

6. Automatización de la cápsula de calentamiento.

El calentamiento del vidrio es una parte primordial del proceso ya que se debe realizar en toda su superficie y por ambas caras de manera uniforme, para poder conseguir el mejor templado y evitar grietas o imperfecciones en el vidrio. El horno de templado se encuentra sobre la mesa principal y cuenta con una serie de resistencias colocadas en la parte superior e inferior, para controlar la temperatura en el interior del horno. Para conocer el valor actual de temperatura se colocan termopares en diferentes secciones del horno, estos termopares se conectan directamente a las tarjetas de entradas analógicas del PLC.

Para un mejor control de la temperatura el horno se divide en zona inferior y zona superior, cada zona cuenta con 8 sectores y en cada sector hay un grupo de 4 resistencias, las cuales se agrupan en pares para el encendido a distinto tiempo y obtener así un bajo consumo de energía. En la figura 6.1 se observa la división del horno.

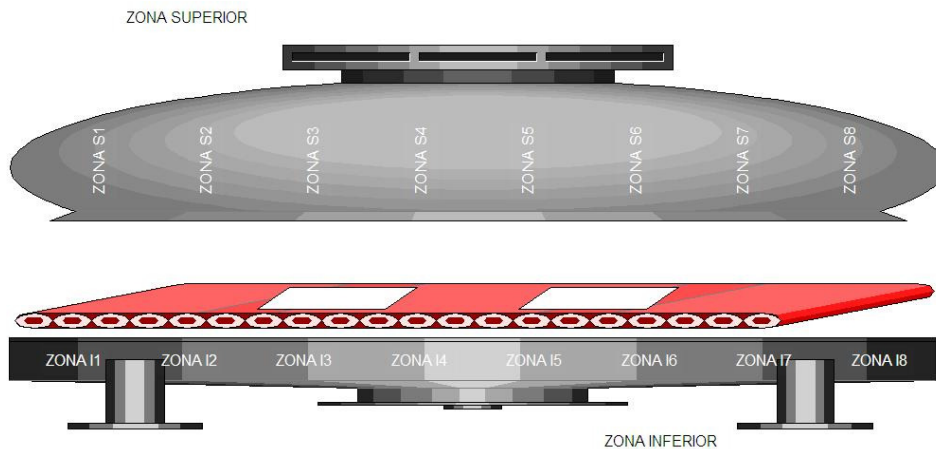


Figura 6.1 División del horno por zonas.

En primer lugar se determina la temperatura a la que se debe encontrar el horno de acuerdo al tipo de vidrio a templar, la cual por lo general debe oscilar entre 550°C y 750°C . El controlador debe asegurarse de que la temperatura establecida se mantenga en cada una de las zonas del horno, ya que el vidrio oscila a lo largo de la mesa principal y debe calentarse de manera uniforme.

Los termopares indican la temperatura del horno en cada una de las zonas, estos valores los recibe el PLC y ejecuta los lazos de control correspondientes para

saber qué resistencias y cuánto tiempo deben permanecer encendidas, con el fin de alcanzar la temperatura deseada, cuando se requiere una temperatura menor a la actual simplemente hay que dejar enfriar el horno hasta alcanzarla.

6.1 Potencia general y por zonas.

Para poder obtener una temperatura uniforme en todo el horno de templado se debe regular el calentamiento de cada zona por medio de las resistencias, de una forma poco funcional se pueden encender las resistencias todo el tiempo hasta que se alcance la temperatura deseada, esto provocaría que el consumo de energía sea alto, para evitar esto el encendido de las resistencias debe ser a diferentes tiempos. Se define un tiempo de ciclo máximo para el encendido de todas las zonas del horno y para cada grupo de resistencias se ajusta un porcentaje de encendido.

Cada zona cuenta con cuatro resistencias las cuales forman dos grupos, estos grupos se deben de encender a distintos tiempos; es decir, cuando el primer grupo está encendido el otro grupo permanece apagado y viceversa. El primer grupo lo forman las resistencias que se encuentran en los extremos de la línea y el otro grupo las que se encuentran en la parte central, como el calor se mantiene más en la zona central del horno el porcentaje de encendido en las resistencias del extremo debe ser mayor.

Cada una de las zonas se enciende por un tiempo específico (100%), se debe ajustar qué porcentaje debe ser para el primer grupo y qué porcentaje es para el segundo grupo, por ejemplo si el tiempo para cada zona es de 5 s y se determina que la relación de porcentaje para las resistencias es 70-30, las resistencias que se encuentran al extremo permanecerán encendidas 3.5 s y cuando éstas se apaguen el otro grupo de resistencias se encenderán por 1.5 s. Lo mismo sucede con las resistencias del grupo B y D de las zonas inferiores en el momento que a la zona le toque el turno de encendido.

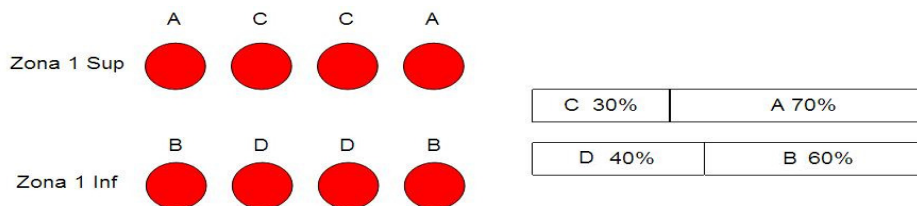


Figura 6.2 Relación de porcentaje de los grupos de resistencias.

Para hacer más eficiente el calentamiento del horno se debe evitar que las resistencias se encuentren encendidas al mismo tiempo, por lo que se genera una rotación del encendido de cada una de las zonas, cuando comienza el ciclo general se enciende la primer zona, tiempo después se enciende la segunda y así sucesivamente hasta cumplir con las 16 zonas del horno y vuelve a comenzar el ciclo.

En primer lugar, el controlador define el tiempo que debe transcurrir para poder encender la siguiente zona, simplemente divide el ciclo máximo definido entre las 16 zonas disponibles. Posteriormente, el controlador comienza activando un bit para encender la primer zona, en ese mismo instante arranca un temporizador con el tiempo establecido para cada zona, cuando el tiempo es cumplido hace una rotación del bit para encender la segunda zona.

Segm. 2): Delay Para Cada Grupo

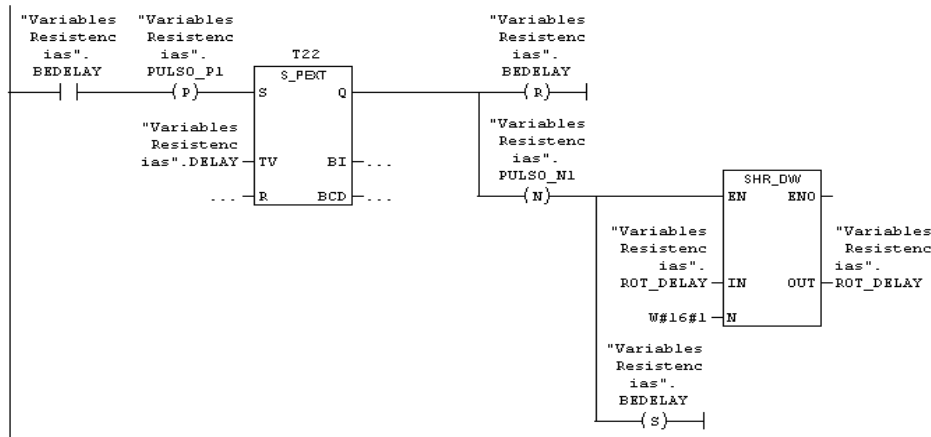


Figura 6.3 Función para el encendido de cada zona.

En la figura 6.3 se muestra la función para realizar el encendido de cada zona del horno. En primer lugar, con un flanco positivo en la señal se activa el temporizador y se desactiva esta señal de inicio. Pasado el tiempo establecido se hace una rotación a la derecha para encender la siguiente zona y se activa la señal para volver a activar el temporizador, posteriormente se hace una comparación para conocer cuál de todas las zonas es la próxima a encenderse.

Una vez determinada la sección del horno que debe calentarse, sus resistencias deben encenderse a tiempos diferentes. En primer lugar, se encienden las resistencias colocadas al extremo durante un tiempo, cuando este tiempo transcurre se apagan estas resistencias y las que se encuentran en el centro se encienden el resto del tiempo definido para cada una de las zonas. Todo el procedimiento anterior se repite para cada una de las zonas del horno.

Puede darse el caso de que en algunas zonas se haya alcanzado la temperatura deseada y en otras no, el controlador debe ser capaz de identificar qué resistencias deben de permanecer encendidas y cuáles apagadas. Las resistencias encienden siempre y cuando el lazo de control indique que es necesario encender cada grupo de resistencias de acuerdo a la temperatura actual del horno.

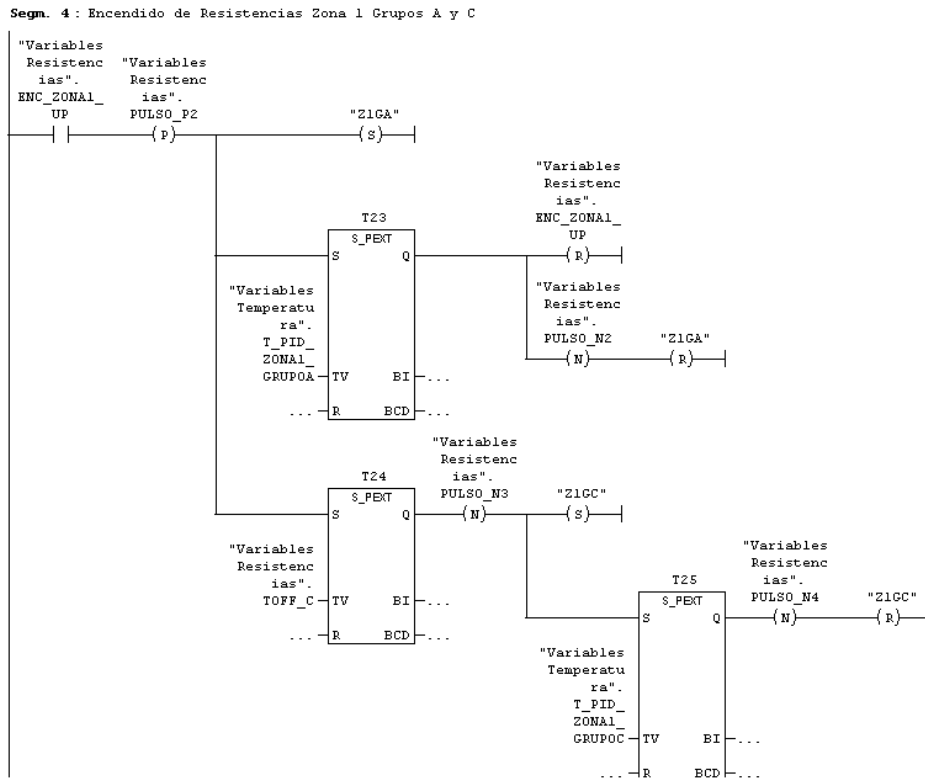


Figura 6.4 Función de los grupos de cada zona.

Todos los tiempos dependen del valor de regulación arrojado por cada uno de los lazos de control, los tiempos para cada temporizador son una fracción del tiempo total de barrido por toda la cápsula de templado. En la figura 6.5 se muestra un ejemplo de los ajustes que realiza el controlador de acuerdo con los datos establecidos, estos valores de tiempo son los que emplean los temporizadores para determinar cuánto deben permanecer las resistencias encendidas

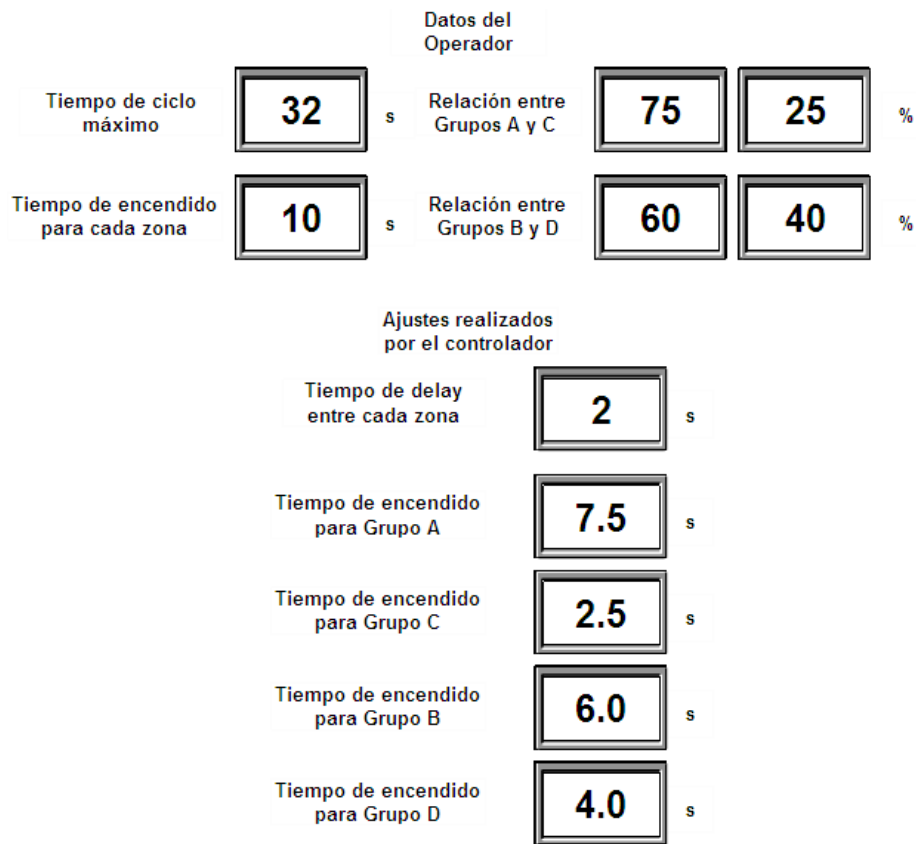


Figura 6.5 Ajustes para los tiempos de encendido de las resistencias para cada zona.

Si se define un ciclo máximo de 32 s, el controlador divide este tiempo entre las 16 zonas del horno para conocer cada cuánto tiempo debe encender las zonas, en este caso cada 2 segundos se debe encender una nueva zona comenzando por la zona superior 1 y terminando por la zona inferior 1. Otro factor que se ajusta es el tiempo de encendido para cada zona y los porcentajes para cada grupo de resistencia, por lo tanto el tiempo que duran encendidas las resistencias del grupo es el 75% del tiempo de encendido de toda la zona, para este ejemplo sería de 7.5 s, y el tiempo para el grupo C sería de 2.5 s. Los grupos A y C están definidos para la zona superior y los grupos B y D para la zona inferior como se muestra en la figura 6.2

Cuando se inicia el control del calentamiento inicia la rotación del encendido de cada zona del horno, en primer lugar se enciende la zona S1, después de 2 s se enciende la zona S2 y así sucesivamente hasta llegar a la zona S8,

posteriormente inicia la zona I8 y después de 2 s la zona I7 y continua hasta terminar el ciclo y volver a comenzar una vez más.

Al activarse la zona S1, el grupo A se enciende durante 7.5 s una vez terminando este tiempo el grupo A se apaga y se enciende el grupo C durante 2.5 s, terminado este tiempo se apaga el grupo C y permanece apagada la zona S1 hasta que el ciclo se complete nuevamente y vuelva a ser su turno de encendido. Este procedimiento lo realiza en cada una de las zonas.

Los datos respecto al tiempo que debe permanecer encendido cada uno de los grupos en el ejemplo anterior son los ideales, cuando los lazos de control de cada zona indican un 100% en su valor de regulación, esto únicamente se da cuando existe una gran diferencia entre el *setpoint* ajustado y el valor real de temperatura. Los tiempos para cada grupo dependen del valor de regulación entregado por el PID correspondiente, por lo que cada tiempo será un porcentaje del total establecido en el sistema SCADA. Por ejemplo si el lazo de control indica que sólo se deben encender las resistencias un 50% entonces el tiempo para el grupo A no será de 7.5 s sino de 3.75 s y el tiempo para el grupo C cambiará de 2.5 s a 1.25 s.

6.2 Lazos de control para cada zona.

Los lazos de control se utilizan para regular el tiempo de encendido de las resistencias de acuerdo a la diferencia de temperatura actual con la requerida por el operador. En cada zona se tiene un termopar para conocer su temperatura actual, éstos envían la señal a las tarjetas analógicas del controlador por medio de una señal de corriente de 4 a 20 mA.

El termopar toma la lectura física de la temperatura del horno y escala los valores en una señal analógica de corriente, al adquirir los termopares se deben especificar los rangos de lectura que se desean utilizar para obtener una lectura confiable de la señal. En este caso los termopares permiten obtener lecturas de 0°C a 800°C.

Por otro lado, dado que el controlador recibe la lectura como una señal analógica, para poder hacer un análisis correcto y que el lazo de control realice su función de manera efectiva, es necesario indicar cuál es la magnitud obtenida en términos de temperatura y no de Amperes, para ello es necesario emplear una función de escalamiento para cada uno de los termopares, es decir programar una función de conversión de corriente-temperatura.

El controlador cuenta con una función de escalamiento que cumple con la conversión requerida. La ecuación insertada en el bloque de escalamiento, así como la explicación de su funcionamiento, son las siguientes.

La función escalar valores (SCALE) toma un valor entero en la entrada IN y lo convierte en un valor real, convirtiéndolo a escala en un rango comprendido entre un límite inferior y un límite superior (LO_LIM y HI_LIM). El resultado se escribe en la salida OUT. La función SCALE aplica la siguiente fórmula:

$$OUT = [(FLOAT(IN) - K1) / (K2 - K1)] * (HI_LIM - LO_LIM) + LO_LIM$$

Las constantes K1 y K2 se aplican de forma diferente, dependiendo de si el valor de entrada es BIPOLAR o UNIPOLAR.

BIPOLAR: Se supone que el valor entero de entrada debe estar entre -27648 y 27648, por lo tanto, K1 = -27648.0 y K2 = 27648.0

*UNIPOLAR: Se supone que el valor entero de entrada debe estar entre 0 y 27648, por lo tanto, K1 = 0.0 y K2 = 27648.0*⁸

Como se indica en el texto anterior los datos enteros de entrada deben de estar entre 0 y 27648 o entre -27648 y 27648. Para obtener estos valores el controlador por medio del direccionamiento de su tarjeta de señales analógicas convierte la intensidad de corriente recibida por el termopar en un señal digital, en este caso una palabra de 16 bits para poderla interpretar de forma correcta.

Las tarjetas analógicas son capaces de interpretar distintos tipos de señales: tensión, intensidad de corriente, resistencia y termo resistencia, y además son capaces de ajustarse a diferentes rangos de lectura. Estos ajustes se hacen por software y hardware. En el caso del hardware las tarjetas analógicas cuentan en la parte lateral con una clave codificada de ajustes, con la que de acuerdo a su posición es el tipo de señal que pueden interpretar.

En la herramienta de configuración de hardware mostrada en la figura 6.6, se ajustan el tipo de señal y el rango de lectura que se desea tener, para los termopares el tipo de señal seleccionado es intensidad y el rango es de 4 a 20 mA.

⁸ Ayuda de funciones estándar, Step7 V5.4 SP5 Escalar valores (SCALE): FC105

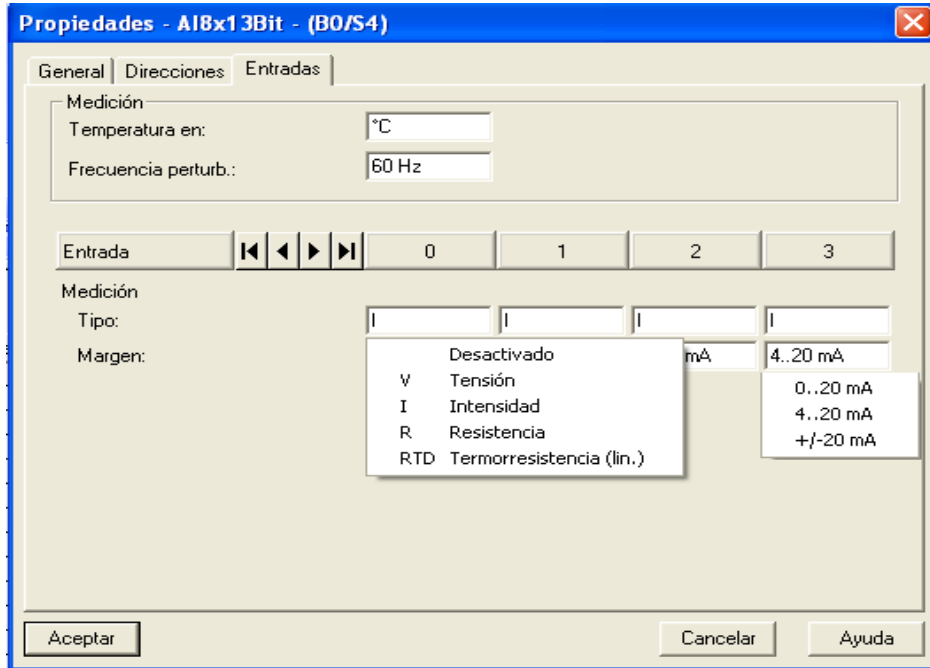


Figura 6.6 Ajustes para las tarjetas de señales analógicas.
Hardware Configuration – Step7

En cada tarjeta se asignan direcciones para poder conocer el valor que se recibe del termopar, estas direcciones funcionan como la entrada de las funciones de escalamiento. Las tarjetas empleadas son de 8 señales analógicas, suponiendo que el controlador le asigna direcciones entre 256 y 271 a una tarjeta, significa que la dirección de la primera señal analógica es la 256 y como entrega valores de 16 bits (palabra) la siguiente señal tiene la dirección 258 y así sucesivamente hasta la octava señal que adquiere la dirección 270.

Con estos datos la función de escalamiento se muestra en la figura 6.7, donde PIW 272 es una de las temperaturas, 800 es su límite superior y 0 el límite inferior (rangos de temperatura permitidos en el horno), el arreglo de contactos define la entrada como unipolar y en OUT se obtiene el valor de temperatura escalado.

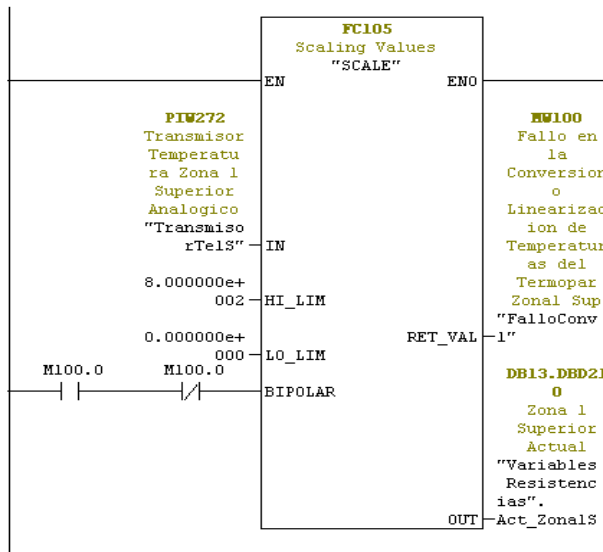


Figura 6.7 Función para escalar señales analógicas.

El lazo de control requiere el valor de la temperatura deseada, dicho valor lo toma del sistema SCADA en donde es ajustado de acuerdo al tipo de vidrio y forma que se debe templar. Al igual que para realizar el escalamiento, el controlador cuenta con funciones de lazos de control y regulación de los datos obtenidos. Para realizar una regulación correcta, el bloque de función se debe programar en un bloque cíclico el cual se ejecuta cada determinado tiempo.

Los bloques de lazo de control y regulación cuentan con una gran cantidad de parámetros que se pueden modificar. Basándose en un ejemplo incluido en el software de programación, se llegó a la conclusión de que indicando únicamente la temperatura actual y el setpoint deseado, el lazo de control entrega valores confiables. Posteriormente, se utilizan algunos datos del bloque PID como entrada del bloque de regulación.

Los bloques PID necesitan estar ligados a un bloque de datos en donde van guardando los datos de la regulación para ejecutar los cálculos correspondientes. En dicho bloque de datos se deben ajustar los valores de ganancia proporcional, tiempo de integración, tiempo de acción derivativa y tiempo de muestreo, así como algunos otros valores que no se modifican por el análisis previo empleando un programa de ejemplo incluido en el software.

DB-Param - [DB61 -- Ducktech3\CHAE261207\CPU 317-2 PN/DP]

Bloque de datos Edición Sistema de destino Test Ver Ventana Herramientas Ayuda

Tiempo de muestreo: 0.1 s Ancho de zona muerta: 0

Valor real

Activar periferia Factor: 1

Modo de operación periferia: Estándar Offset: 0

Parámetros PID

Ganancia proporcional: 6.48 Factor al cambiar el valor de consigna: 1

Tiempo de integración: 3.16 s

Tiempo acción deriv.: 0.79 s Factor de acción derivativa: 5

Inicializar acción I Valor de inicialización: 0 %

Zona de regulación

Activar Ancho: 100

Valor manipulado

Límite superior: 100 % Factor: 1

Límite inferior: 0 % Offset: 0

Generador de impulsos

Activar Duración mín. impulso/pausa: 0 s

Tiempo de muestreo: 0.02 s Periodo: 1 s

Figura 6.8 Bloque de datos para cada lazo de control.

Para cada termopar se tiene un bloque de lazo de control que es un bloque de regulación de temperatura continua, el cual sirve para regular procesos de temperatura con control continuo o en forma de impulso. Mediante parametrización se pueden activar o desactivar funciones parciales del regulador PID para adaptarlo al proceso de regulación.

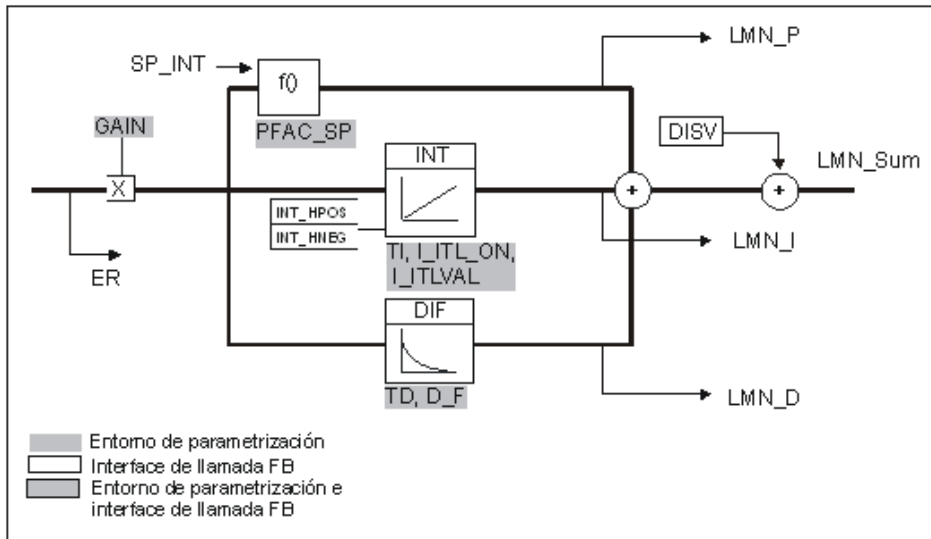


Figura 6.9 Algoritmo PID para el bloque de lazo de control.

El algoritmo PID trabaja en el algoritmo de posición. Las acciones proporcional, integral (INT) y derivativa (DIF) están conectadas en paralelo y pueden activarse y desactivarse por separado. De este modo se pueden parametrizar reguladores P, PI, PD y PID. La optimización del regulador es compatible con los reguladores PI y PID. La inversión del regulador se efectúa mediante un parámetro GAIN negativo (regulador de refrigeración). Si pone a 0.0 TI y TD, obtendrá un regulador P puro en el punto de trabajo.

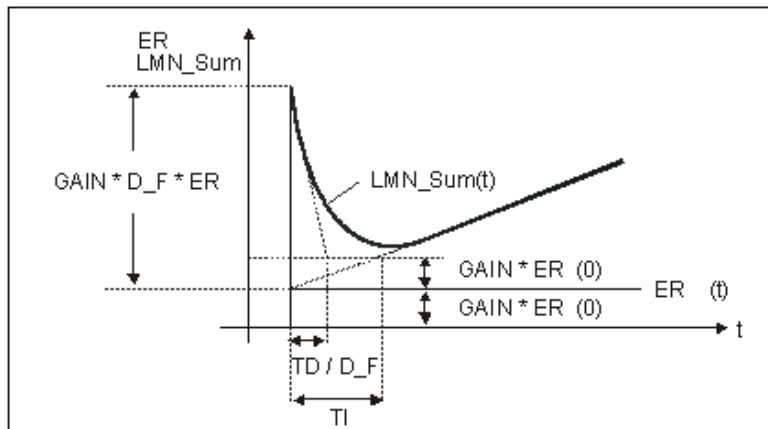


Figura 6.10 Respuesta inicial en el margen del tiempo.

La respuesta indicial en el margen del tiempo presenta las siguientes señales. $LMN_Sum(t)$, es la magnitud manipulada en modo Automático del regulador. $ER(0)$ es la amplitud del escalón del error de regulación normalizado. $GAIN$ es la ganancia del regulador. TI es el tiempo de acción integral. TD es el tiempo de acción derivativa. D_F es el factor de acción derivativa.⁹

El lazo de control utiliza un bloque adicional para obtener el valor de acción sobre las resistencias en forma de porcentaje, la señal valor manipulado entregada por el primer bloque actúa como entrada del segundo bloque obteniendo como resultado el porcentaje del tiempo total establecido que se deben encender las resistencias.

Entre más grande sea la diferencia de temperaturas, por ejemplo una temperatura actual de 500°C y se requiere una temperatura de 600°C, el bloque tendrá en su salida un valor de 100% del tiempo, para que se enciendan todas las resistencias y se pueda alcanzar los 600°C de manera rápida. Si se toman los datos mostrados en la figura 6.5, el grupo A permanecerá encendido durante 7.5 s y el grupo C durante 2.5 s que son los valores planteados, pero en cuanto la temperatura aumenta la salida del lazo será mucho menor, suponiendo que ya se alcanzó una temperatura de 580°C el bloque indicará un porcentaje menor, por ejemplo 25%, con lo que las resistencias del grupo A sólo encenderán 1.875 s y las del grupo C encenderán 0.625 s.

⁹ Ayuda de funciones estándar, Step7 V5.4 SP5 Regulación de temperatura continua con el FB 58 "TCONT_CP"

```

CALL "TCONT_CP" , "Zonal Sup"
PV_IN := "Variables Resistencias".Act_Zonals
PV_PER :=
DISV :=
INT_HPOS:=
INT_HNEG:=
SELECT :=
PV :=
LMN :=
LMN_PER :=
QPULSE :=
QLMN_HLM:=
QLMN_LLM:=
QC_ACT :=
CYCLE :=
CYCLE_P :=
SP_INT := "Variables Resistencias".Zonals_SP
MAN :=
COM_RST :=
MAN_ON :=
NOP 0

CALL "PROC_C" , "Proc_1S"
INV := "Zonal Sup".LMN
DISV :=
AME_TEM:=
GAIN :=
TM_LAG1:=
TM_LAG2:=
TM_LAG3:=
CYCLE :=
OUTV := "Zonal Sup".PV_IN
COM_RST:=

```

```

L "Zonal Sup".LMN DB61.DED18 -- manipulated variable
L 1.000000e+002
/R
L "Variables Resistencias".TMAMA DB13.DED88 -- Tiempo Maximo de Encendido del Grupo A
*R
L 1.000000e+001
*R
TRUNC
DTB
L W#16#1000
+I
T "Variables Temperatura".T_PID_ZONAL_GRUPOA DB14.DEW0 -- Tiempo de Encendido de las Resistencias Zona 1 Grupo A

```

Figura 6.11 Bloques PID y regulación para cada termopar.
Ajuste de tiempo de encendido para cada grupo de resistencias.

Todos estos elementos permiten la regulación de la temperatura de la cápsula de calentamiento del horno de templado, de modo que en todo momento se mantenga una temperatura equilibrada en cada una de las zonas, y por

consiguiente se obtenga el mejor templado posible sobre los distintos tipos de vidrio.

6.3 Calentamiento inicial de la cápsula.

El horno de templado fue utilizado anteriormente en otro país y fue trasladado vía marítima a la empresa en Guadalajara. Al transportar el equipo en barco la porcelana de la cápsula de calentamiento es propensa a adquirir cierta humedad, por lo que antes de encender el horno y llevarlo a su máxima capacidad de temperatura, éste debe realizar un primer calentamiento de forma gradual y durante un tiempo considerable, de forma que se evite tener algún tipo de fisura o incluso una rotura mayor en sus paredes interiores, lo que impediría poder conservar el calor adecuadamente.

Cuando se realiza este procedimiento se dice que “se hace llorar a la cápsula” debido a que, al aumentar de forma gradual la temperatura al interior de la cápsula, en las paredes se comienza a evaporar el agua que tiene debido a la humedad adquirida, haciendo que dicha agua comience a escurrir sobre las paredes exteriores.

Este calentamiento inicial se realiza en 4 días, ya que se aumentan sólo 10°C por hora y se debe alcanzar la temperatura máxima de 800°C. Además en ciertas temperaturas definidas se debe mantener la temperatura por 6 horas y posteriormente continuar con el incremento de cada hora.

En primer lugar se asigna un *setpoint* de 30°C y se habilita la señal para el calentamiento inicial, el controlador tiene una función donde se puede conocer en todo momento la hora con la que se hacen las comparaciones para realizar un incremento en el *setpoint*. La función del sistema permite obtener la fecha y hora del PLC, dicha función entrega la información en una variable de 64 bits u 8 bytes, cada uno de éstos indica un valor en específico de la siguiente manera.

Al activarse el bit de calentamiento inicial, el valor del *setpoint* ajustado en el sistema SCADA es tomado y funciona como el primer valor de ajuste para los PIDs.

Se definen 3 temperaturas en las que el horno debe mantener por más tiempo ese valor, estas temperaturas son 200°C, 400°C y 600°C. Cuando la temperatura llega a estos valores, el controlador evita que se incremente 10°C el *setpoint* durante una hora.

Byte	Contenido	Margen
0	Año	90 ... 89, es decir, los años 1990 hasta 2089
1	Mes	01 ... 12
2	Día	1 ... 31
3	Hora	0 ... 23
4	Minuto	0 ... 59
5	Segundo	0 ... 59
6	2 MSD de ms	00 ... 99
7 (4 MSB)	LSD de ms	0 ... 9
7 (4 LSB)	Día de la semana	1 ... 7 (1 = Domingo)

Tabla 6.1 Representación de los bytes del tipo de datos Date and time.

Una vez alcanzada la temperatura máxima, el horno se deja enfriar por un par de días hasta alcanzar una temperatura alrededor de 550°C en ese momento la cápsula se encuentra lista para poder trabajar de forma normal de acuerdo al vidrio que se debe templar.