de la diferencia de temperaturas en calentamiento.	
12	Cálculo de la diferencia de temperaturas en sostenimiento.	
13	Cálculo de la diferencia de temperaturas en sostenimiento.	

14	Tiempo de muestreo en calentamiento.	
15	Tiempo de muestreo en sostenimiento.	
16	Tiempo de muestreo en enfriamiento.	
17	Tiempo de sostenimiento.	

18	Tiempo acumulado en sostenimiento.	
41	Función de transición Sostenimiento-Enfriamiento	



Se definieron ecuaciones para realizar las operaciones para hacer el ajuste de la salida analógica. Estas ecuaciones dependen de los estados **M0.2**, **M0.7** y **M1.4**, mismos que fueron destinados para realizar los ajustes. Dichas ecuaciones se presentan a continuación.

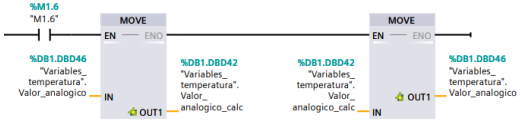
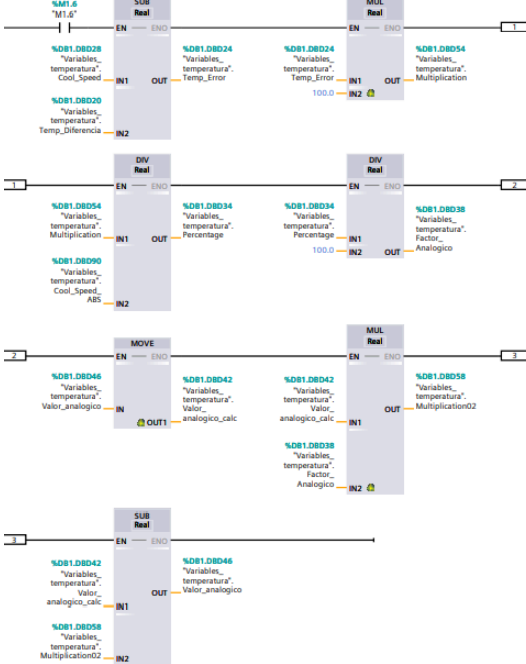
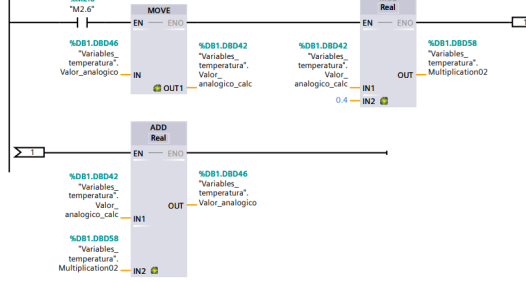
Tabla X. Ecuaciones de las operaciones del sistema..

Estado de operación	Caso al que corresponde	Estados que la habilita	Ecuación
M0.3	1	M0.2	
M0.4	2	M0.2	
M0.5	3	M0.2	
M2.2	4	M0.2	

M2.3	5	M0.2	
M1.0	1	M0.7	
M1.1	2	M0.7	
M1.2	3	M0.7	
M1.5	1	M1.4	
M1.6	2	M1.4	
M1.7	3	M1.4	

M0.5	3	M0.2	
M2.2	4	M0.2	
M2.3	5	M0.2	
M1.0	1	M0.7	

M1.1	2	M0.7	
M1.2	3	M0.7	
M1.5	1	M1.4	
M1.6	2	M1.4	

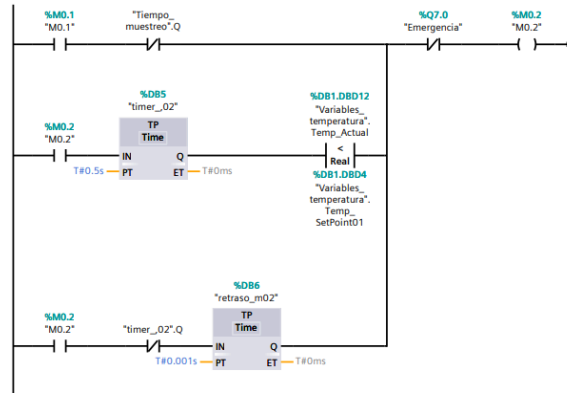
M1.7	3	M1.4	
M2.5	4	M1.4	
M2.6	5	M1.4	

Finalmente, después de definir los parámetros a utilizar, se muestra la programación de los estados que rigen el funcionamiento del sistema.

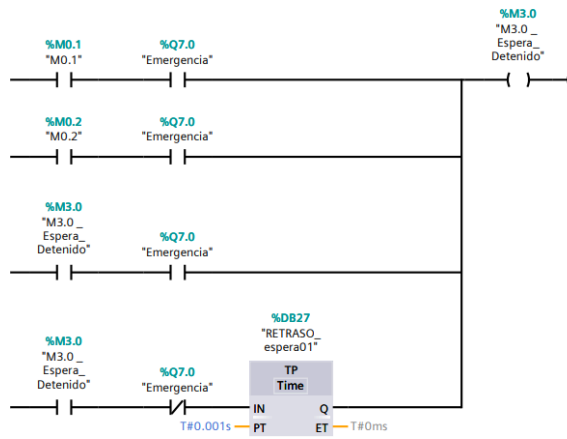
Tabla X. Código de los estados de memoria.

Memoria	Código
M0.0: Estado de espera inicial del sistema. El operador puede introducir datos al HMI.	
M0.1: Estado de muestreo e inicio de la fase de calentamiento.	

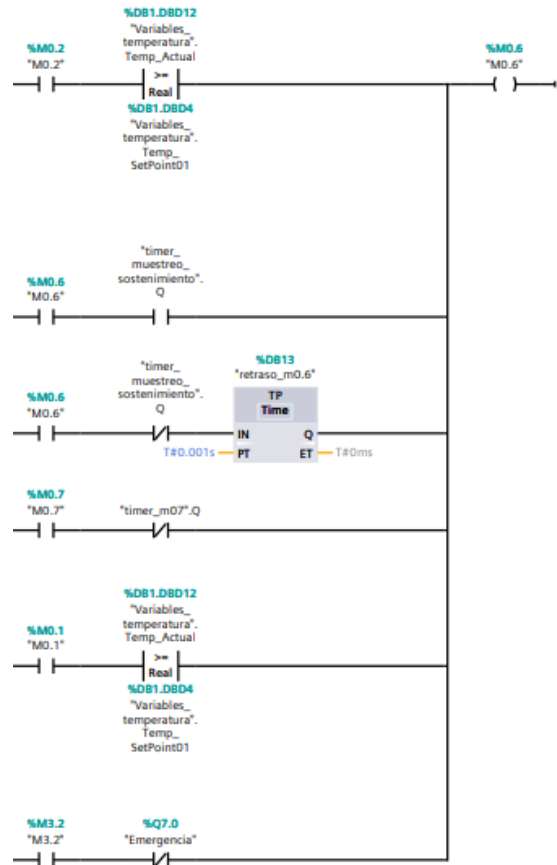
M0.2: Estado que habilita los cálculos en la fase de calentamiento.



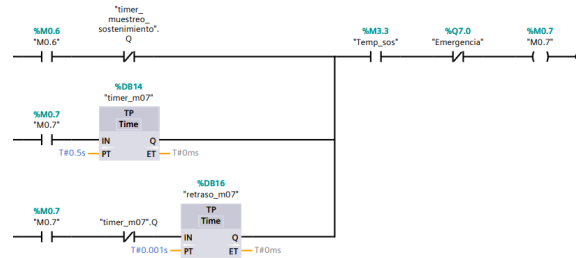
M3.0: Estado de paro para la fase de calentamiento.



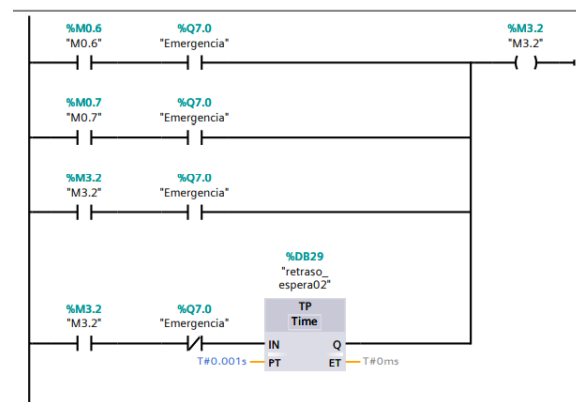
M0.6: Estado de muestreo e inicio de la fase de sostenimiento.



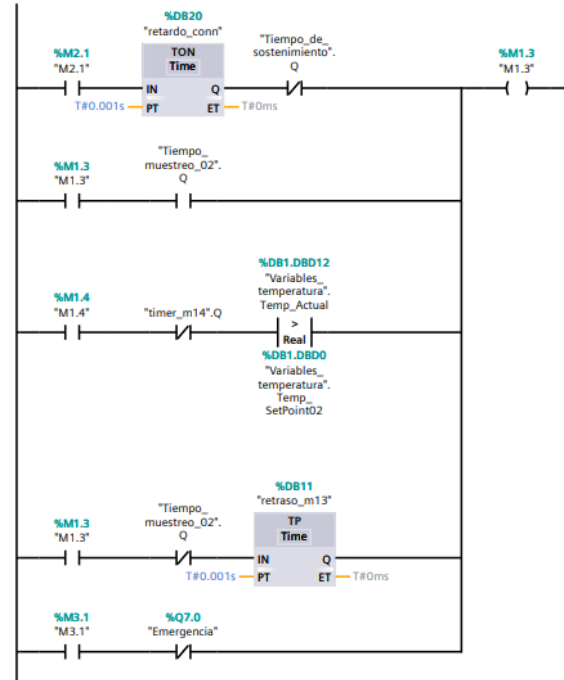
M0.7: Estado que habilita los cálculos en la fase de sostenimiento..



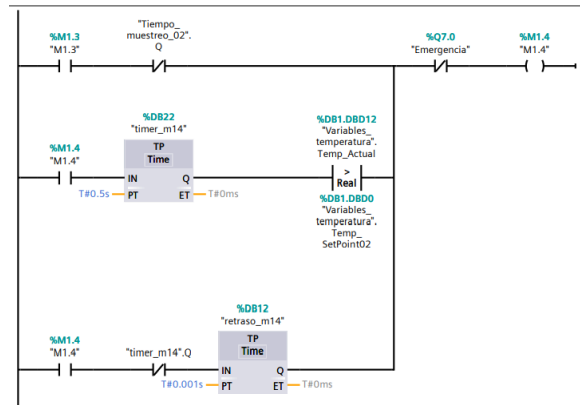
M3.2: Estado de paro para la fase de sostenimiento.



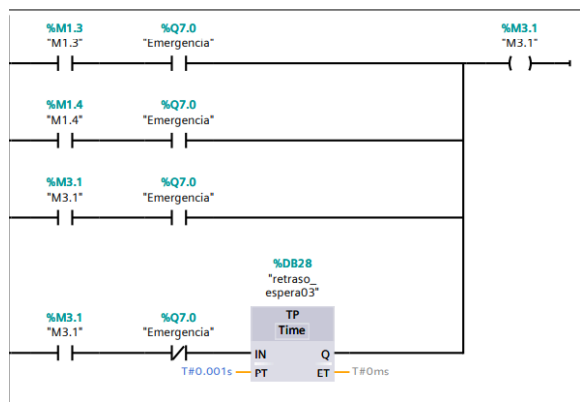
M1.3: Estado de muestreo e inicio de la fase de enfriamiento.



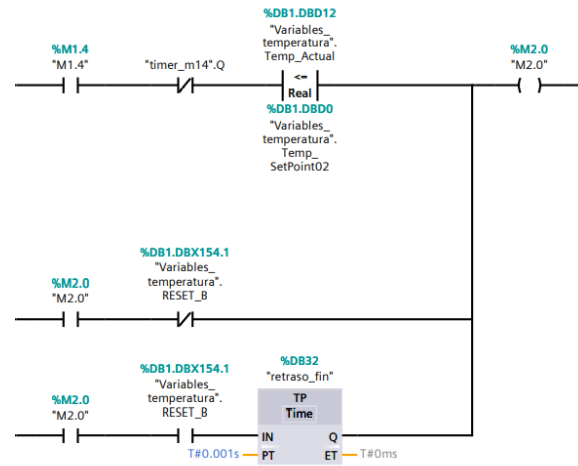
M1.4: Estado que habilita los cálculos en la fase de enfriamiento.



M3.1: Estado de paro para la fase de enfriamiento.



M2.0: Estado de espera final del proceso, es necesario presionar RESET para volver al primer estado.



Link para visualizar el código de forma completa:

https://drive.google.com/file/d/1QQMp38XaIANSFOHkwo_He8i_aLIsRyAE/view?usp=share_link