

Trabajo Fin de Grado

Automatización y supervisión de un horno eléctrico
para la obtención de muestras de aluminio.

Automation and supervision of an electric furnace
to obtain aluminium samples.

Autor/es

Alberto Alquézar Montañés

Director/es

Ramón Piedrafita Moreno

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo el diseño de un controlador PID para regular la temperatura de un horno de muestras de aluminio, dicho horno se encarga de fundir muestras representativas de diferentes materias primas que contienen principalmente aluminio (chatarras). El objetivo del proceso es obtener una pequeña probeta que, tras un proceso de pulido, se analiza en un espectrómetro de luz y así, determinar la composición porcentual de aluminio y otros metales presentes. Los resultados obtenidos de dichas analíticas permiten clasificar la materia prima, que posteriormente es sometida a un proceso de fundición para producir aluminio en forma de lingotes, ajustándose a las especificaciones requeridas por los clientes.

En la actualidad, existe un cuello de botella en el proceso de obtención de las probetas provenientes de las muestras de los diferentes camiones que arriban a las instalaciones. Este problema se debe a que únicamente se dispone de un horno de muestras operativo, lo que limita la capacidad de procesamiento, ante esta necesidad, me cuestiono si fuera posible crear un control PID aplicable a un horno de muestras eléctrico que lleva fuera de servicio hace muchos años.

En el horno de muestras operativo se lleva a cabo un ensayo experimental con el objetivo de determinar la naturaleza de la función y los parámetros característicos del sistema térmico, estos datos servirán como base para el desarrollo del controlador PID. En concreto, se busca obtener la función de transferencia del sistema, la cual permitirá realizar un análisis exhaustivo mediante diferentes métodos de sintonización. De esta manera, será posible ajustar los valores característicos del controlador PID según las necesidades específicas del proceso.

El controlador estará integrado en un programa de autómatas y será gestionado y supervisado a través de una interfaz hombre-máquina (HMI), desde esta interfaz se podrán realizar una variedad de funciones, como modificar el setpoint del horno, configurar los parámetros del PID, ejecutar procesos de calentamiento automático, gestionar los avisos y alarmas, así como llevar a cabo diferentes sintonizaciones del controlador. Además, permitirá introducir los parámetros de otros sistemas térmicos para obtener directamente los valores óptimos del controlador, garantizando una regulación precisa y adecuada para cada caso.

ABSTRACT

The goal of this project is to design a PID controller to regulate the temperature of an aluminum sample furnace. This furnace is used to melt representative samples of various raw materials that primarily hold aluminum (scrap). The goal of the process is to obtain a small test piece which, after a polishing procedure, is analyzed using a light spectrometer to decide the percentage composition of aluminium and other metal present. The analytical results obtained from this process allow for the classification of the raw material, which is then subjected to a smelting process to produce aluminum in the form of ingots, tailored to the specifications required by the clients.

Currently, there is a bottleneck in obtaining test pieces from the samples of the different trucks that arrive at the facilities. This problem is because there is only one operational sample furnace, which limits the processing capacity, faced with this need, I wonder if it would be possible to create a PID control applicable to an electric sample furnace that has been out of service for many years.

An experimental test is conducted in the operational sample furnace with the aim of deciding the nature of the function and the characteristic parameters of the thermal system. These data will serve as a basis for the development of the PID controller. Specifically, the aim is to obtain the transfer function of the system, which will allow an exhaustive analysis to be conducted using different tuning methods. In this way, it will be possible to adjust the characteristic values of the PID controller according to the specific needs of the process.

The controller will be integrated into a PLC program and will be managed and supervised through a human-machine interface (HMI). From this interface a variety of functions can be performed, such as changing the furnace setpoint, configuring the PID parameters, executing automatic heating processes, managing warnings and alarms, as well as conducting different controller tunings. In addition, it will allow the parameters of other thermal systems to be entered to directly obtain the best values of the controller, guaranteeing precise and right regulation for each case.

Han sido tiempos complicados. Compaginar los estudios de un grado universitario con el desempeño laboral ha supuesto renunciar a muchas cosas importantes en mi vida. Sin embargo, haber llegado hasta aquí y culminar la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado me llena de una profunda satisfacción. Por ello, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a:

En primer lugar, al Sr. Ramón Piedrafita Moreno, por su invaluable orientación académica durante la realización de este trabajo. Su disponibilidad constante y sus valiosos consejos me han guiado y permitido resolver cada una de mis inquietudes con confianza y claridad.

A mis padres, porque gracias a la mentalidad basada en el trabajo y la constancia que me inculcaron, he podido alcanzar mis objetivos y superar cada desafío en el camino.

A mis hijos, Paloma y Javier, por su comprensión y paciencia. Gracias por entender que papá siempre estaba trabajando y por aceptar que no siempre podía dedicarles todo el tiempo que hubiera deseado.

Y, sobre todo, a mi esposa, Blanca, el pilar de nuestra familia. Gracias por ser mi guía, por estar siempre a mi lado, especialmente en los momentos más difíciles, y por no permitirme rendirme cuando sentía que no tenía fuerzas para seguir estudiando y trabajando.

A todos, ¡gracias!

INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
	1.1 MOTIVACIÓN	1
	1.2 OBJETIVOS	2
2	EL ALUMINIO, SUS ALEACIONES Y EL PAPEL DE DERICHEBOURG ESPAÑA	4
	2.1 EL ALUMINIO	4
	2.2 PROPIEDADES DEL ALUMINIO	6
	2.3 ALEACIONES DE ALUMINIO	7
	2.4 DERICHEBOURG ESPAÑA Y EL ALUMINIO	9
3	LOS SISTEMAS DE CONTROL Y A LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	18
	3.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL	18
	3.2 LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	20
4	IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA TÉRMICO	22
5	TEORÍA DE LOS SISTEMAS DE PRIMER ORDEN CON RETARDO	25
	5.1 RESPUESTA AL ESCALÓN EN SISTEMA DE PRIMER ORDEN CON RETARDO	25
	5.2 RESPUESTA A LA RAMPA DE SISTEMA DE PRIMER ORDEN CON RETARDO	26
	5.3 ANÁLISIS DEL RÉGIMEN TRANSITORIO O DINÁMICO	27
6	CONTROLADORES PID	28
	6.1 INTRODUCCIÓN	28
	6.2 ACCIÓN PROPORCIONAL	30
	6.3 ACCIÓN INTEGRAL	30
	6.4 ACCIÓN DERIVATIVA	31
7	SINTONIZADO DE CONTROLADORES PID	32
	7.1 AJUSTE BASADO EN MODELOS	32
	7.1.1 SINTESIS DIRECTA	32
	7.1.2 IMC – MODELO DEL CONTROL INTERNO	33
	7.1.3 CONTROL IMC REALIZADO POR SKOGESTAD	39
	7.2 AJUSTE BASADO EN ENSAYOS EXPERIMENTALES	39
	7.2.1 SINTONIZACIÓN PID CUANTITATIVA (ZIEGLER & NICHOLS)	39
	7.2.2 SINTONIZACIÓN PID (COHEN & COON)	40
	7.3 SIMULACIÓN DE LOS SINTONIZADOS DEL PID	40
	7.4 CONCLUSIONES TRAS LA SIMULACIÓN DE LOS SINTONIZADOS.	53
8	AUTÓMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES	55
	8.1 INTRODUCCIÓN A LOS AUTÓMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES	55
	8.2 HARDWARE	57
	8.3 CONEXIONADO ELÉCTRICO	58
	8.4 HERRAMIENTAS DE PROGRAMACIÓN	63
	8.5 ASPECTOS BÁSICOS PARA LA PROGRAMACIÓN DEL PLC	66
	8.6 LIBRERÍAS ADICIONALES	69
9	PROGRAMA DEL PLC	70
	9.1.1 PID Y PROGRAMA DE SIMULACIÓN	71
	9.1.2 PROGRAMA PRINCIPAL	76
	9.1.3 FUNCIONES DE LA PANTALLA HMI PROGRAMADAS EN EL PLC	82
10	PROGRAMACIÓN DE LA PANTALLA HMI	85
	10.1 ASPECTOS BÁSICOS PARA LA PROGRAMACIÓN DE PANTALLAS HMI	85
	10.2 PANTALLA PRINCIPAL	87
	10.3 PID BÁSICO	88
	10.4 PID EXPERTO	89
	10.5 SINTONIZADO	90
	10.6 CALENTAMIENTO AUTOMÁTICO	91
	10.7 VISOR DE AVISOS	92
11	PROPOSICIÓN DE MEJORAS FUTURAS	94
12	BILIOGRAFÍA	95
13	ANEXO 1	97

INDICES DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de Derichebourg España.....	1
Figura 2. Ejemplo 1 de montón de chatarra de aluminio.....	1
Figura 3. Ejemplo 2 de montón de chatarra.....	2
Figura 4. Horno de muestras no operativo	2
Figura 5. Roca de bauxita	4
Figura 6. Producción mundial de alúmina.....	5
Figura 7. Evolución de la producción mundial de aluminio [5]	5
Figura 8. Principales aleantes del aluminio [9].....	7
Figura 9. Ciclo de la vida del aluminio [11].....	9
Figura 10. Montón de bote limpio	10
Figura 11. Montón de recorte de aluminio prensado	10
Figura 12. Montón de llanta y radiador	10
Figura 13. Fragmentadora de aluminio	11
Figura 14. Útiles para la obtención de probetas	11
Figura 15. Probeta de aluminio	12
Figura 16. Espectrómetro de la marca Thermo.....	12
Figura 17. Análisis químico de una probeta de aluminio	12
Figura 18. Ejemplo de propuesta de fabricación de una aleación.....	14
Figura 19. Proceso de carga del HRB.....	15
Figura 20. Proceso de fusión del HRB.....	16
Figura 21. Colada tras la fusión del HRB.....	16
Figura 22. Horno de mantenimiento.....	17
Figura 23. Línea de montaje de lingotes de aluminio	17
Figura 24. Almacén de producto terminado	17
Figura 25. Entradas y salidas de un sistema de control.....	18
Figura 26. Sistema de control en lazo abierto.....	19
Figura 27. Sistema de control en lazo cerrado	19
Figura 28. Sistema térmico formado por un horno con calentamiento resistivo.....	20
Figura 29. Bloque de la función de transferencia.....	21
Figura 31. Representación gráfica del ensayo.....	23
Figura 32. Representación gráfica de un sistema de primer orden con retardo [16]	23
Figura 33. Respuesta de un sistema de primer orden ante entrada escalón	26
Figura 34. Respuesta de un sistema de primer orden ante entrada rampa.....	27
Figura 35. Representación del polo en el plano complejo	27
Figura 30. Componentes de un regulador PID [15].....	29
Figura 36. Diagrama de bloques del modelo de síntesis directa	32
Figura 37. Diagrama de bloques del método IMC.....	34
Figura 38. Diagrama de bloques del método IMC con modificación.....	35
Figura 39. Diagrama de bloques del controlador K(s).....	36
Figura 40. Valores del PID por defecto en el proceso simulado	41
Figura 41. Respuesta del proceso simulado mediante los parámetros por defecto de Siemens.....	41
Figura 42. Parámetros del controlador PID con los valores tras la optimización fina	42
Figura 43. Respuesta del proceso simulado mediante la optimización fina de Siemens	42
Figura 44. Respuesta del proceso simulado mediante la optimización fina de Siemens bajando el setpoint.	43
Figura 45. Valores del PID según IMC en el proceso simulado.....	44
Figura 46. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado IMC.....	44
Figura 47. Valores del PID según SIMC en el proceso simulado	46
Figura 48. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado SIMC	46
Figura 49. Valores del PI según Ziegler-Nichols en el proceso simulado.....	47
Figura 50. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Ziegler-Nichols	47
Figura 51. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Ziegler-Nichols	48
Figura 52. Valores del PID según Ziegler-Nichols en el proceso simulado	48
Figura 53. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Ziegler-Nichols.....	49
Figura 54. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Ziegler-Nichols con setpoint de 45 °C ..	49
Figura 55. Valores del PI según Cohen-Coon en el proceso simulado.....	50
Figura 56. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Cohen-Coon.....	51
Figura 57. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Cohen-Coon con setpoint de 50 °C	51

Figura 58. Valores del PID según Cohen-Coon en el proceso simulado	52
Figura 59. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Cohen-Coon	52
Figura 60. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Cohen-Coon con setpoint de 43 °C	53
Figura 61. Clasificación de los controladores lógicos [24]	55
Figura 62. Ejemplo de programación en AWL [24]	56
Figura 63. Ejemplo de programación en SCL [25]	56
Figura 64. Ejemplo de programación en LAD [24]	56
Figura 65. CPU del PLC de Siemens más los dos módulos usados en la elaboración del TFG [26]	57
Figura 66. Pantalla HMI KP700 Comfort [27]	58
Figura 67. Conexión vía profinet del hardware	58
Figura 68. Cuadro eléctrico antiguo	59
Figura 69. Dimensiones de la tapa y el mecanizado necesario	59
Figura 70. Imagen del interior del cuadro eléctrico	60
Figura 71. Alimentación del hardware	60
Figura 72. Conexión entrada y salida analógica	61
Figura 73. Conexión salida analógica	62
Figura 74. Conexión entradas digitales	62
Figura 75. Conexión salidas digitales	62
Figura 76. Pantalla principal de Tia Portal	63
Figura 77. Pantalla de primeros pasos en Tia Portal	63
Figura 78. Pantalla de agregar dispositivo en Tia Portal	64
Figura 79. Vista previa del controlador seleccionado	64
Figura 80. Selección de la pantalla HMI	65
Figura 81. Conexión entre pantalla y PLC	65
Figura 82. Formato de la pantalla HMI	66
Figura 83. Dispositivos y redes	66
Figura 84. Agregar nuevo bloque	67
Figura 85. Pantalla principal de programación	67
Figura 86. Instrucciones básicas – General	68
Figura 87. Instrucciones básicas – Temporizadores	68
Figura 88. Instrucciones básicas – Comparación	68
Figura 89. Instrucciones básicas - Funciones matemáticas	69
Figura 90. Tecnología - PID Control	69
Figura 91. Elementos disponibles en esta librería	70
Figura 92. Bloques utilizados en el programa del autómatas	71
Figura 93. Variables usadas en el OB30	71
Figura 94. Segmento 1 del OB30	72
Figura 95. Configuración PID - Ajustes básicos	73
Figura 96. Configuración PID - Ajustes del valor real	73
Figura 97. Configuración PID - Ajustes avanzados	74
Figura 98. Esquema de funcionamiento del programa de simulación	74
Figura 99. Segmento 2 del programa de simulación	75
Figura 100. Segmento 3 del programa de simulación	76
Figura 101. Segmento 4 del programa de simulación	76
Figura 102. Segmento 1 del programa principal	77
Figura 103. Segmento 2 del programa principal	77
Figura 104. Segmento 3 del programa principal	78
Figura 105. Segmento 4 del programa principal	79
Figura 106. Segmento 5 del programa principal	79
Figura 107. Segmento 6 del programa principal	79
Figura 108. Segmento 7 del programa principal	80
Figura 109. Segmento 8 del programa principal	80
Figura 110. Segmento 9 del programa principal	81
Figura 111. Segmento 10 del programa principal	81
Figura 112. Segmento 11 del programa principal	81
Figura 113. Listado de alarmas recogidas en DB10	82
Figura 114. Segmento 4 del FB2	83
Figura 115. Segmento 1 del FB1	84
Figura 116. Segmento 2 del FB1	84
Figura 117. Configuración de la pantalla HMI	85
Figura 118. Herramientas - Objetos básicos	85

Figura 119. Herramientas - Elementos.....	86
Figura 120. Herramientas - Controles	86
Figura 121. Herramientas - Gráficos	86
Figura 122. Imagen principal de la pantalla HMI.....	87
Figura 123. Imagen del PID Básico de la pantalla HMI	88
Figura 124. Imagen del PID Experto de la pantalla HMI.....	89
Figura 125. Imagen de Sintonizado de la pantalla HMI.....	90
Figura 126. Imagen de Calentamiento Automático de la pantalla HMI	92
Figura 127. Imagen de Avisos de la pantalla HMI	93

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mayores productores de aluminio fundido. [6]	6
Tabla 2. Propiedades físicas del aluminio [9]	7
Tabla 3. Propiedades mecánicas del aluminio [9]	7
Tabla 4. Resultados recogidos durante el ensayo	22
Tabla 5. Valores del proceso real	24
Tabla 6. Valores del proceso simulado.....	24
Tabla 7. Ecuaciones para la configuración de un controlador IMC	38
Tabla 8. Ecuaciones para la configuración de un controlador SIMC	39
Tabla 9. Ecuaciones para la configuración de un controlador Ziegler-Nichols	39
Tabla 10. Ecuaciones para la configuración de un controlador Cohen-Coon.....	40
Tabla 11. Parámetros del PID del proceso real mediante el método IMC	44
Tabla 12. Parámetros del PID del proceso simulado mediante el método IMC.....	44
Tabla 13. Parámetros del PID del proceso real mediante el método SIMC.....	45
Tabla 14. Parámetros PID mediante Skogestad	45
Tabla 15. Parámetros del PID del proceso real mediante el método Ziegler-Nichols	46
Tabla 16. Parámetros del PID del proceso simulado mediante el método Ziegler-Nichols.....	47
Tabla 17. Parámetros del PID del proceso real mediante el método Cohen-Coon	50
Tabla 18. Parámetros del PID del proceso simulado mediante el método Cohen-Coon.....	50
Tabla 19. Tipos de datos en PLC Siemens STEP-7 [24]	57
Tabla 20. Variables internas del programa principal OB1	76
Tabla 21. Variables del FB2 Sintonizado en DB14	82
Tabla 22. Variables del DB9 del FB1	84

INDICE DE VIDEOS

Video 1 - Respuesta del proceso simulado mediante parámetros por defecto de Siemens	41
Video 2 - Proceso de optimización fina del software de Tia Portal	42
Video 3 - Respuesta del proceso simulado mediante la optimización fina de Siemens	42
Video 4 - Respuesta del proceso simulado mediante la optimización fina de Siemens bajando el setpoint a 55 °C..	43
Video 5 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado IMC.....	45
Video 6 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado SIMC.....	46
Video 7 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del controlador PI de Ziegler-Nichols.....	47
Video 8 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del controlador PI de Ziegler-Nichols con setpoint de 50 °C.....	48
Video 9 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Ziegler-Nichols	49
Video 10 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Ziegler-Nichols con setpoint 45°C.....	49
Video 11 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Cohen-Coon.....	51
Video 12 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Cohen-Coon con setpoint de 50 °C	51
Video 13 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Cohen-Coon	52
Video 14 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Cohen-Coon con setpoint de 43 °C...	53
Video 15 - Pantalla principal del HMI	88
Video 16 - PID Básico de la pantalla HMI	89
Video 17 - PID Experto de la pantalla HMI	90
Video 18 - Imagen de Sintonizado de la pantalla HMI	91
Video 19 - Imagen Calentamiento Automático de la pantalla HMI.....	92
Video 20 - Imagen de Visor de Avisos de la pantalla HMI	93

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

La idea de la elaboración de este Trabajo Fin de Grado surge por un problema que presenta la empresa Derichebourg España, sita en la localidad de Albalate del Arzobispo (Teruel) como indica la Figura 1, donde ejerzo mi ocupación laboral. Dicha empresa se encarga de producción de aluminio secundario, es decir, recibe diferentes tipos de chatarras y residuos de empresas mecanizadoras de aluminio, ejemplos en la Figura 2 y Figura 3, para producir aleaciones de aluminio según las especificaciones de los clientes. Esta materia prima viene en camiones que al descargar en la campa hay que recoger una muestra y fundirla en un horno de muestras para la obtención de una probeta que posteriormente es analizada en un espectrómetro de luz y así conocer el porcentaje de aluminio y otros metales, estos datos son muy importantes para clasificar esos materiales para realizar posteriormente unas aleaciones de aluminio determinadas.



Figura 1. Ubicación de Derichebourg España

El problema que comentaba anteriormente es que sólo hay operativo un horno de muestras para tal desempeño, y la entrada de camiones se está incrementando debido al aumento de las políticas de reciclado que proporcionan una mejora de la clasificación de los residuos en plantas clasificadoras. Como sólo hay un horno se está produciendo un cuello de botella que se está resolviendo mediante un trabajo prácticamente continuo de dicho horno, que puede provocar averías además del incremento de las horas extraordinarias de los operarios designados a la fusión de muestras.



Figura 2. Ejemplo 1 de montón de chatarra de aluminio



Figura 3. Ejemplo 2 de montón de chatarra

Dado que la capacidad actual de la empresa para el análisis de materiales es limitada y claramente insuficiente, este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo diseñar el control de un horno de muestras que ha permanecido inoperativo durante aproximadamente 20 años, Figura 4. Actualmente, el horno presenta un crisol roto y un regulador de temperatura inoperativo. Por ello, se propone el diseño e implementación de un control PID, condicionado a que la empresa realice el reemplazo del crisol, permitiendo así la puesta en funcionamiento del equipo.



Figura 4. Horno de muestras no operativo

1.2 OBJETIVOS

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado se divide en cinco categorías u objetivos secundarios:

1. El impacto del aluminio en el mundo, sus características, aleaciones y el papel de Derichebourg España en el aprovechamiento del aluminio reciclado.
2. Presentar conocimientos básicos de los sistemas automáticos y de control para comprender la importancia de los parámetros del controlador PID.
3. Realizar un ensayo experimental para la obtención de la función de transferencia de un sistema térmico al cual pertenece el horno de muestras eléctrico.
4. Realización de un estudio de los diferentes tipos de sintonizado del controlador, es decir, evaluar los métodos existentes de cálculo de los parámetros del PID y como afectan al sistema.



5. Desarrollar un programa para autómatas programables con control a través de la pantalla HMI, que permita gestionar el funcionamiento del horno de muestras en el denominado **proceso real**, o realizar simulaciones mediante un **proceso simulado** (los dos tipos de procesos marcados en negrita serán explicados en el Apartado 4).

Con dos hornos de muestras operativos el proceso de identificación química de cada materia prima sería mucho más rápido aliviando la carga de trabajo de los operarios del propio horno, por ello, se va a diseñar un programa de PLC para controlar la temperatura del horno y poder realizar las funciones más comunes de manera más segura como se verá más adelante, además el programa contará con capacidad de recalcular los parámetros del controlador mediante varios métodos de sintonizado, también tiene que tener la opción de modificar configuraciones básicas del controlador y un proceso de calentamiento automático que cumpla con las especificaciones del fabricante. Todo ello tiene que ser realizado por el operario desde una pantalla HMI indicando que tipo de funciones puede realizar y cuales no mediante el uso de contraseña.

2 EL ALUMINIO, SUS ALEACIONES Y EL PAPEL DE DERICHEBOURG ESPAÑA

2.1 EL ALUMINIO

Es un metal que ocupa el tercer lugar en abundancia en la corteza terrestre [1], representando aproximadamente el 8% del total de los elementos existentes, es un elemento químico con símbolo Al y número atómico 13, clasificado en la tabla periódica dentro de los metales no ferromagnéticos. Sin embargo, no se encuentra en estado libre, si no que se halla principalmente en rocas y minerales, siendo la bauxita, Figura 5, su principal mena.



Figura 5. Roca de bauxita

En el siglo XIX comenzaron los primeros procesos de obtención de aluminio, los cuales eran muy costosos y de rendimientos escasos, por lo que fue considerado como un metal precioso, comparable al oro y la plata, pero todo cambió en 1888 cuando el químico austriaco Karl Bayer (1847-1904) desarrolló un método para transformar la bauxita en alúmina, este método, conocido como **Proceso Bayer**, consiste en triturar la bauxita y luego lavarla con sosa NaOH, que disuelve al aluminio pero no los demás minerales presentes en la bauxita, los cuales quedan en forma sólida. Tras este proceso se obtiene hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$, finalmente, el hidróxido se somete a un calentamiento a aproximadamente 1000 °C en un proceso denominado calcinación, lo que convierte el hidróxido de aluminio en alúmina Al_2O_3 . [2]

Según el International Aluminium Institute (IAI), que representa a la industria mundial del aluminio, se requieren entre 2 y 3 toneladas de bauxita para obtener 1 tonelada de alúmina, la producción total en 2024 fue en torno al 130 millones de toneladas siendo China el principal productor con 77 millones de toneladas. La producción de alúmina ha experimentado un crecimiento constante desde 1974, año donde comienzan a registrarse estos datos, como se puede observar en el gráfico de elaboración propia, pero con los datos extraídos del IAI mostrado en la Figura 6. [3]

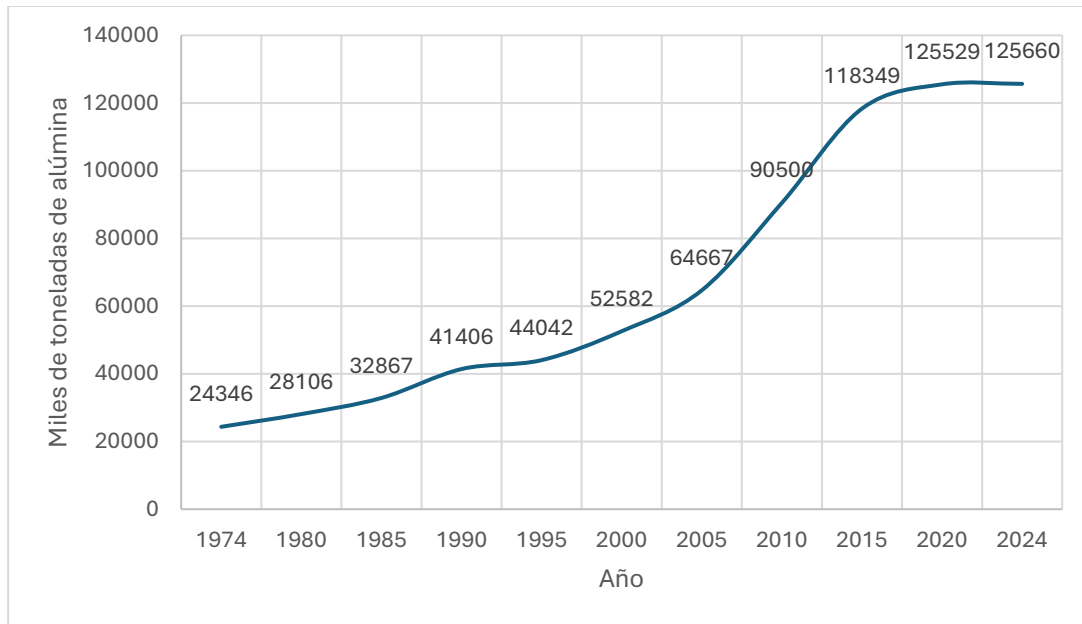
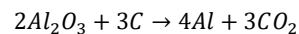


Figura 6. Producción mundial de alúmina

Una vez obtenida la alúmina, se somete a un tratamiento denominado **Proceso Hall-Heroult**, este método consiste en preparar una mezcla con un 5% de alúmina y un 95% de criolita Na_3AlF_6 , y calentar dicha mezcla sobre los 1000 °C para producir aluminio puro fundido en el cátodo y gas CO_2 en el ánodo de carbono, porque las moléculas de oxígeno reaccionan con el carbono del ánodo produciendo dicho gas. La reacción química es la siguiente: [4]



Como se puede comprobar en la Figura 7, la producción de aluminio a nivel mundial se ha ido incrementando a lo largo del tiempo, con una notoria aceleración desde el año 2000, cuando China se convirtió en el principal productor de aluminio a nivel mundial.

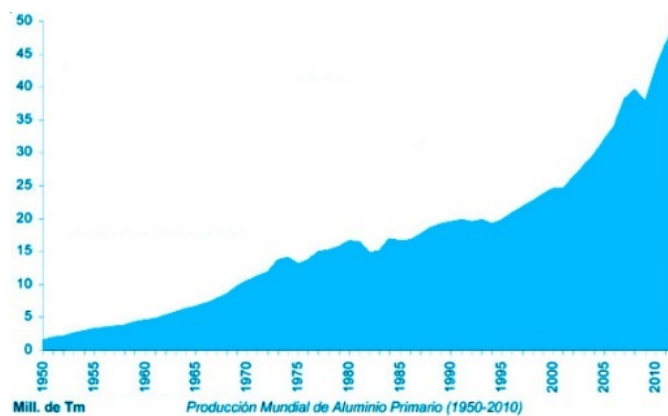


Figura 7. Evolución de la producción mundial de aluminio [5]

Todavía no se ha realizado el estudio de la producción de aluminio mundial que realiza el National Minerals Information Center, dependiente del Gobierno de Estados Unidos, para 2024 con predicción a 2025, pero observando las tendencias y los datos del estudio de 2023 parece que indicará que continuará incrementándose, además, concluye que:

“Los recursos globales de bauxita son suficientes para satisfacer la demanda mundial de aluminio en el futuro” y “se prevé que el aluminio sustituya al vidrio, papel o plásticos en envases, sustituya al magnesio, acero y titanio en diferentes usos de transporte terrestre, sustituya al acero, madera y vinilo en materiales de construcción y al cobre en componentes conductores de la electricidad e intercambio de calor” [6].

De la misma publicación se pueden extraer los principales productores de aluminio en miles de toneladas que se recogen en la Tabla 1.

PAÍS	PRODUCCIÓN DE 2022	PRODUCCIÓN DE 2023
Estados Unidos	861	750
Australia	1500	1500
Bahréin	1600	1600
Brasil	811	1100
Canadá	2700	3000
China	40200	41000
Islandia	720	730
India	4100	4100
Malasia	900	980
Noruega	1400	1300
Rusia	3720	3800
EAU	2650	2700
Otros	7110	7000
TOTAL	68400	70000

Tabla 1. Mayores productores de aluminio fundido. [6]

A modo de resumen, y con el objetivo de proporcionar una visión integral del rendimiento en la producción de aluminio a partir del mineral de bauxita: “es importante recordar es que con 4 kgs. de bauxita, obtenemos aproximadamente 2 kg. de alúmina y a su vez, 1 kg. de aluminio.” [7]

A nivel global, se estima que aproximadamente el 70% de la producción de aluminio proviene de la extracción de bauxita, proceso conocido como producción de **aluminio primario**, el 30% restante se obtiene a través de procesos de reciclaje, denominado producción de **aluminio secundario**. Según el Foro Económico Mundial, es crucial reducir el porcentaje de producción de aluminio primario en favor de la producción de aluminio secundario, con objetivo de mitigar las emisiones de CO₂ asociadas a este proceso. Se calcula que la producción de una tonelada de aluminio primario genera ,aproximadamente 16 toneladas de CO₂. Esta transición resulta especialmente relevante dado que se proyecta un aumento del 40 % en la demanda global de aluminio para el año 2030. [8]

2.2 PROPIEDADES DEL ALUMINIO

Las propiedades del aluminio, según [9], se pueden clasificar en:

- Propiedades físicas: Poco peso, buena conductividad eléctrica y térmica y buena resistencia a la corrosión, en la Tabla 2, se exponen las principales características físicas del aluminio.

PROPIEDADES	VALOR
Color	Blanco - plata
Estructura cristalográfica	Cúbica centrada en las caras
Parámetro reticular a 25 °C	0.40414
Densidad a 20 °C	2.699 g/cc
Cambio volumétrico durante la solidificación	6.7 %
Calor de combustión	200 Kcal/at-gr
Punto de fusión	660.2 °C
Punto de ebullición	2480 °C
Calor específico a 20 °C	930 J
Coefficiente lineal de expansión térmico x 10 ⁶	23.0
Conductividad térmica a 0 °C	0.5 cal/s/cm ² /cm/°C
Conductividad térmica a 100 °C	0.51 cal/s/cm ² /cm/°C
Resistividad eléctrica a 20 °C	2.69 μΩ-cm
Susceptibilidad magnética a 18 °C x 10 ⁶	0.63

Tabla 2. Propiedades físicas del aluminio [9]

- Propiedades químicas: El aluminio tiene una gran resistencia a la corrosión por la producción en sus caras exteriores de una capa de óxido de aluminio (4 y 5 μm) pudiendo esta aumentar sometiendo al aluminio a un proceso de oxidación. Los ácidos como el clorhídrico, fluorhídrico y sulfúrico atacan con facilidad al aluminio, mientras es más resistente a ácidos orgánicos como el amoníaco o el ácido nítrico.
- Propiedades mecánicas: Baja resistencia mecánica que puede mejorarse tratando el aluminio o sus aleaciones a procesos de forja, además tiene bajo el módulo de elasticidad, como puede consultarse en la Tabla 3

PROPIEDADES	VALOR
Módulo de elasticidad 99.99 %	64.200 N/mm ²
Módulo de elasticidad 99.950 %	69.000 N/mm ²
Módulo de rigidez	17.000 N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.32 – 0.36

Tabla 3. Propiedades mecánicas del aluminio [9]

2.3 ALEACIONES DE ALUMINIO

Como se ha comentado anteriormente, el aluminio tiene baja resistencia mecánica, por ello, es preciso alearlo con otros metales que la mejoran tal como indica la Figura 8.

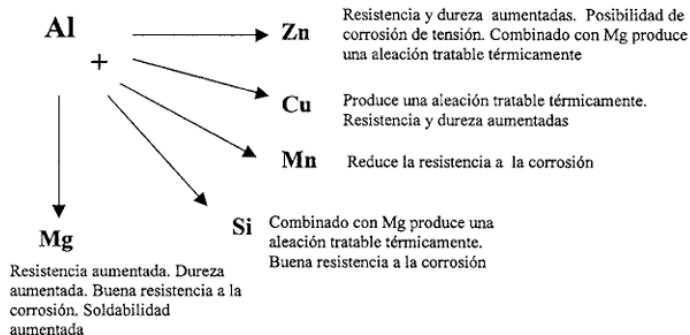


Figura 8. Principales aleantes del aluminio [9]

Según el método de obtención de las aleaciones, se clasifican en:

- **Aleaciones de forja:** Las coladas de las aleaciones fundidas tienen forma de placas que posteriormente son transformadas por extrusión o laminación en chapas o perfiles.
- **Aleaciones de moldeo:** Las coladas de las aleaciones fundidas se vierten sobre moldes de arena o acero fundido, permitiendo fabricar piezas con forma compleja.

El sistema de designación para las diferentes **aleaciones de forja** fue establecido en 1954 por **The Aluminum Association** a través del **Technical Committee on Products Standards** (TCPS). Posteriormente, en 1970, este sistema fue adoptado como estándar internacional, asignando al **American National Standards Institute** (ANSI) y al **Standards Committee H35** el rol de principales organismos normativos para la industria global del aluminio.

Las clasificaciones y propiedades de las aleaciones que se describen a continuación están basadas en el documento mencionado. [10] Cabe destacar que las "x" en las designaciones de cada aleación representan valores específicos que pueden variar según las especificaciones, aunque el conjunto se identifica comúnmente por el número inicial de la designación.

- Aleaciones puras de aluminio.
 - Serie 1XXX: Son las aleaciones con mayor pureza de aluminio 99% o superior, se caracterizan por una excelente resistencia a la corrosión y una alta conductividad eléctrica y térmica. Las más famosas son la 1350 (99.5% de Al) para aplicaciones eléctricas y la 1100 (99% de Al y 0.95% max. de Fe) para productos alimentarios.
- Aleaciones tratadas térmicamente.
 - Serie 2XXX: Aleaciones donde el principal componente es el cobre, alta tenacidad y resistencia, pero menor resistencia a la corrosión que otras aleaciones de aluminio. Es importante la 2024 (93.5% de Al y 4.4% de Cu) usada comúnmente en componentes aeroespaciales y la 2218 (92.2% de Al, 4% de Cu, 1.5% de Mg, 1% de Fe y 0.9% de Zn) que se emplea en cilindros de motores de aviones.
 - Serie 6XXX: Aleación de aluminio junto con silicio y magnesio, tiene la peculiaridad que es soldable y las piezas de extrusión de este tipo de aleación son utilizadas en construcción por su buena resistencia a la corrosión. Un ejemplo es la 6061 (97.9% de Al, 0.6% de Si, 1% de Mg) usada en construcción y la 6063 (98.9% de Al, 0.4% de Si y 0.7% de Mg) para bastidores de camiones y barcos.
 - Serie 7XXX: El principal componente de este tipo de aleaciones de aluminio es el cinc, lo que la convierte en una aleación con una muy alta resistencia, las más importantes son la 7050 (89% de Al, 6.2% de Zn, 2.3% de Cu y 2.3% de Mg) empleada en la industria aeroespacial y la 7022 (91.1% de Al, 4.7% de Zn y 3.1% de Mg) para la elaboración de moldes utilizados en la fabricación de elementos de otros materiales.
- Aleaciones no tratadas térmicamente.
 - Serie 3XXX: El componente mayoritario de estas aleaciones es el manganeso, aunque puede incluir pequeñas trazas de magnesio, crea aleaciones dúctiles y con una buena transferencia de calor. La más usada es la 3003 (98.6% de Al, 1.5% de Mn y 0.12% de Cu) ya que prácticamente todos los utensilios de cocina están hechos de esta aleación.
 - Serie 4XXX: Es una aleación de aluminio que incluye grandes cantidades de silicio, que reduce el punto de fusión del aluminio permitiendo su uso en soldaduras fuertes. Por ejemplo, la 4043 (94.8% de Al y 5.2% de Si) con las que se crean las varillas para soldadura.
 - Serie 5XXX: El principal componente es el magnesio, creando aleaciones de una buena resistencia, buena soldabilidad y muy buena resistencia a la corrosión, por ello se emplean ampliamente en edificación, tanques de almacenamiento y aplicaciones marinas. La 5052 (97.8% de Al y 2.5% de Mg) para aplicaciones electrónicas, 5083 (94.8% de Al y 4.4% de Mg) para aplicaciones marinas y la 5182 (95.2% de Al y 4.5% de Mg) con la cual se fabrican las tapas de las bebidas de aluminio.

Las **aleaciones de moldeo** tienen nomenclatura diferente, mediante cuatro dígitos y un decimal, con un formato parecido a las aleaciones de forja, pero con diferencias en algunos aleantes. El primer dígito indica el aleante principal, los dos siguientes, los aleantes minoritarios, y el dígito tras el punto muestra la forma del producto terminado.

- 1XX.X: Aluminio puro
- 2XX.X: Cobre
- 3XX.X: Silicio con adiciones de cobre y magnesio
- 4XX.X: Silicio
- 5XX.X: Magnesio
- 7XX.X: Cinc
- 8XX.X: Estaño

2.4 DERICHEBOURG ESPAÑA Y EL ALUMINIO

La planta productiva de Derichebourg España de Albalate del Arzobispo se encarga de la producción de aluminio secundario, como se ha indicado anteriormente, aprovecha elementos de aluminio ya en desuso para crear lingotes con unas especificaciones determinadas por los clientes que producirán nuevas piezas de aluminio.

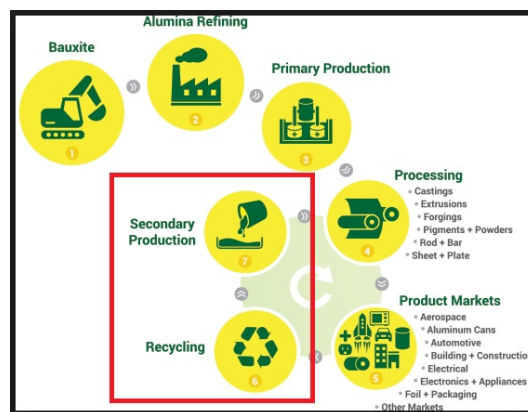


Figura 9. Ciclo de la vida del aluminio [11]

En la Figura 9 se muestra el ciclo de vida del aluminio, que puede proceder de dos fuentes: del mineral de bauxita, a partir del cual se produce **aluminio primario** que posteriormente será procesado para su uso en diversas industrias, y el aluminio reciclado, que proviene de productos en desuso. Una gran parte de este material reciclado es procesada en plantas de **producción secundaria**, donde se vuelve a refinar y reutilizar en la fabricación de diferentes productos. El marco rojo en la figura resalta la ubicación de la planta de Derichebourg en Albalate dentro del ciclo de vida del aluminio.

La materia prima habitualmente viene de tres fuentes:

- La primera es la compra de material a plantas clasificadoras de reciclaje, se encargan de separar el aluminio del resto de materiales y posteriormente realizar una nueva separación por serie o tipo de material, como se puede ver en la Figura 10, se tiene un montón de bote que es aluminio serie 3XXX o en la Figura 11, donde se aprecia un montón de aluminio prensado correspondiente a la serie 5XXX.

- Otra fuente de adquisición de materia prima son grandes desguaces los cuales ofrecen el aluminio que extraen sobre todo de vehículos, camiones, trenes, aviones, por ejemplo, en la Figura 12, se observan montones de llantas de la serie 6XXX y radiadores de la serie 3XXX.
- En menor proporción son los restos sobrantes de los propios clientes que han adquirido un lote de lingotes de una aleación determinada, tras fundirlos y darles forma en sus moldes, todo el aluminio sobrante en forma de viruta tras procesos de corte o piezas de diverso tamaño tras un proceso de troquelado son reenviadas a Derichebourg España para volver a ser aprovechables.



Figura 10. Montón de bote limpio



Figura 11. Montón de recorte de aluminio prensado



Figura 12. Montón de llanta y radiador

Una vez que se descarga el material comprado hay que realizar un análisis de la composición química de dicho material para comprobar que cumple con los requisitos de compra, aquí es donde el **horno de muestras**, objeto de este trabajo, realiza su función, es preciso recoger una muestra representativa de cada descarga de camión y obtener una probeta que será analizada en un espectrómetro de luz para conocer su composición química exacta.

Como se puede apreciar en la Figura 4 el horno de muestra tiene una boca con unas dimensiones de 900 mm de diámetro y la mayor parte de material no entra, por eso, lo primero que hay que hacer es realizar un proceso de fragmentación, Figura 13. El proceso de fragmentación, además de permitir el análisis químico de la materia prima, mejora el rendimiento de la chatarra de aluminio en el proceso de fusión.

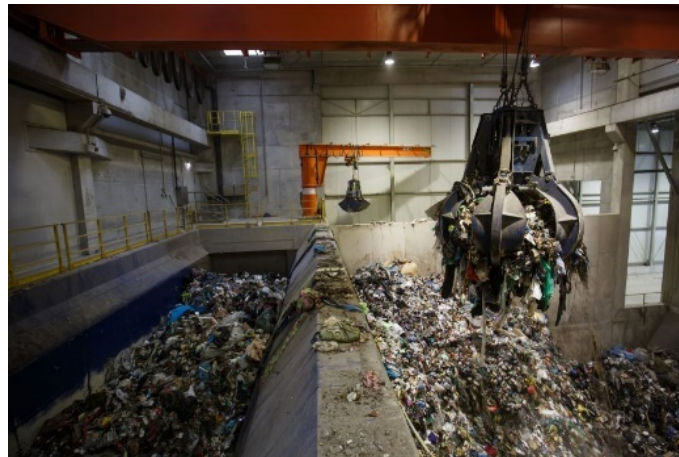


Figura 13. Fragmentadora de aluminio

Una vez que el material ya tiene el tamaño deseado, se recoge la muestra que será introducida al horno de muestras a 800 °C, a esta temperatura, prácticamente todos los componentes se funden, excepto el hierro. Cuando el operario verifica visualmente que el material está completamente fundido, acciona el mecanismo de basculación del horno y obtiene una probeta utilizando los utensilios adecuados, como se ilustra en la Figura 14. Es necesario indicar que este proceso presenta un alto riesgo de quemaduras, por ello, el operario debe utilizar el equipo de protección individual (EPI) establecido en la Evaluación de Riesgos de la planta porque el mando de basculación está justo al lado del horno, esto será modificado en este trabajo y la basculación será desde la pantalla HMI, desde donde el operario observa la caída del caldo sin la necesidad de estar cerca de él.



Figura 14. Útiles para la obtención de probetas

Cuando el caldo se vierte sobre el molde, es preciso enfriar la probeta para que el aluminio se compacte y suelte con más facilidad del molde, obteniendo como resultado la pieza de la Figura 15, que será introducida en el espectrómetro de luz, Figura 16, para obtener la composición química como se puede apreciar en la Figura 17, donde según el análisis

realizado, en esa ocasión el resultado de la muestra de aluminio indicaba que estaba formada por un 86.01% era aluminio, un 9.05% de silicio, con un 0.73% de hierro, un 2.66% de cobre, un 0.27% de magnesio y un 0.86% de cinc como valores principales, permitirá el uso de la materia prima en la aleación más adecuada.

El espectrómetro es fundamental para conocer el tipo de materia prima con la que se va a trabajar y el estado de una colada que luego será enviada al cliente, su funcionamiento se basa en medir las longitudes de onda de una luz (radiación electromagnética) que ha sido reflejada sobre una probeta. Con esta técnica se obtienen los porcentajes de concentración de diferentes metales en el propio aluminio. Esto es importante, porque para que una aleación cumpla su función no es necesario conocer la cantidad de aluminio que contiene la aleación, si no el porcentaje de cada aleante que hace a esa aleación poseer unas propiedades determinadas.



Figura 15. Probeta de aluminio



Figura 16. Espectrómetro de la marca Thermo

Elemento	Al%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Ca	Na	P	Sb	Sr
Unidades	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
#1	85.88	9.12	0.74	2.69	0.19	0.28	0.02	0.06	0.87	0.055	0.019	0.047	0.001	0.000	0.001	0.003	0.001
#2	85.91	9.18	0.74	2.64	0.19	0.27	0.02	0.06	0.85	0.052	0.019	0.046	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001
#3	86.13	9.00	0.72	2.62	0.18	0.27	0.02	0.06	0.86	0.052	0.018	0.048	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001
#4	86.05	9.02	0.72	2.67	0.19	0.27	0.02	0.06	0.86	0.053	0.019	0.047	0.001	0.000	0.001	0.003	0.001
#5	85.97	9.03	0.74	2.71	0.19	0.28	0.02	0.06	0.87	0.054	0.019	0.048	0.001	0.000	0.001	0.003	0.001
#6	86.13	8.95	0.72	2.66	0.19	0.27	0.02	0.06	0.86	0.053	0.018	0.047	0.001	0.000	0.001	0.003	0.001
MED	86.01	9.05	0.73	2.66	0.19	0.27	0.02	0.06	0.86	0.053	0.018	0.047	0.001	0.000	0.001	0.003	0.001
SD	0.110	0.084	0.011	0.033	0.003	0.004	0.001	0.001	0.007	0.0012	0.0006	0.0005	0.0001	0.0010	0.0001	0.0001	0.001
SD%	0.13	0.93	1.47	1.26	1.59	1.59	2.26	1.45	0.84	2.29	2.96	1.10	6.99	213.14	8.32	4.65	24.21

Elemento	V	Zr	Al
Unidades	%	%	count
#1	0.008	0.004	112.54
#2	0.009	0.004	112.83
#3	0.008	0.004	120.43
#4	0.008	0.004	113.30
#5	0.009	0.004	110.36
#6	0.008	0.004	112.68
MED	0.008	0.004	113.69
SD	0.0002	0.0000	3.456
SD%	2.57	1.16	3.04

Figura 17. Análisis químico de una probeta de aluminio



Cuando se recibe un pedido de un cliente, el cual requiere una aleación de aluminio, sobre todo se especifican ciertas características que deben cumplirse, tales como la composición química exacta, dentro de un rango preestablecido por la norma **UNE EN-1767:2020**, las propiedades mecánicas y las tolerancias dimensionales. Estas especificaciones son muy importantes para garantizar que el producto final cumpla con los requisitos de calidad establecidos, y puedan ser utilizados de manera correcta en los productos finales del cliente.

Con el análisis de cada materia prima recibida, se selecciona la más adecuada para la fabricación de la aleación solicitada por el cliente. Normalmente, se realizan mezclas de diferentes materias primas para ajustar lo más precisamente posible la composición química requerida.

Por ejemplo, siguiendo la orden de fabricación de la Figura 18, se solicitan 16 000 kg. de la aleación A390.2 comúnmente usada en automoción, lo primero que hay que tener claro son los límites porcentuales de cada aleante, ya que cualquier desviación, ya sea por exceso o por defecto no sería admisible por el cliente provocando que el aluminio fundido quede fuera de las especificaciones.

Se seleccionan tres materiales, viruta AlSi de la cual se dispone 32 452 kg. siendo necesarios 6 700 kg. que con un rendimiento esperado de fusión del 95% proporcionará 6 365 kg. de caldo, llantas de aluminio con magnesio, donde se necesitan 4 000 kg. al 81% de rendimiento proporcionando 3240 kg. de caldo y piezas de frigoríficos reciclados, donde serán necesario 5 600 kg. con un rendimiento del 85% obteniendo 4 760 kg.

Utilizando solo los materiales reciclados, se obtienen un total de 14 364 kg de la aleación ya realizada. Sin embargo, para alcanzar los límites de la aleación especificada, es necesario añadir ciertos aleantes. En este caso, se utilizarán 1 350 kg. de roca de silicio que contiene un 2% de hierro, 80 kg. de hierro en forma de viruta para facilitar el aleado, 520 kg. de cobre en forma de granalla y, por último, 50 kg. de magnesio reciclado.

Con la adición de estos aleantes, se obtiene un total de 16 071 kg. de caldo de aluminio, con los aleantes dentro de los rangos establecidos para cumplir con las especificaciones de la aleación solicitada.

La Figura 18 es simplemente un modelo orientativo, que se ha creado para facilitar la comprensión de la elaboración de una mezcla y los aleantes necesarios para llevarla a cabo. En Derichebourg España existe un software específico que recoge toda la información de las analíticas de las materias primas del espectrómetro y realiza modelos para ajustar sólo con chatarra los rangos de la aleación del cliente y así disminuir lo máximo posible la cantidad de aleantes que hay que adicionar al caldo.

PROPUESTA DE FABRICACIÓN ALEACIÓN A390.2 - CANTIDAD NECESARIA 16000 kg.																
	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mg (%)	Mn (%)	Zn (%)										
Max	18,00	1,00	5,00	0,65	0,10	0,10										
Min	16,00	0,60	4,00	0,50			CANTIDAD DISPONIBLE	CANTIDAD NECESARIA	RDTO (%) ESPERADO	kg. Tras RDTO	kg. De aleantes necesarios					
											Si (kg.)	Fe (kg.)	Cu (kg.)	Mg (kg.)	Mn (kg.)	Zn (kg.)
Viruta AlSi	7,38	0,14	0,14	0,21	0,13	0,06	32452	6700	0,95	6365	469,737	8,911	8,911	13,3665	8,2745	3,819
Llanta Al-Mg	8,35	0,15	0,08	0,35	0,07	0,04	86940	4000	0,81	3240	270,54	4,86	2,592	11,34	2,268	1,296
Piezas reciclado frigoríficos	15,87	0,88	3,96	0,61	0,08	0,08	11150	5600	0,85	4760	755,412	41,888	188,496	29,036	3,808	3,808
Si 2% Fe	98	2						1350	0,85	1147,5	1124,55	22,95				
Fe viruta		100						80	0,61	48,8		48,8				
Cu			100					520	0,91	473,2			473,2			
Mg				100				50	0,72	36				36		
	16,30	0,79	4,19	0,56	0,09	0,06	kg. Totales			16071	2620,24	127,41	673,20	89,74	14,35	8,92

Figura 18. Ejemplo de propuesta de fabricación de una aleación

La orden de fusión de la Figura 18 se lleva a cabo en un **horno rotativo basculante** (HRB) cuyo combustible es gas natural con una capacidad de 10 toneladas métricas (Tm). En un silo cerca del HRB se elabora la mezcla de la Figura 18 sin los aleantes, es realizada con la ayuda de una pala cargadora Volvo L150H equipada con una báscula en el cazo que permite cargar cada material con el peso especificado con la mayor precisión posible, posteriormente, y desde el silo, se utiliza una pala cargadora, Volvo L50 para alimentar un cargador automático, el cual introduce el material directamente al interior del horno, como se puede apreciar en la Figura 19.



Figura 19. Proceso de carga del HRB

En ese momento, comienza el proceso de fusión. El quemador de gas calienta las paredes del horno, las cuales, al incrementar la temperatura, funde el material. Este proceso de calentamiento se ve favorecido por la rotación del horno, que asegura una distribución homogénea del calor y facilita la fusión del material.

Este tipo de horno de fusión tiene cuatro importantes ventajas respecto con otros hornos de fusión cuyo principio de funcionamiento es diferente:

1. La rotación provoca que la mezcla del material se homogenice en su composición química.
2. Son capaces de fundir cualquier tipo de formato de chatarra de aluminio mientras tenga unas dimensiones admisibles por la boca del propio horno.
3. El diseño del horno hace que tenga una eficiencia energética muy superior al resto de hornos fusores.
4. El rendimiento de aluminio que se extrae es muy superior en comparación con otros tipos de hornos fusores.

En la Figura 19 se aprecia la boca del horno con la puerta cerrada bajo la campana de aspiración que absorbe los volátiles que se crean en el proceso de fusión, la campana abarca prácticamente todo el perímetro del horno para evitar la concentración de gases dentro de la nave de producción. En la parte derecha, de color azul, se encuentra el cargador automático, con una capacidad aproximada de 2 000 kg., se mueve automáticamente hacia la boca del horno mientras éste abre la puerta, luego, unos motores hacen vibrar el cargador para que el material vaya deslizándose e introduciéndose poco a poco al interior del horno. Cada proceso de fusión requiere introducir aproximadamente entre 4 o 5 cargadores, según el material a fundir.



Figura 20. Proceso de fusión del HRB

Una vez el proceso ha terminado y el caldo del interior del horno alcanza los valores establecidos se procede a realizar la colada, para ello, los pistones del horno lo hacen bascular para verter el caldo que irá dirigido mediante canales cerámicos al horno de mantenimiento.

En la Figura 21 se aprecia como cae el caldo a las canales, la pieza que está sobre la boca se llama peinetas y su misión es frenar el vertido de escorias producidas durante la fusión, evitando su arrastre hasta los hornos de mantenimiento.



Figura 21. Colada tras la fusión del HRB

Cuando la colada llena el horno de mantenimiento, se analiza el contenido de éste extrayendo una probeta, como se hacía con el horno de muestras, pero con utensilios más adecuados, y se adicionan la proporción de aleantes ya calculados en la Figura 18. A parte de los aleantes que anteriormente se han mencionado, se suelen añadir habitualmente, manganeso, titanio y estroncio.

En el horno de mantenimiento, a parte del proceso de aleado, se realiza la desgasificación del caldo, introduciendo nitrógeno N_2 mediante tuberías de acero, esto es importante para eliminar moléculas de hidrógeno H_2 y partículas orgánicas para evitar la aparición de poros o grietas en los lingotes.



Figura 22. Horno de mantenimiento

Una vez que el horno completado el proceso de aleado y alcanzado las especificaciones químicas requeridas por el cliente, es necesario colar el material en una lingotera de acero para formar el producto final. Éste se presenta en paquetes de 79 lingotes, con un peso aproximado de 850 kg. cada uno, como se muestra en la Figura 23. Los lingotes se almacenan en el área de producto terminado hasta que son enviados al cliente, quien los fundirá para crear sus propios productos, tal como se ilustra en la Figura 24.



Figura 23. Línea de montaje de lingotes de aluminio



Figura 24. Almacén de producto terminado

3 LOS SISTEMAS DE CONTROL Y A LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

3.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal de este trabajo es desarrollar un controlador para la regulación de la temperatura en un horno de muestras, en consecuencia, la tarea fundamental radica en el diseño e implementación del sistema de control más adecuado para garantizar un funcionamiento preciso y eficiente.

Los sistemas de control actúan sobre el comportamiento de los sistemas físicos para que éstos realicen las operaciones que el usuario necesite mediante la implementación de la automática, cuya finalidad es la sustitución del operador humano por un operador automático que realice y ejecute órdenes físicas y/o mentales.

En el ámbito industrial, la implementación de la automática fue una revolución porque ofreció una gran cantidad de ventajas a los procesos industriales, como el aumento de los tiempos de producción, la disminución de la carga física de los operarios o el aumento de la seguridad para hombres y máquinas.

Existen dos tipos de sistemas industriales:

- Discretos: Donde las operaciones y decisiones son en base lógica, es decir, todo o nada, encendido o apagado.
- Continuos: Donde las operaciones de mando y el registro de las variables a controlar son valores continuos.

Se puede definir como sistema al conjunto de elementos relacionados entre sí, donde alguna modificación en uno de ellos afecta al resto. Puede haber sistemas biológicos, sociológicos, económicos, pero habitualmente, los sistemas industriales son físicos y se pueden clasificar según sus variables de control en:

- Térmicos: temperatura (T°), presión (P) y volumen (V).
- Mecánicos: fuerza (F), distancia (D).
- Eléctricos: voltaje (V), intensidad (I).
- Hidráulicos: presión (P), altura (H), caudal (Q), velocidad (v).

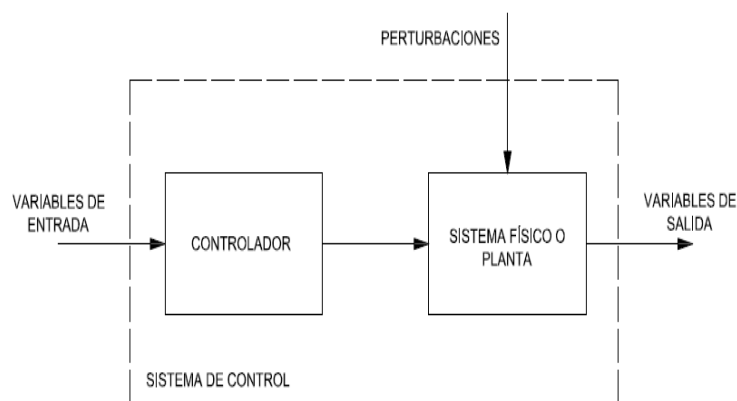


Figura 25. Entradas y salidas de un sistema de control

Como se puede observar en la Figura 25, el sistema físico o planta es el elemento industrial sobre el que se quiere actuar, en el caso de este trabajo es el horno de muestras, el controlador es el dispositivo electrónico capaz de leer la variable de entrada, compararla con la variable de salida, ambas temperatura, y con la diferencia entre ellas generar la acción necesaria al sistema físico o planta con el objetivo de igualar ambas variables, además, puede haber otro tipo de entradas, como son las perturbaciones, que tienen un valor no fijo y no pueden ser controladas por el operador del sistema de control.

Los sistemas de control se pueden clasificar según la interacción entre las variables de salida y las de entrada, existen dos tipos de control:

- Lazo abierto: La variable de entrada actúa sobre el sistema sin conocer el valor de la variable de salida, por ejemplo, el programa de lavado de una lavadora.

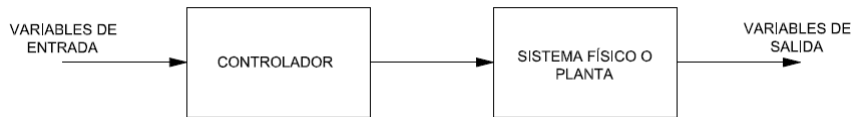


Figura 26. Sistema de control en lazo abierto

- Lazo cerrado: Utiliza el concepto de realimentación, que consiste en coger el valor de la variable de salida y tenerla en cuenta junto con el de entrada para que esa información sea recibida por el controlador y actúe en consideración.

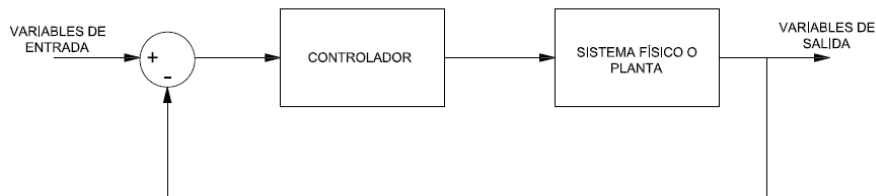


Figura 27. Sistema de control en lazo cerrado

Para que un sistema físico o planta pueda ser controlable es muy importante que sea lineal, es decir, que cumpla con el principio de superposición, Ecuación 1, donde $y(t)$ es la entrada al sistema y $x(t)$ la salida. Aunque en la realidad, la mayoría de los sistemas industriales no son lineales.

$$a_1 \cdot y_1(t) + a_2 \cdot y_2(t) = a_1 \cdot x_1(t) + a_2 \cdot x_2(t) \quad \text{Ecuación 1}$$

Los sistemas son modelados mediante **ecuaciones diferenciales** lineales, aunque antes se había dicho que los sistemas industriales no son lineales, sus ecuaciones diferenciales se pueden aproximar a ecuaciones lineales para trabajar sobre ellas.

Para ello, hay que realizar un proceso que se llama **linealización** que consiste en coger el primer término de la serie de Taylor de la función original, como se puede observar en la Ecuación 2, siendo como anteriormente, $y(t)$ la entrada al sistema y $x(t)$ la salida.

$$y = f(x) \approx y_0 + \left[\frac{df}{dx} \right] (x - x_0) \rightarrow y - y_0 = \left[\frac{df}{dx} \right] (x - x_0) \quad \text{Ecuación 2}$$

Las ecuaciones diferenciales y la linealización son una parte fundamental del modelado de sistemas físicos, con ellos, se obtiene una parte muy importante de los sistemas de control o automáticos como es la **función de transferencia**.

3.2 LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

En la industria en general existen diferentes tipos de sistemas o plantas, los cuales, mediante sus ecuaciones diferenciales, relacionan diferentes parámetros con el fin de obtener una función de transferencia representativa del proceso. Los sistemas más comunes son:

- Eléctricos: Las ecuaciones diferenciales que establecen este tipo de sistemas son las obtenidas por las Leyes de Kirchoff y la famosa Ley de Ohm de la Ecuación 3.

$$V = R \cdot I \quad \text{Ecuación 3}$$

- Mecánicos: El principio físico de este tipo de sistemas para obtener sus ecuaciones diferenciales son el equilibrio de fuerzas expresadas en las Leyes de Newton como en la Ecuación 4, y el equilibrio energético o Mecánica Lagrangiana.

$$\sum F = m \cdot a \quad \text{Ecuación 4}$$

- Hidráulicos: En este tipo de sistemas las ecuaciones son desarrolladas por el Principio de Continuidad, el cual indica que el fluido que se aporta a un tanque de almacenamiento, o entra, o sale o se queda dentro y la Ecuación de Bernoulli indicada en la Ecuación 5.

$$Q_0(t) = C \cdot R(t) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h(t)} \quad \text{Ecuación 5}$$

- Térmicos: Es el tipo de sistema sobre el que se basa este trabajo, por ello, la extensión sobre sus principios físicos y ecuaciones va a ser mayor que el resto. El ejemplo más básico de modelado de este tipo de sistemas, Figura 28, que es un horno calentado por una resistencia, las variables usadas son, el voltaje $V(t)$ en voltios (V) de alimentación, la temperatura interna del horno T_i en grados kelvin ($^{\circ}\text{K}$) y la temperatura externa del horno T_e en grados kelvin ($^{\circ}\text{K}$), y constantes según las especificaciones como la resistencia R medida en ohmios (Ω), el volumen V del interior del horno en metros cúbicos (m^3), la densidad ρ del elemento que hay en el interior expresado en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3), el calor específico C_p del propio elemento indicado en julios partido kilogramo por grado Kelvin ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{K}$) y la resistividad térmica K del material de las paredes del horno en metros cuadrados y grados kelvin por watio ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{K}$).

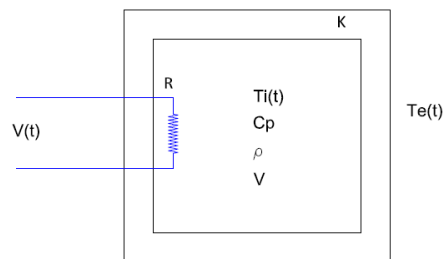


Figura 28. Sistema térmico formado por un horno con calentamiento resistivo.

Uno de los principios físicos utilizados es la Ley de Joule, la cual establece que, si un conductor es atravesado por una corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se convierte en calor $q_r(t)$ medido en calorías (cal) como se expresa en la Ecuación 6, en otros sistemas térmicos la fuente que proporciona calor puede ser otra, aunque lo que realmente importa es la cantidad de calor que recibe el sistema.

$$q_r(t) = \frac{u(t)^2}{R} \quad \text{Ecuación 6}$$

Otro principio físico que se aplica es la conducción de calor, el cuerpo con mayor temperatura transmite calor al cuerpo con menor temperatura produciéndose pérdidas de calor que dependen de la diferencia de temperatura y de una constante K .

$$q_p(t) = \frac{T_i - T_e}{K}$$

Ecuación 7

También es importante el fundamento de adsorción de calor que tiene un elemento, al cual se le está aplicando calor, como indica la Ecuación 8.

$$q_a(t) = \rho \cdot V \cdot Cp \cdot T_i(t)$$

Ecuación 8

Por último, hay que realizar un balance térmico con todas las ecuaciones desarrolladas que tiene la forma de la Ecuación 9, quiere decir que el calor que se suministra a un sistema, una parte se absorbe y otra parte se pierde.

$$q_r(t) = q_a(t) + q_p(t)$$

Ecuación 9

Cuando un sistema es analizado, y sus ecuaciones diferenciales linealizadas se obtiene la **función de transferencia** que relaciona la variable que se quiere controlar, denominada salida con otra variable manipulable que será la entrada, perteneciente las dos al mismo sistema físico lineal e invariante en el tiempo.

Hay que tener en cuenta que estas ecuaciones están en función del tiempo, mediante el uso de la herramienta matemática de la **Transformada de Laplace**, a partir de ahora TdL, se obtiene una nueva variable compleja denominada s, con ella, es posible representar el comportamiento dinámico y estacionario del sistema. Por ejemplo, la función de transferencia G(s) será el cociente entre la TdL de la salida X(s) y la TdL de la entrada Y(s), su forma es la expresada en la Ecuación 10.

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)}$$

Ecuación 10

La función de transferencia se representa como un bloque que posee entradas y salidas, Figura 29, la entrada al bloque será Y(s) y la salida del bloque será G(s)·Y(s).

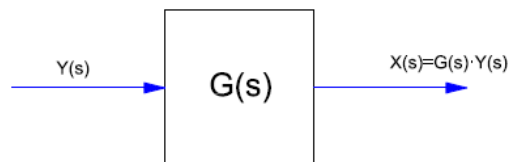


Figura 29. Bloque de la función de transferencia

4 IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA TÉRMICO

En el Apartado 3.2, se han comentado los diferentes tipos de sistemas industriales que pueden existir y como mediante ecuaciones diferenciales puede obtenerse sus funciones de transferencia, pero en este caso, para obtenerla se va a realizar un ensayo experimental para obtener, primero el tipo de función que posee el sistema térmico, y segundo, los parámetros necesarios para poder seguir trabajando con una función de control ya conocida.

El horno de muestras de aluminio que va dirigido este trabajo, el Stotek Miniheat 60, Figura 4, no está disponible por diferentes averías, tanto mecánicas como eléctricas, por lo tanto, se va a aprovechar la existencia del otro horno de muestras para realizar un ensayo experimental y así poder obtener la función de transferencia de la planta.

El horno de muestra sobre el que se va a realizar el ensayo es el Stotek 90 que posee un controlador de temperatura E5AN de la marca Omron con capacidad de enviar una señal constante de 12 voltios a las resistencias y calentar a una temperatura máxima de 1 200 °C.

Los pasos para realizar el ensayo son los siguientes:

1. Verificar que el horno esté apagado durante el tiempo necesario para que, al arrancar, marque la temperatura ambiente, que servirá como punto de partida para el ensayo.
2. Aplicar un escalón de temperatura de 800 °C.
3. Recopilar los datos de temperatura y tiempo a lo largo de la duración del ensayo y graficarlos.
4. A partir del gráfico obtenido, determinar el tipo de función de transferencia que describe el comportamiento del sistema y extraer los valores que la caracterizan.

El 12 de noviembre de 2024, tras confirmarse que el horno ha estado apagado durante más de 24 horas parado, se procede a arrancarlo, mostrando en el display una temperatura de 31.2 °C.

Con el setpoint del horno marcando 0 °C se envía el escalón de temperatura de 800 °C, dando por iniciado el ensayo a las 15 horas.

Como el horno tarda aproximadamente 6 horas en alcanzar el setpoint de 800 °C, se añade 1 hora para verificar la estabilización de la medida, los datos de temperatura se recopilan hasta las 22 horas. Es decir, un total de 7 horas.

Los datos recogidos durante el ensayo se muestran en la Tabla 4, donde aparece en la columna de la izquierda los valores del tiempo del ensayo hasta que éste termina expresados en minutos, mientras que, en la columna de la derecha, se muestran los valores de temperatura que indica el controlador del horno de muestras en grados centígrados.

Como el horno va a ser utilizado al día siguiente, se deja encendido y operativo con el setpoint establecido de 800 °C.

Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)
0	31.2
30	60.6
60	131.7
90	222.2
120	307.1
150	406.2
180	489.7
210	568.3
240	651.7
270	705.1
300	751.6
330	784.5
360	803.7
390	801.4
420	802.6

Tabla 4. Resultados recogidos durante el ensayo

Con los datos recopilados se procede a graficarlos para analizar la curva de calentamiento del horno como se representa en la Figura 30. En este gráfico, el eje de ordenadas es la temperatura en grados centígrados y el eje de abscisas el tiempo en minutos, la línea azul oscuro representa los datos de temperatura, la línea verde es la pendiente de la curva y la línea morada el escalón de 800 °C.

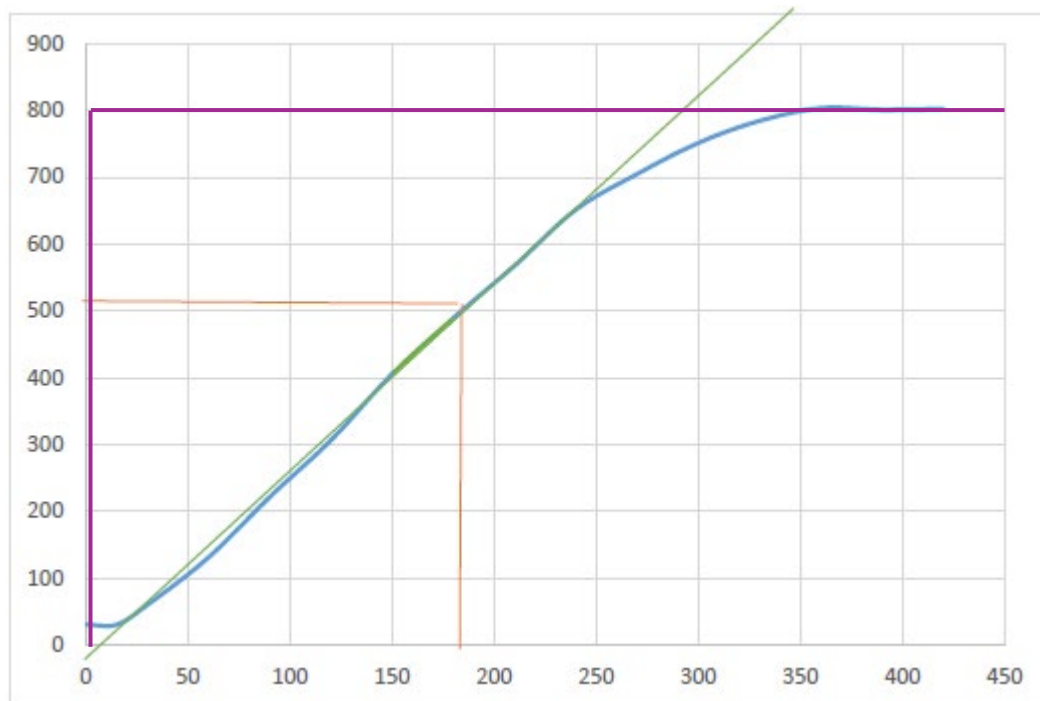


Figura 30. Representación gráfica del ensayo

Comparando la Figura 30 con la Figura 31, se llega a la conclusión que es un sistema de primer orden con retardo, siendo representado matemáticamente mediante la Ecuación 11. [12]

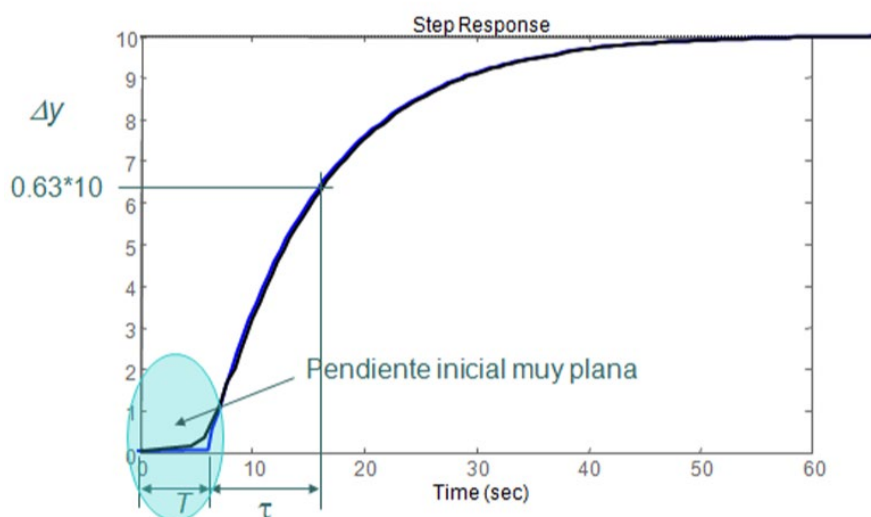


Figura 31. Representación gráfica de un sistema de primer orden con retardo [12]

Una vez identificado el tipo de sistema se sabe que la función de transferencia será de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-L \cdot s}}{1 + \tau \cdot s} \quad \text{Ecuación 11}$$

Según se puede observar en la Figura 31, hay dos tiempos importantes que se pueden obtener mediante la representación gráfica, el **retardo** T (que para este trabajo se denomina L) y la **constante de tiempo** τ . El retardo se calcula con el tiempo desde que la señal escalón de la entrada cambia de estado hasta que comienza la constante de tiempo τ que termina cuando la respuesta alcanza el 62.3% del valor deseado. Por lo tanto, y según la Figura 30, el retardo L tendría un valor de 5 minutos o 300 segundos y la constante de tiempo τ tendrá un valor de 175 minutos o 10500 segundos.

Por último, sólo falta obtener el valor de la ganancia, para ello hay que aplicar la Ecuación 12, donde Tf es la temperatura final o setpoint en grados centígrados, Ta es la temperatura ambiente en grados centígrados y U es valor del escalón en voltios.

$$K = \frac{Tf - Ta}{U} \quad \text{Ecuación 12}$$

Sabiendo Tf tiene un valor de 800 °C, Ta son 31.2 °C y U un valor de 12 v, se obtiene un valor de ganancia K de 64.06. Sustituyendo todos estos datos en la Ecuación 11, se llega a la conclusión que la función de transferencia del sistema térmico estudiado es de la forma:

$$G(s) = \frac{64.06 \cdot e^{-300 \cdot s}}{1 + 10\,500 \cdot s} \quad \text{Ecuación 13}$$

En la Tabla 5 se recopilan los parámetros de la planta del sistema térmico correspondiente al horno de muestra, a partir de ahora, cuando estos datos sean usados se dirá que hacen referencia al “**proceso real**”.

K	Tp	L
64.06	10 500	300

Tabla 5. Valores del proceso real

Como se puede observar los valores de tiempo son muy altos debido a que calentar este tipo de hornos requiere un proceso lento sobre todo para la protección del crisol cerámico que también está sometido al impacto de piezas de aluminio, por ello, y para facilitar las simulaciones posteriores que se van a realizar, se tomarán los tiempos en minutos, por lo tanto, cuando se toman valores en minutos para facilitar la simulación se dirá que hace referencia al “**proceso simulado**”.

$$G(s) = \frac{64.06 \cdot e^{-5 \cdot s}}{1 + 175 \cdot s} \quad \text{Ecuación 14}$$

Por lo tanto, los parámetros de la función de transferencia del proceso simulado quedan recogidos en la Tabla 6.

K	Tp	L
64.06	175	5

Tabla 6. Valores del proceso simulado

5 TEORÍA DE LOS SISTEMAS DE PRIMER ORDEN CON RETARDO

Una vez ya establecido que el sistema térmico del horno de muestras corresponde a un función de transferencia de primer orden con retardo, antes de comenzar con el diseño del controlador necesario, se procede a realizar una breve descripción de este tipo de sistemas y como responden ante determinadas entradas.

Los sistemas de primer se caracterizan por ecuaciones diferenciales de primer orden, lo que implica que el orden máximo de la derivada es uno. Cada sistema responde de manera diferente ante el mismo tipo de entrada debido a la ubicación de sus polos en el plano s , es importante destacar que no se debe controlar de la misma forma un sistema que contiene un polo como es el caso del horno de muestras de este trabajo, en comparación con sistemas que poseen, dos o más polos. Este trabajo se centra sólo en los sistemas de primer orden, los cuales tienen la forma indicada en la Ecuación 11, donde K representa la ganancia del sistema, L el retardo temporal en la respuesta de la salida cuando se aplica la entrada y τ la constante de tiempo, que corresponde al tiempo requerido para que la salida alcance el 62.3% del valor deseado.

Al analizar la Ecuación 11, se puede inferir que el polo de un sistema de primer orden está ubicado en el plano s en la posición que hace cero el denominador de la función de transferencia.

$$\tau \cdot s + 1 = 0 \rightarrow s = -\frac{1}{\tau}$$

Como se ha indicado anteriormente, la función de transferencia obtenida mediante la TdL permite conocer como responderá un sistema ante diferentes cambios en su entrada, como por ejemplo un impulso, un escalón, o una entrada en forma de rampa o parábola, lo más importante a conocer es:

- Régimen permanente o estacionario: Es la parte de la respuesta de un sistema que no desaparece cuando el tiempo tiende a infinito y “se convierte en completamente estable en ausencia de cualquier perturbación en la entrada. Cuando existe una diferencia entre el valor obtenido el régimen permanente y el valor esperado aparece un error en estado estacionario denominado precisión del sistema” [13]. Comúnmente se puede indicar que un sistema alcanza el régimen permanente cuando la respuesta llega al 95% del valor deseado.
- Régimen transitorio o dinámico: Esta parte de la respuesta sí que desaparece cuando el tiempo tiende a infinito y es afectada por las características del sistema o planta, es decir, cada polo genera un modo transitorio que es una parte del sumando que forman el régimen transitorio. El tiempo que dura este régimen se denomina tiempo de establecimiento y hay que sumarle el retardo si existe.

Si es sustituida la Ecuación 11 en la Ecuación 10, se establece que:

$$\frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{K \cdot e^{-L \cdot s}}{1 + \tau \cdot s} \quad \text{Ecuación 15}$$

A continuación, se procede a conocer la respuesta que tiene la Ecuación 15 ante diferentes tipos de entradas, en este caso se hará con las más comunes que son en escalón o en rampa.

5.1 RESPUESTA AL ESCALÓN EN SISTEMA DE PRIMER ORDEN CON RETARDO

Como la TdL de una entrada escalón no unitario es U/s , se sustituye $Y(s) = U/s$ en Ecuación 15, obteniendo:

$$X(s) = \frac{K \cdot e^{-L \cdot s}}{\tau \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{s} = K \cdot \left(\frac{U}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1} \right) \cdot e^{-L \cdot s} \quad \text{Ecuación 16}$$

Realizando los cálculos pertinentes se obtiene la antitransformada de Laplace o TdL inversa para obtener, a partir de la Ecuación 16, una Ecuación 17 en función del tiempo, según [14].

$$x(t) = K \cdot U \cdot \left(1 - e^{-\frac{(t-L)}{\tau}}\right) \cdot X \cdot (t - L)$$

Ecuación 17

Representando gráficamente la Ecuación 17 se obtiene la siguiente gráfica en función del tiempo en segundos, Figura 32.

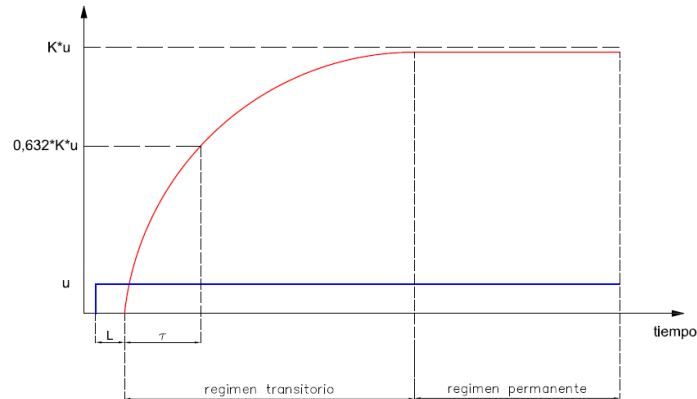


Figura 32. Respuesta de un sistema de primer orden ante entrada escalón

Como se puede ver en la Figura 32, un sistema de primer orden con retardo comienza un tiempo L después del cambio de estado de la entrada, y comienza a subir hasta alcanzar el valor deseado, toda esa zona se denomina régimen transitorio o dinámico y depende de la ubicación del polo de la función de transferencia en el plano s. Una vez alcanzado el valor deseado, cuando la señal no varía en función del tiempo se puede indicar que la respuesta ha entrado en régimen estacionario o permanente.

5.2 RESPUESTA A LA RAMPA DE SISTEMA DE PRIMER ORDEN CON RETARDO

El proceso comienza como en el apartado anterior, la transformada de Laplace de una entrada de rampa unitaria es U/s^2 , se sustituye $Y(s) = U/s^2$ en la Ecuación 15.

$$X(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \cdot \frac{U}{s^2} = \frac{U}{s^2} - \frac{\tau}{s} + \frac{\tau^2}{s + \frac{1}{\tau}}$$

Ecuación 18

Es el momento de realizar la antitransformada de Laplace a la Ecuación 18, obteniendo el siguiente resultado según [14]:

$$x(t) = K \cdot U \cdot \tau \cdot \left(\frac{(t-L)}{\tau} - 1 + e^{-\frac{(t-L)}{\tau}}\right) \cdot X \cdot (t - L)$$

Ecuación 19

Representado gráficamente la Ecuación 19 se obtiene:

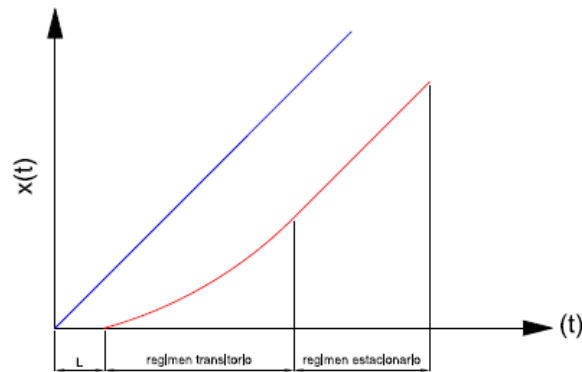


Figura 33. Respuesta de un sistema de primer orden ante entrada rampa

La Figura 33 representa la respuesta de un sistema de primer orden con retardo ante una entrada en rampa no unitaria, como tiene retardo, la respuesta en color rojo comenzará un tiempo L desde que comienza la entrada, luego tras un tiempo que dura el régimen transitorio la salida va consiguiendo la misma pendiente que la entrada hasta que lo consigue y comienza su régimen estacionario.

5.3 ANÁLISIS DEL RÉGIMEN TRANSITORIO O DINÁMICO

Como se ha indicado anteriormente, todo sistema de primer orden con retardo posee un único polo que determina el comportamiento en régimen transitorio de todo el sistema, también se ha establecido que para calcular el polo es necesario igualar a cero el denominador de la función de transferencia y se ha establecido que su ubicación es en $-\frac{1}{\tau}$.

El polo se representa en el plano complejo s , Figura 34, donde en cuyo eje de abscisas se representa la parte real del polo σ y un eje de ordenadas donde se coloca la parte imaginaria con la letra ω_j .

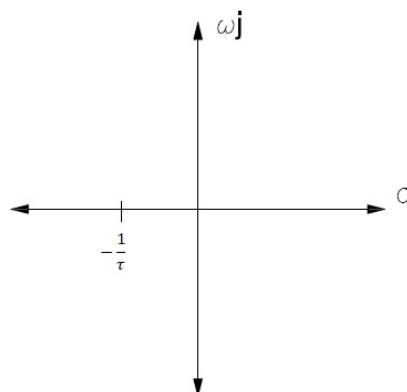


Figura 34. Representación del polo en el plano complejo

Si al calcular el polo éste se ubica en el semiplano izquierdo, quiere decir que el sistema será estable, además, la colocación del polo también determina la velocidad del régimen transitorio, cuando más se acerque al origen, más rápido será el sistema en alcanzar el valor deseado y, por el contrario, cuanto más lejos esté del origen más lento será.

Otro aspecto importante en el análisis dinámico de un sistema es conocer el tiempo de establecimiento t_s , que como se ha indicado anteriormente mide el tiempo hasta que se alcanza el 95% del valor deseado por el cual se establece que el sistema ha entrado en el régimen estacionario, tiene un valor de $4 \cdot \tau$ más el retardo establecido.

Esta representación, incluso con sistemas con más polos y ceros se denomina lugar de las raíces, que son unas reglas básicas para dibujar y conocer cómo se comportará el sistema en función de la ganancia K .

6 CONTROLADORES PID

6.1 INTRODUCCIÓN

Una vez obtenida el modelo de la función de transferencia y saber como reacciona, es necesario establecer el controlador capaz de cubrir las necesidades operativas del diseñador.

Existen diferentes metodologías para controlar un sistema, y más específicamente, un sistema térmico como el horno de muestras en el que se basa este trabajo. Entre estas metodologías se encuentran:

- PID (proporcional, integral y derivativo): Ajusta la salida del sistema para alcanzar y mantener el valor deseado en la entrada, mediante un algoritmo compuesto por tres acciones, proporcional, integral y derivativa.
- ON/OFF: Es el sistema de control más básico que existe y uno de los más utilizados históricamente, basado en activar y desactivar la salida del controlador según su valor respecto a la entrada.
- Control fuzzy: Su principio de funcionamiento es la lógica difusa, el controlador responde según unas reglas impuestas por el diseñador.
- Control predictivo: Controladores programados mediante técnicas avanzadas capaces de predecir el comportamiento futuro y responder enviando la acción necesaria en cada instante.
- Control adaptativo: Los controladores con esta tecnología implementada son capaces de ir modificando sus parámetros para adaptarse a las variaciones del sistema.

De los métodos anteriormente mencionados, los más adecuados para el sistema térmico en el que es objeto de este trabajo son dos, el **PID** y el **ON/OFF**, los cuales presentan ventajas y desventajas que han sido estudiadas previamente [15]. A continuación, se detallan las ventajas de cada uno:

- Ventajas del PID respecto al ON/OFF:
 - Control más preciso por el uso de señales analógicas
 - Mayor eficiencia energética
 - Mejor rendimiento en sistemas con retardos
 - Adaptabilidad mayor a todo tipo de sistemas
- Ventajas del ON/OFF respecto al PID:
 - Menor costo económico en componentes.
 - Menor mantenimiento
 - Muy adecuado a sistemas que no requieran gran precisión.

Las ventajas del control PID sobre el control ON/OFF son suficientes para determinar que, para el sistema térmico que es el enfoque de este trabajo, el PID es el método más adecuado para el control de la temperatura del horno de muestras.

Además, el horno de muestras se calienta mediante resistencias eléctricas. Según los resultados de un estudio:

“Al someter la resistencia calefactora a un sistema de control on-off y PID, se comprobó que el control PID presenta mejores resultados en cuanto al consumo de energía eléctrica en un 22,03 %, reduce la amplitud de las oscilaciones en un 60 % y mantiene confiable el sistema” [16]

Por lo tanto, se decide implementar el control del horno de muestras, que tiene una función de transferencia de primer orden con retardo, mediante un controlador PID.

Una vez seleccionado el tipo de control con el cual la temperatura del horno de muestras se regulará a unos valores introducidos por el operario, hay que comenzar con el diseño del controlador, donde hay que tener claro que:

“El diseño del controlador involucra tres pasos:

- Determinar que debe hacer el sistema y como lo tiene que hacer.
- Determinar la configuración del controlador relativa a como está conectado al proceso controlado.
- Determinar los valores de los parámetros del controlador para alcanzar los objetivos de diseño.” [17]

Siguiendo los pasos anteriores, las respuestas a cada uno de ellos son las siguientes:

- Se desea que la salida en voltaje del sistema que es convertida en temperatura mediante resistencias eléctricas sea capaz de alcanzar los valores fijados de setpoint y seguirlos de manera precisa y suave, y sobre todo en un tiempo determinado, es decir, ni muy rápido que pueda provocar problemas en el refractario, ni muy lento que prolongue el trabajo de obtención de probetas.
- El controlador se conectará al sistema mediante una salida analógica de 0 a 10 voltios que alimentará un bloque de relés en estado sólido a los cuales se conectan las resistencias eléctricas. Diagrama en el Apartado 8.3.
- Los valores del controlador se determinarán mediante un estudio de diferentes métodos de sintonización de controladores PID, el método cuya respuesta sea la más adecuada será el que establezca los valores para dichos parámetros. Estudio en el Apartado 7.3.

El controlador PID es uno de los algoritmos de control más utilizado en la industria debido a su robustez, precisión y rendimiento en el control de diversas variables, como posición, velocidad, temperatura, presión, y un largo etcétera que permite el control de diferentes tipos de sistemas o plantas.

Está formado por tres componentes: proporcional, integral y derivativa, con la particularidad de que éstos pueden utilizarse de manera independiente, en pares o en su totalidad. Esta flexibilidad proporciona diversas opciones para ajustar el control según las necesidades específicas del sistema.

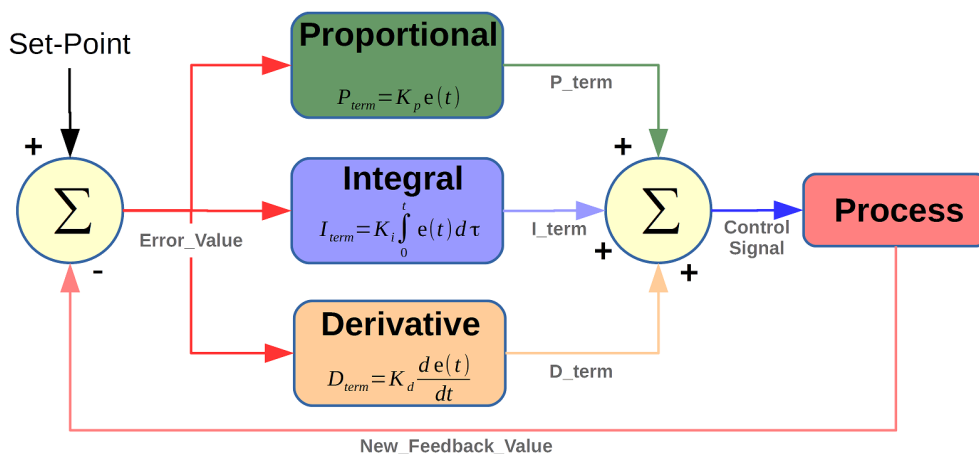


Figura 35. Componentes de un regulador PID [18]

6.2 ACCIÓN PROPORCIONAL

La acción proporcional corresponde a la P del regulador PID y su salida es directamente proporcional al error de entrada. Como se observa en la Figura 35, el error producido entre la diferencia entre el setpoint y el valor del proceso, denominado error_value, entra en la parte proporcional en la cual se aplica la siguiente expresión:

$$P_{term} = K_p \cdot e(t) \quad \text{Ecuación 20}$$

El efecto que tiene la acción proporcional es disminuir el error de una manera muy rápida cuanto mayor sea el valor de K_p , la parte del error afectada por la acción proporcional se va a denominar a partir de ahora e_p , la acción proporcional tiene un riesgo en las propiedades estáticas de un sistema, valores muy elevados o mal ajustados de K_p pueden provocar inestabilidades en el sistema. La ganancia K_p también afecta al comportamiento dinámico del sistema, al modificarla, los polos de dicho sistema evolucionan según el lugar de las raíces.

La acción proporcional siempre crea un error en el estado estacionario porque es incapaz de corregirlo por su propia filosofía.

6.3 ACCIÓN INTEGRAL

La acción integral de un regulador PID corresponde a la letra I y su principal función es eliminar el error en estado estacionario que la acción proporcional no puede corregir y llevarlo a 0 integrando dicho error durante un periodo de tiempo.

$$I_{term} = K_I \int e(t) dt = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad \text{Ecuación 21}$$

La acción integral afecta al comportamiento estático del sistema añadiendo un polo en el origen lo que aumenta en uno el tipo del sistema, esto es una mejora considerable y muy importante a la hora de evaluar el estado estacionario de un sistema.

Como inconveniente a la adición de un polo es la aparición de una asíntota más en el lugar de las raíces provocando un riesgo de inestabilidad en su comportamiento dinámico.

Habitualmente la acción integral se utiliza incluyendo acción proporcional, entonces en la salida del regulador habrá una acción $u(t)$ que será la suma de la P_{term} más la I_{term} y determinado por la expresión:

$$C_{PI} = u(t) = K_p + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad \text{Ecuación 22}$$

La expresión de la Ecuación 22 es muy importante porque indica los parámetros de ajuste de un controlador PI (C_{PI}), uno de los más utilizados en la industria, que, al fin y al cabo, es un regulador PID sin parte derivativa.

6.4 ACCIÓN DERIVATIVA

La acción derivativa corresponde a la letra D del controlador PID y se usa en combinación de la acción proporcional porque el cero que añade no lo coloca en el origen, si no en otra posición. La acción derivativa responde a la siguiente expresión:

$$D_{term} = K_D \frac{de(t)}{dt} = T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad \text{Ecuación 23}$$

Prácticamente la acción derivativa no tiene efecto sobre el régimen permanente, pero en la parte dinámica, al añadir un cero disminuye el número de asíntotas, mejora la estabilidad y disminuye las oscilaciones.

Como se ha comentado anteriormente, la acción derivativa va acompañada con acción proporcional, cuando esto ocurre se dice que el regulador es un PD, cuya expresión para configurar los parámetros son:

$$C_{PD} = u(t) = K_p + T_d \frac{d}{dt} e(t) = K_p (1 + T_d \cdot s) \quad \text{Ecuación 24}$$

Si a este controlador PD se le añade la parte integral y se forma lo que es un regulador PID la ecuación con la que se rige este tipo de controladores es:

$$C_{PID} = u(t) = K_p + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad \text{Ecuación 25}$$

$$C_{PID} = u(t) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad \text{Ecuación 26}$$

Una vez determinada la expresión de un controlador PID es necesario definir los valores para los parámetros K_p , T_i y T_d que cumplan con los requisitos del diseñador en cuanto a la respuesta del sistema antes entradas establecidas o perturbaciones que puedan ocurrir.

7 SINTONIZADO DE CONTROLADORES PID

Actualmente los problemas de control de sistemas industriales son resueltos mediante controladores PID, existen diferentes métodos y modelos para poder parametrizar dichos controladores, se separan en dos grupos, los basados en modelos, y los basados en ensayos experimentales.

7.1 AJUSTE BASADO EN MODELOS

7.1.1 SINTESIS DIRECTA

Este modelo de ajuste tiene por objetivo obtener una función de transferencia en lazo cerrado que cumpla las necesidades del usuario, pero está limitado porque este método puede provocar estructuras de PID irreales, solo es posible para funciones de transferencia de primer y segundo orden siendo los controladores tipo PI y PID los únicos que se pueden obtener.

Para realizar este método es necesario adoptar un modelo de la planta que realimentará el sistema térmico como se indica en la Figura 36, donde $Y(s)$ es la referencia establecida, $C(s)$ el controlador PID a diseñar, $G(s)$ es la planta del sistema térmico que se ha obtenido en ensayo experimental y $X(s)$ la salida que será comparada con la entrada.

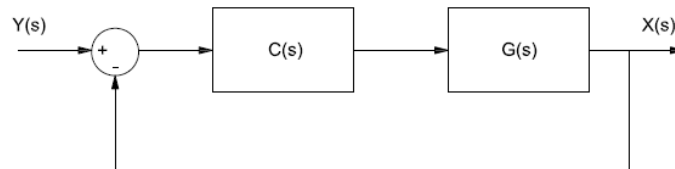


Figura 36. Diagrama de bloques del modelo de síntesis directa

Aplicando el álgebra de bloques se obtiene la Ecuación 27, que es la función de transferencia entre la salida y la entrada.

$$\frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{C(s) \cdot G(s)}{1 + C(s) \cdot G(s)} \quad \text{Ecuación 27}$$

El método de síntesis directa consiste en obtener una función de transferencia en lazo cerrado sencilla por el usuario, denominada $M(s)$, entonces se puede indicar que:

$$M(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} \quad \text{Ecuación 28}$$

Sustituyendo la Ecuación 28 en la Ecuación 27, el resultado es:

$$M(s) = \frac{C(s) \cdot G(s)}{1 + C(s) \cdot G(s)} \quad \text{Ecuación 29}$$

Como se ha indicado anteriormente, la función de transferencia $M(s)$ establecida por el usuario es preferible que sea sencilla, de orden uno con ganancia la unidad, aunque la planta sea de orden superior para facilitar los cálculos, puede ser del estilo:

$$M(s) = \frac{1}{\tau \cdot s + 1} \quad \text{Ecuación 30}$$

Realizando una igualdad entre las Ecuación 29 y la Ecuación 30 se obtiene lo siguiente:

$$\frac{C(s) \cdot G(s)}{1 + C(s) \cdot G(s)} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1} \quad \text{Ecuación 31}$$

Como se puede apreciar en la Ecuación 31, la filosofía de este método consiste en encontrar un controlador $C(s)$ que convierta toda la función de transferencia en lazo cerrado en una sencilla de operar como es el caso de la función de primer orden. Dentro de la ecuación aparece también la planta o sistema, se va a resolver este caso para un ejemplo de planta de primer orden, con el cual, el resultado será un controlador PI, por el contrario, si se supone una planta de segundo orden, el controlador será de tipo PID.

$$G(s) = \frac{K}{T_p \cdot s + 1} \quad \text{Ecuación 32}$$

El siguiente paso es sustituir la Ecuación 32 en la ecuación de igualdad Ecuación 31:

$$\frac{C(s) \cdot \frac{K}{T_p \cdot s + 1}}{1 + C(s) \cdot \frac{K}{T_p \cdot s + 1}} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1} \quad \text{Ecuación 33}$$

Para terminar este método es necesario despejar $C(s)$ de la Ecuación 33.

$$C(s) = \frac{T_p \cdot s + 1}{K \cdot \tau \cdot s} \quad \text{Ecuación 34}$$

Una vez obtenida la Ecuación 34, el resultado como se ha indicado anteriormente para una planta de primer orden es un controlador PI, recordando que la ecuación de dicho controlador es Ecuación 22, si se opera Ecuación 34 para que tenga forma de controlador, el resultado es descrito en la Ecuación 35, por lo tanto, la constante proporcional será igual al resultado obtenido en la Ecuación 36, y el tiempo de integración a la Ecuación 37:

$$C_{PI} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) = \frac{T_p}{K \cdot \tau} \left(1 + \frac{1}{T_p \cdot s} \right) \quad \text{Ecuación 35}$$

$$K_p = \frac{T_p}{K \cdot \tau} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$T_i = T_p \quad \text{Ecuación 37}$$

El primer método para realizar una simulación del sistema o planta del trabajo que se está realizando no es válido porque existe un retardo no contemplado en dicho método, por lo tanto, se indica en este apartado simplemente la teoría del método de síntesis directa como una posibilidad más para otros tipos de sistemas, pero no para el caso del horno de muestras por el cual se está realizando este trabajo.

7.1.2 IMC – MODELO DEL CONTROL INTERNO

Este método es similar al de síntesis discreta, en el diagrama de bloques del IMC (internal model control) el controlador asume un modelo interno que es una copia de la planta donde solo se realimenta lo que no está previsto de dicho modelo. Para la explicación y el proceso de la obtención de las ecuaciones finales se realiza mediante el apoyo referenciado a continuación [19], y con aportaciones propias.

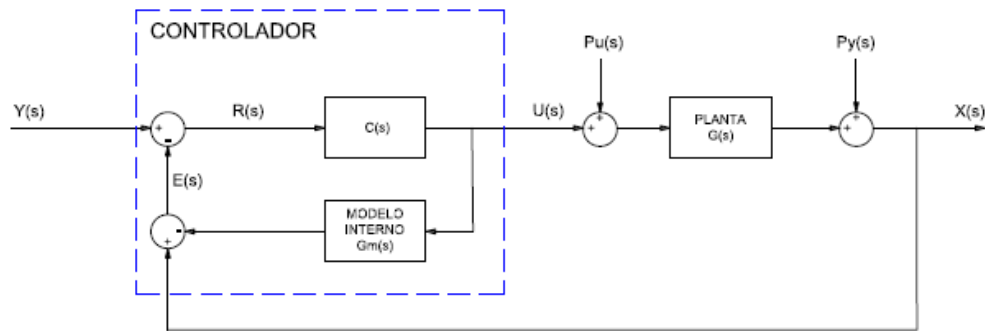


Figura 37. Diagrama de bloques del método IMC

La Figura 37 representa el diagrama de bloques utilizado en este método, si no hubiera errores en el modelado el modelo interno $G_m(s)$ sería igual a la planta $G(s)$ en la cual, hay la posibilidad que le entren perturbaciones de entrada $P_u(s)$ y perturbaciones de salida $P_y(s)$. El controlador está formado por todos los elementos del recuadro azul a trazos, por una parte, el modelo interno $G_m(s)$ que es una simulación de la planta, y por otra, el controlador original cuyos parámetros se van a modificar al incluir el modelo interno. Como se ha comentado anteriormente, sólo lo no previsto por el modelo interno se realimenta, el resto, lo previsto, no es necesario.

Cabe también destacar que, el error de predicción $E(s)$ es la resta aritmética entre la salida $X(s)$ y el producto de la acción $U(s)$ por el modelo interno $G_m(s)$, es decir, la diferencia entre las medidas de la salida y las medidas que se obtienen mediante la simulación del modelo interno, también se puede explicar como el error de modelado entre la planta con las perturbaciones y el modelo interno. Esta es la idea del método IMC, realimentar solo el error de predicción para compararlo con la entrada $R(s)$, si no hay errores en el modelado y no existen perturbaciones el error de predicción es cero y por lo tanto no es necesario realimentar nada.

En el caso donde el modelo interno sea igual a la planta, las ecuaciones que representan el diagrama de bloques serían:

$$U(s) = (Y(s) - E(s)) \cdot C(s) \quad \text{Ecuación 38}$$

$$X(s) = (U(s) + P_u(s)) \cdot G_m(s) + P_y(s) \quad \text{Ecuación 39}$$

$$E(s) = X(s) - G_m(s) \cdot U(s) = G_m(s) \cdot P_u(s) + P_y(s) \quad \text{Ecuación 40}$$

El siguiente paso sería sustituir el error, Ecuación 40, en la Ecuación 38, para obtener una expresión de la acción del modo:

$$U(s) = C(s) \cdot [Y(s) - G_m(s) \cdot P_u(s) - P_y(s)] \quad \text{Ecuación 41}$$

Ahora es el turno de sustituir la ecuación que se acaba de obtener Ecuación 41 en la ecuación de la señal de salida $X(s)$, para obtener:

$$X(s) = G_m(s) \cdot C(s) \cdot Y(s) + [1 - G_m(s) \cdot C(s)]G_m(s) \cdot P_u(s) + [1 - G_m(s) \cdot C(s)]P_y(s) \quad \text{Ecuación 42}$$

Si $G_m(s)$ y $C(s)$ son estables, la ecuación de la salida Ecuación 42, es estable y el modelo puede llevarse a cabo, como $G_m(s)$ es el modelo interno con la forma más interesante para facilitar los cálculos, se puede decir que:

$$C(s) = G_m^{-1}(s) \quad \text{Ecuación 43}$$

Con la igualdad de la Ecuación 43 se establece, sustituyéndola en Ecuación 42, que:

$$X(s) = Y(s)$$

Ecuación 44

Como lo deseado es que la entrada sea igual a la salida, es decir, que su cociente sea 1, el controlador tiene que ser la inversa del modelo interno, esto provoca que la acción de salida del controlador tenga la forma:

$$U(s) = G_m^{-1}(s) \cdot Y(s) - Pu(s) - G_m^{-1}(s) \cdot Py(s)$$

Ecuación 45

El problema radica en que la igualdad de la Ecuación 43 no se cumple de manera tan sencilla en la práctica, ya que la implementación de un bucle perfecto es prácticamente inalcanzable. Esto se debe a que la respuesta en frecuencia del controlador $C(s)$ no puede tender a infinito.

Como conclusiones a este método, se puede señalar que la realimentación gestiona las diferencias entre la simulación y la medición, además, las entradas, perturbaciones y salidas de los bloques de este método dependen directamente del controlador $C(s)$, este enfoque permite obtener reglas de sintonización de manera sencilla, como se demuestra a continuación. Finalmente, el bucle ideal de la Ecuación 43 debe adaptarse para hacerse realizable, a fin de evitar problemas de saturación e inversiones en el retardo.

Tras haber analizado el controlador ideal y la dificultad de llevarlo a la práctica, se propone una solución, que se detalla en la Figura 38, esta consiste en una modificación del diagrama de bloques, de manera que la entrada que originalmente tenía el controlador en la Figura 37 sea equivalente a la entrada en la versión modificada.

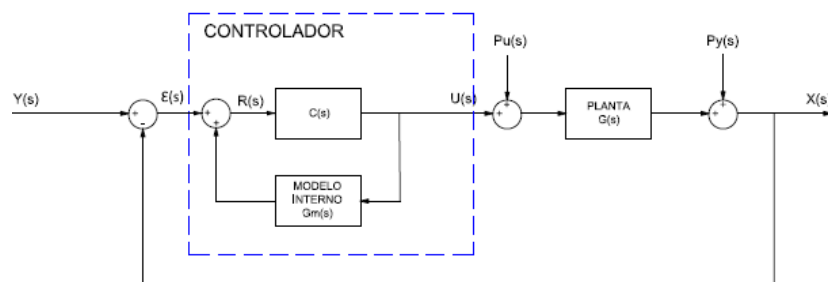


Figura 38. Diagrama de bloques del método IMC con modificación

Lo más llamativo que cabe destacar en esta modificación es el cambio en el error, ahora aparece un nuevo error denominado $\mathcal{E}(s)$ que corresponde a la diferencia entre la señal de entrada y la salida. Observando el diagrama de bloques de la Figura 37 se puede indicar que la señal que entra al controlador $C(s)$, siendo a partir de ahora denominada como $R(s)$ es igual a:

$$R(s) = Y(s) - E(s) = Y(s) - X(s) + G_m(s) \cdot U(s)$$

Ecuación 46

Si como se indica anteriormente, que aparece un nuevo error que es la diferencia entre la salida y la entrada, observando la Ecuación 46 se aprecia que aparece tal diferencia, por lo tanto, se puede reescribir de la siguiente forma:

$$R(s) = \mathcal{E}(s) + G_m(s) \cdot U(s)$$

Ecuación 47

Con la Ecuación 47 queda formulada la señal de entrada al controlador $R(s)$ tanto para el diagrama de bloques original de la Figura 37, como para la modificación de la Figura 38.

Lo que ocurre con la modificación del diagrama de bloques es que ahora aparece un controlador típico $K(s)$, Figura 39, compuesto por los bloques $C(s)$ y $G_m(s)$, al cual le entra un error $\mathcal{E}(s)$ que pasa por unas ecuaciones lineales para producir una acción de control $U(s)$.

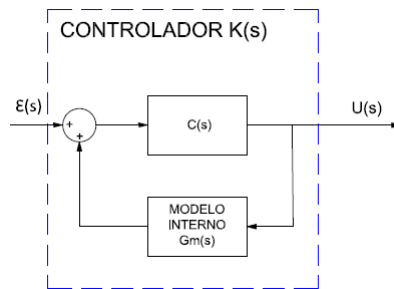


Figura 39. Diagrama de bloques del controlador $K(s)$

La primera ecuación que se obtiene de este controlador es la de su acción, que aplicando algebra de bloques se obtiene que:

$$U(s) = K(s) \cdot E(s) \quad \text{Ecuación 48}$$

Siendo $K(s)$, aplicando las operaciones entre bloques del tipo:

$$K(s) = \frac{C(s)}{1 - G_m(s) \cdot C(s)} \quad \text{Ecuación 49}$$

Con la Ecuación 49 queda descrito un controlador clásico $K(s)$, y se aprovecha para formular la ecuación de un controlador por modelo interno despejando $C(s)$.

$$C(s) = \frac{K(s)}{1 + G_m(s) \cdot K(s)} \quad \text{Ecuación 50}$$

Estas igualdades entre $C(s)$ y $K(s)$ los convierten en estables si $G_m(s)$ lo es. Así pues, se generan dos tipos de modelos para resolver el controlador por IMC, primero, usar el IMC como una metodología de diseño de reguladores convencionales $C(s)$ que para implementarlo no es posible, pero si hacerlo simulando $K(s)$, y segundo, modelar por separado $G_m(s)$ y $C(s)$ y simularlo con la relación que tienen entre ellos en la ecuación del controlador $K(s)$.

Considerando las dos posibles alternativas para obtener un controlador mediante el método de control interno, la opción más sencilla es emplear un filtro paso bajo $M(s)$, el cual hace posible la Ecuación 43, como se había mencionado previamente, que dicha igualdad es prácticamente irrealizable, por lo tanto, se propone $M(s)$, Ecuación 51, donde λ es la constante de tiempo y r representa el grado del filtro:

$$M(s) = \frac{1}{(\lambda \cdot s + 1)^r} \quad \text{Ecuación 51}$$

La Ecuación 43 quedaría de la siguiente manera, donde entra en juego el parámetro r que debe ser mayor o igual al grado del polinomio en s de $G_m(s)$, con el fin de contrarrestarlo en el diagrama de Bode, por lo tanto, λ y r son los parámetros de diseño y tienen que ser elegidos para que el diagrama de bode de $C(s)$ no se sature, evitando también la amplificación excesivas de altas frecuencias y las respuestas ante un escalón sea lo suficientemente rápida:

$$C(s) = G_m^{-1}(s) \cdot M(s) \quad \text{Ecuación 52}$$

Aplicando la Ecuación 52 en la ecuación de la señal de entrada de la Ecuación 42 y considerando el sistema ideal sin perturbaciones, se establece lo siguiente:

$$X(s) = C(s) \cdot Y(s) \quad \text{Ecuación 53}$$

Considerando un controlador $K(s)$, conociendo su fórmula en la Ecuación 49, se procede a sustituir en ella la Ecuación 52, dando por resultado:

$$K(s) = \frac{G_m^{-1}(s) \cdot M(s)}{1 - G_m(s) \cdot G_m^{-1}(s) \cdot M(s)} = \frac{G_m^{-1}(s) \cdot M(s)}{1 - M(s)} = \frac{M(s)}{G_m(s)[1 - M(s)]} \quad \text{Ecuación 54}$$

Para desarrollar la Ecuación 54, es necesario conocer la función de transferencia del modelo interno $G_m(s)$, en este caso se utilizará una función de primer orden, tal como se representa en la Ecuación 32. Por lo tanto, $M(s)$ tendrá la forma de la Ecuación 51 pero con r igual a 1, ya que el grado de $G_m(s)$ es 1. Así, la expresión resultante será la siguiente:

$$K(s) = \frac{\frac{1}{\lambda \cdot s + 1}}{\frac{K}{\tau \cdot s + 1} \cdot \left[1 - \frac{1}{\lambda \cdot s + 1}\right]} = \frac{\tau \cdot s + 1}{K \cdot \lambda \cdot s} = \frac{\tau}{K \cdot \lambda} \left(1 + \frac{1}{\tau \cdot s}\right) \quad \text{Ecuación 55}$$

Se puede observar que la Ecuación 55 tiene la misma forma que un controlador PI como el de la Ecuación 35, por lo tanto, se puede indicar que los valores de ganancia son dispuestos por la Ecuación 56 y el tiempo de integración es el mismo que en el método de síntesis directa, por lo tanto, se puede usar la misma Ecuación 57.

$$K_p = \frac{\tau}{K \cdot \lambda} \quad \text{Ecuación 56}$$

$$Ti = \tau$$

Ecuación 57

Si se quiere aplicar este método a un sistema de primer orden con retardo como es el necesario para la función de transferencia del horno de muestras que se ha obtenido, hay que realizar las siguientes modificaciones.

Ya se había comentado anteriormente que la Ecuación 43 es irrealizable, pero existe una solución factorizando $G_m(s)$ en las partes que se pueden invertir y que se denominará a partir de ahora $G_{m0}(s)$, donde se incluirán todos los ceros y polos de la función de transferencia que se encuentren en el semiplano izquierdo, y una parte no invertible, $G^+(s)$ donde se incluirán los retardos y los polos en fase no mínima, por lo tanto, $G_m(s)$ sería del estilo:

$$G_m(s) = G_{m0}(s) \cdot G^+(s) \quad \text{Ecuación 58}$$

Sabiendo que la ecuación de primer orden con retardo tiene por función de transferencia la Ecuación 11, la factorización de $G_m(s)$ será:

$$G_{m0}(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \quad \text{Ecuación 59}$$

Ecuación 60

$$G^+(s) = e^{-L \cdot s}$$

Ahora es el momento de operar la Ecuación 52, pero con un cambio, solo hay que invertir la parte invertible, es decir $G_{m0}(s)$, por lo tanto, la ecuación del controlador $C(s)$ resultará:

$$C(s) = G_{m0}^{-1}(s) \cdot M(s) = \frac{\tau \cdot s + 1}{K} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot s + 1} \quad \text{Ecuación 61}$$

Ahora, como se ha realizado anteriormente para el modelo interno de primer orden sin retardo, hay que sustituir la Ecuación 61 en la Ecuación 49, siendo el resultado:

$$K(s) = \frac{\frac{\tau \cdot s + 1}{K(\lambda \cdot s + 1)}}{1 - \frac{K \cdot e^{-L \cdot s}}{\tau \cdot s + 1} \cdot \frac{\tau \cdot s + 1}{K(\lambda \cdot s + 1)}} = \frac{\frac{\tau \cdot s + 1}{K(\lambda \cdot s + 1)}}{1 - \frac{e^{-L \cdot s}}{\lambda \cdot s + 1}} \quad \text{Ecuación 62}$$

Si se realiza la primera aproximación de la serie de Taylor para la función exponencial $e^{-L \cdot s}$, como indica la Ecuación 63, y se sustituye en la Ecuación 62, el resultado es:

$$e^x \approx 1 + \frac{x}{1!} \mapsto e^{-L \cdot s} \approx 1 + \frac{-L \cdot s}{1!} \approx 1 - L \cdot s \quad \text{Ecuación 63}$$

$$K(s) = \frac{\frac{\tau \cdot s + 1}{K(\lambda \cdot s + 1)}}{1 - \frac{1 - L \cdot s}{\lambda \cdot s + 1}} = \frac{\tau \cdot s + 1}{K \cdot (L + \lambda) \cdot s} \quad \text{Ecuación 64}$$

Se puede apreciar que la Ecuación 64 tiene la misma forma que un controlador PI como el de Ecuación 35, y por lo tanto, de la Ecuación 64 se pueden extraer los parámetros para la configuración de dicho controlador, la ecuación de la ganancia proporcional ha cambiado con la introducción del retardo, como refleja la Ecuación 65, pero el tiempo de integración continua coincidiendo con la constante de tiempo.

$$K_p = \frac{\tau}{K(\lambda + L)} \quad \text{Ecuación 65}$$

$$Ti = \tau$$

Ecuación 57

Como se ha indicado anteriormente, modificando el valor de λ se puede cambiar la agresividad del control según las siguientes reglas:

- Ajuste agresivo $\lambda = \max\{0.1 \cdot \tau; 0.8 \cdot L\}$ Ecuación 66

- Ajuste moderado $\lambda = 10 \cdot \max\{0.1 \cdot \tau; 0.8 \cdot L\}$ Ecuación 67

- Ajuste conservador $\lambda = 100 \cdot \max\{0.1 \cdot \tau; 0.8 \cdot L\}$ Ecuación 68

Los parámetros para realizar un controlador IMC son los recogidos en la Tabla 7, a los cuales hay que modificar λ según el tipo de ajuste que se desee.

Kp	Ti	Td
$\frac{\tau}{K} \cdot \frac{1}{\lambda + L}$	τ	N/A

Tabla 7. Ecuaciones para la configuración de un controlador IMC

7.1.3 CONTROL IMC REALIZADO POR SKOGESTAD

El ingeniero Sigurd Skogestad (agosto, 1955) realizó un estudio de mejora del método IMC que pasó a denominarse **SIMC** mediante una publicación titulada “Tuning for smooth PID control with acceptable disturbance rejection” en 2003 [20].

Este método permite modificar los parámetros de un controlador PID mediante una constante de tiempo deseada mediante un experimento simple en lazo cerrado, una ventaja de este método es que, con la simple modificación de esta constante, cambia todos los parámetros del PID para hacer un control desde agresivo a robusto.

Para calcular la constante de tiempo T_{BC}^d es necesario establecer un tiempo de respuesta deseada.

$$Tr = 3T_{BC}^d + L \quad \text{Ecuación 69}$$

Con el valor de T_{BC}^d ya obtenido, los parámetros de PID se obtienen a partir de la Tabla 8.

Kp	Ti	Td
$\frac{\tau}{K} \cdot \frac{1}{T_{BC}^d + L}$	$\min\{\tau, 4(T_{BC}^d + L)\}$	0

Tabla 8. Ecuaciones para la configuración de un controlador SIMC

7.2 AJUSTE BASADO EN ENSAYOS EXPERIMENTALES

7.2.1 SINTONIZACIÓN PID CUANTITATIVA (ZIEGLER & NICHOLS)

La sintonización de controladores PID comenzó en noviembre de 1942 cuando dos ingenieros, John G. Ziegler (1909-1997) y Nathaniel B. Nichols (1914-1997) publicaron un paper denominado “Optimum Setting for Automatic Controllers” en la revista “Transactions of the American Society of Mechanical Engineers”, en dicho documento se ofrecían recomendaciones para la configuración de controladores PID que pueden ser utilizados todavía en nuestros días consultando la siguiente tabla. Esta sintonización puede presentar rebasamientos muy grandes, pero responde muy rápido frente a perturbaciones [21].

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{\tau}{K \cdot L}$	∞	0
PI	$0.9 \cdot \frac{\tau}{K \cdot L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \cdot \frac{\tau}{K \cdot L}$	$2 \cdot L$	$0.5 \cdot L$

Tabla 9. Ecuaciones para la configuración de un controlador Ziegler-Nichols

7.2.2 SINTONIZACIÓN PID (COHEN & COON)

Posteriormente a la publicación de Ziegler-Nichols, aparece en 1953 un estudio teórico sobre sintonizado de controladores con retraso temporal denominado “Theoretical Consideration of Retarded Control”, este paper fue publicado en la revista “Transactions of the American Society of Mechanical Engineers” por los ingenieros George Cohen y Gilbert Coon, los cuales, utilizaron los parámetros del sistema en bucle abierto para obtener los valores del controlador sin utilizar cálculos complejos, por eso se hizo muy popular, aunque los autores indican que tal vez sea necesario realizar ajuste manuales a los resultados obtenidos para lograr el rendimiento deseado [22].

Se establece una tabla para obtener los valores de los parámetros con controlador:

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L} \left(1 + \frac{L}{3 \cdot \tau}\right)$	0	0
PI	$\frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L} \left(0.9 + \frac{L}{12 \cdot \tau}\right)$	$L \cdot \frac{30 + \frac{3 \cdot L}{\tau}}{9 + \frac{20 \cdot L}{\tau}}$	0
PID	$\frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4 \cdot \tau}\right)$	$L \cdot \frac{32 + \frac{6 \cdot L}{\tau}}{13 + \frac{8 \cdot L}{\tau}}$	$L \cdot \frac{4}{11 + 2 \cdot \frac{L}{\tau}}$

Tabla 10. Ecuaciones para la configuración de un controlador Cohen-Coon

7.3 SIMULACIÓN DE LOS SINTONIZADOS DEL PID

En este punto, se dispone de un sistema o planta con dos funciones de transferencia: una correspondiente al **proceso real**, representado por la Ecuación 13, y otra para el **proceso simulado**, expresada en la Ecuación 14. Como se mencionó anteriormente, esta diferenciación es necesaria debido a que el proceso real presenta una respuesta muy lenta, lo que permite simular diversos métodos de **sintonización para los controladores PID en el proceso simulado**.

La gráficas representadas en los vídeos y en las figuras que muestran la respuesta tienen la siguiente leyenda para este y el resto de los métodos de sintonización:

- Curva azul: Valor de setpoint
- Curva roja: Temperatura simulada
- Curva verde: Efecto de la acción que proporciona el controlador

PARÁMETROS POR DEFECTO DE SIEMENS

El software de Siemens, Tia Portal, dispone por defecto en sus controladores PID unos parámetros preestablecidos y ya estudiados para la prueba inicial, antes de realizar los métodos de sintonización anteriormente explicados. Los valores son los siguientes:

☒ Activar entrada manual

Ganancia proporcional:

Tiempo de integración: s

Tiempo derivativo: s

Coefficiente retardo derivativo:

Ponderación de la acción P:

Ponderación de la acción D:

Tiempo muestreo algoritmo PID: s

Regla para la optimización

Estructura del regulador:

Figura 40. Valores del PID por defecto en el proceso simulado

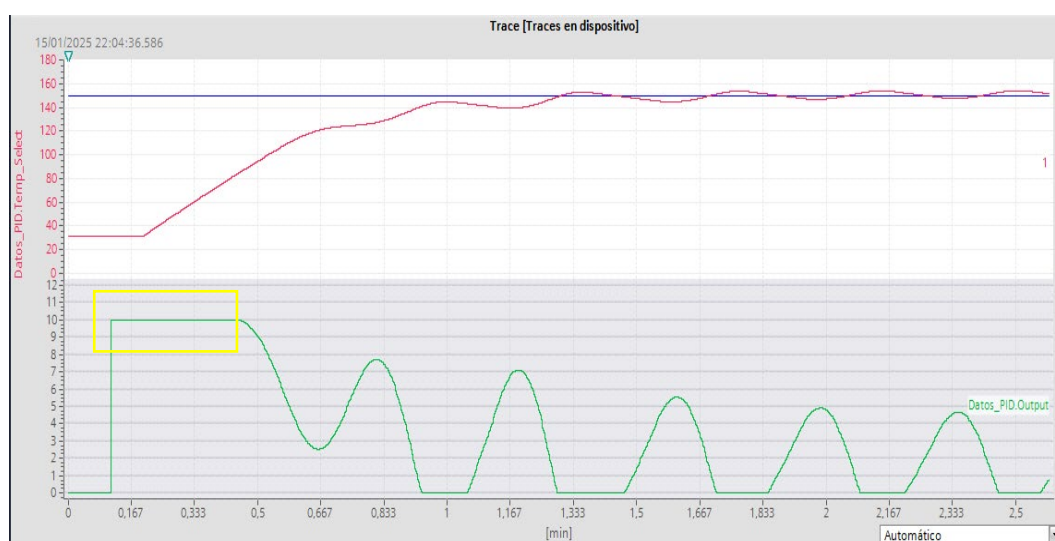


Figura 41. Respuesta del proceso simulado mediante los parámetros por defecto de Siemens

Se puede apreciar en el Video 1 y en la Figura 41, comienza el controlador ofreciendo en la salida saturándose y se reduce drásticamente porque la temperatura simulada alcanza rápidamente el valor de setpoint. Posteriormente, comienza a regular la temperatura simulada respecto al setpoint con oscilaciones que tienden al infinito. Claramente con los valores que pone Siemens por defecto en el control PID no se puede realizar un buen control del sistema térmico porque es una respuesta muy oscilatoria.

Video 1 - [Respuesta del proceso simulado mediante parámetros por defecto de Siemens](#)

La saturación del controlador (marcado en amarillo en la Figura 41) ocurre cuando la señal de la acción producida en la salida del PID excede los límites físicos del actuador, en este caso los 10 VDC de la salida analógica del autómatas programable que se verá en el Apartado 8.2.

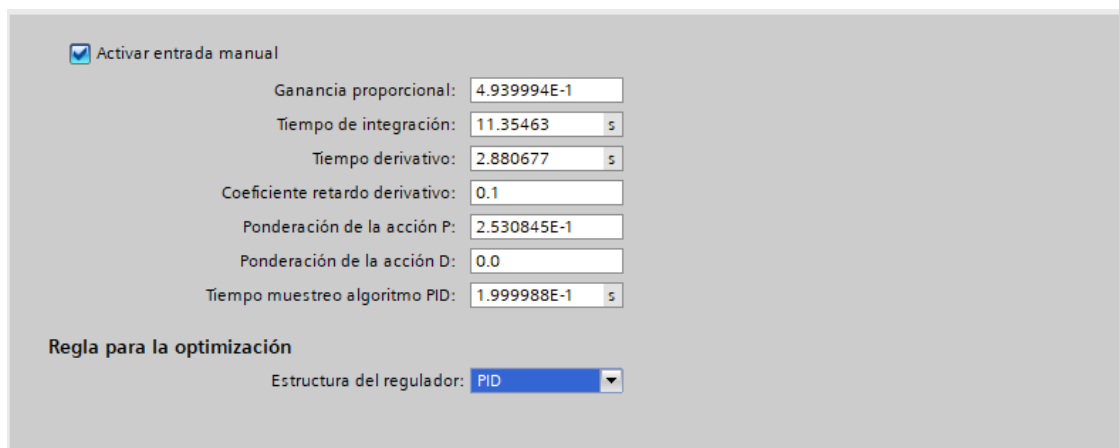
Es producida cuando existen una diferencia muy grande entre la variable controlada, en este caso la temperatura, y el setpoint establecido, tan grande que es mayor que el término proporcional, antes indicado en la Ecuación 20. Por lo tanto, si se desea que no se sature el controlador para comprobar la respuesta, lo ideal es ajustar el setpoint a la parte proporcional del propio controlador, en este caso:

$$P_{term} = K_P \cdot e(t) \rightarrow e(t) = \frac{P_{term}}{K_P} = \frac{10}{1} = 10$$

Es decir, el salto para no saturarse el controlador no puede superar los 10 °C, entonces, si se parte de una temperatura ambiente de 31.2 °C, el valor de setpoint debe ser de 41.2 °C para que no se sature, pero con los datos por defecto de Siemens el proceso va a ser irrealizable.

El software de Siemens Tia Portal permite realizar una optimización fina de un controlador PID, como se puede observar en el Video 2, los parámetros del controlador se recalculan modificando los originales. Los nuevos valores del controlador PID tras el proceso de optimización fina se muestran en la Figura 42.

Video 2 - [Proceso de optimización fina del software de Tia Portal](#)



☒ Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 4.939994E-1

Tiempo de integración: 11.35463 s

Tiempo derivativo: 2.880677 s

Coefficiente retardo derivativo: 0.1

Ponderación de la acción P: 2.530845E-1

Ponderación de la acción D: 0.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 1.999988E-1 s

Regla para la optimización

Estructura del regulador: PID

Figura 42. Parámetros del controlador PID con los valores tras la optimización fina

Con los nuevos valores tras la optimización fina de Siemens, se procede a realizar de nuevo la simulación.

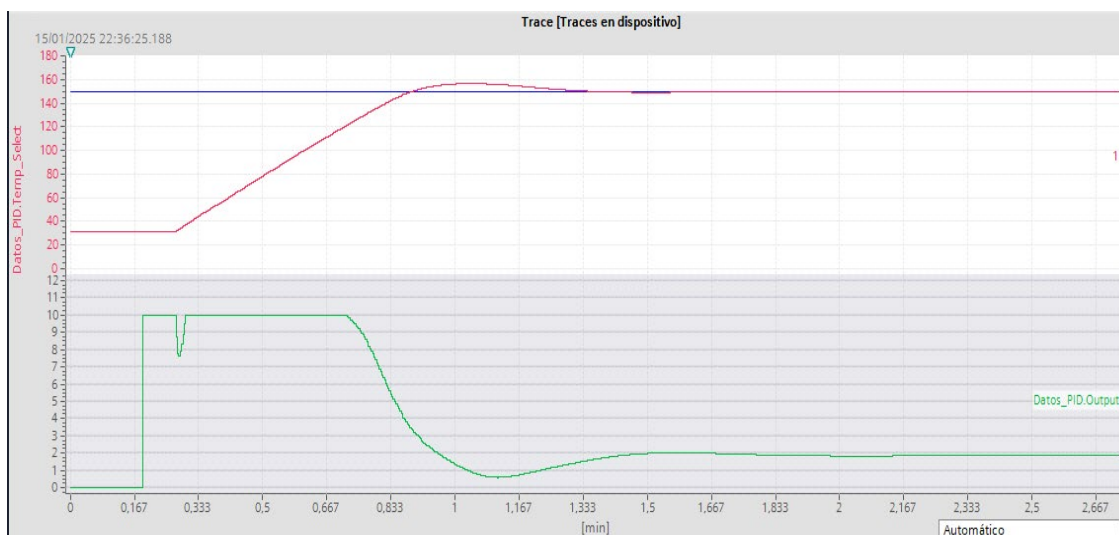


Figura 43. Respuesta del proceso simulado mediante la optimización fina de Siemens

Video 3 - [Respuesta del proceso simulado mediante la optimización fina de Siemens](#)

La simulación como recoge el Video 3 y la Figura 43, ha resultado como se esperaba debido a que el setpoint es mucho mayor que el salto producido por el error y el valor límite de la acción. Además, ocurre un rebasamiento del valor objetivo.

El salto para evitar la saturación corresponde, según la Ecuación 20, y como se ha realizado anteriormente, es un valor de 20.25 °C, por lo tanto, se va a simular con un setpoint de 55 °C.

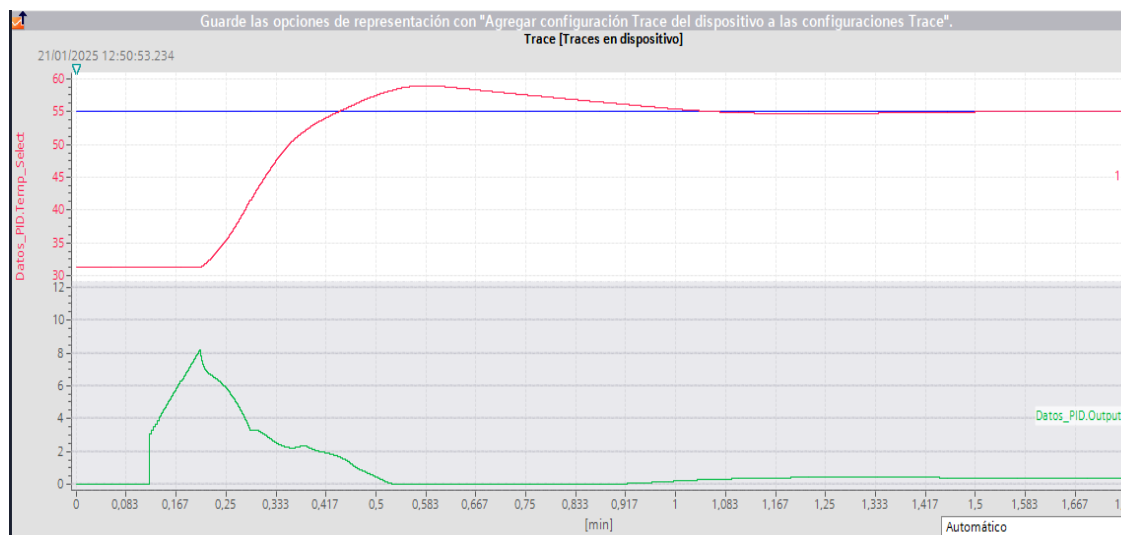


Figura 44 Respuesta del proceso simulado mediante la optimización fina de Siemens bajando el setpoint.

Video 4 - [Respuesta del proceso simulado mediante la optimización fina de Siemens bajando el setpoint a 55 °C](#)

Tras la simulación con un setpoint de 55 °C como se observa en la Figura 44 y en el Video 4, se observa un sobrepasamiento leve hasta que la temperatura simulada se estabiliza el valor de setpoint establecido, para mitigar este rebasamiento se puede reducir un poco el valor de la ganancia proporcional pero puede provocar que el tiempo de respuesta aumentara, alternatively también se puede reducir un poco el valor del tiempo de integración para que el sistema sea menos sensible a errores acumulativos, aunque esto puede aumentar ligeramente el error estacionario.

También se puede observar que la acción del controlador no llega al valor máximo, esto es debido a que, tras la optimización fina de Siemens, ha reducido el valor de ponderación de la componente proporcional, como resultado, la acción comienza incrementándose gradualmente por la contribución de la componente integral, mientras que el descenso presenta una forma no uniforme influenciada por la acción derivativa.

A continuación, y con base en los cálculos de los Apartado 7.1 y 7.2, junto con el programa de simulación que se detallará en el Apartado 9.1.1, se lleva a cabo un estudio de los diferentes tipos de sintonización, tanto del **proceso real** como del **proceso simulado**, no obstante, debido a la extensión de los tiempos requeridos en el proceso real, **sólo es posible realizar la simulación del proceso simulado**, que serán las respuestas obtenidas en video.

IMC-MODELO DEL CONTROL INTERNO

La sintonización por IMC del proceso real, representado por la Ecuación 13, proporciona los valores correspondientes para el controlador, los cuales se representan en la Tabla 11, y se derivan a partir de las ecuaciones de la Tabla 7.

Como se ha explicado con anterioridad en este modelo, modificar el valor de λ implica cambiar la velocidad de la regulación, simplemente se simulará el control agresivo porque el resto da la sensación de que serán demasiado lentos.

Por lo tanto, la λ del control agresivo tendrá un valor de 1050, proporcionando los siguientes valores para el controlador:

Kp	Ti	Td
0,1214	10500	0

Tabla 11. Parámetros del PID del proceso real mediante el método IMC

Para el proceso simulado se usa los valores del ensayo en minutos recogidos en la Ecuación 14, al igual que en el caso anterior, la λ tiene un valor de 17.5, siendo los valores para el controlador los mostrados en la Tabla 12.

Kp	Ti	Td
0,1214	175	0

Tabla 12. Parámetros del PID del proceso simulado mediante el método IMC

Como su nombre indica, será el proceso simulado el encargado de mostrar cómo responde el sistema ante los valores del controlador obtenidos, éstos son introducidos al programa de simulación como muestra la Figura 45.

☒ Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 0.1214

Tiempo de integración: 175 s

Tiempo derivativo: 0.0 s

Coefficiente retardo derivativo: 0.1

Ponderación de la acción P: 1.0

Ponderación de la acción D: 0.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 0.1 s

Regla para la optimización

Estructura del regulador: PI

Figura 45. Valores del PID según IMC en el proceso simulado

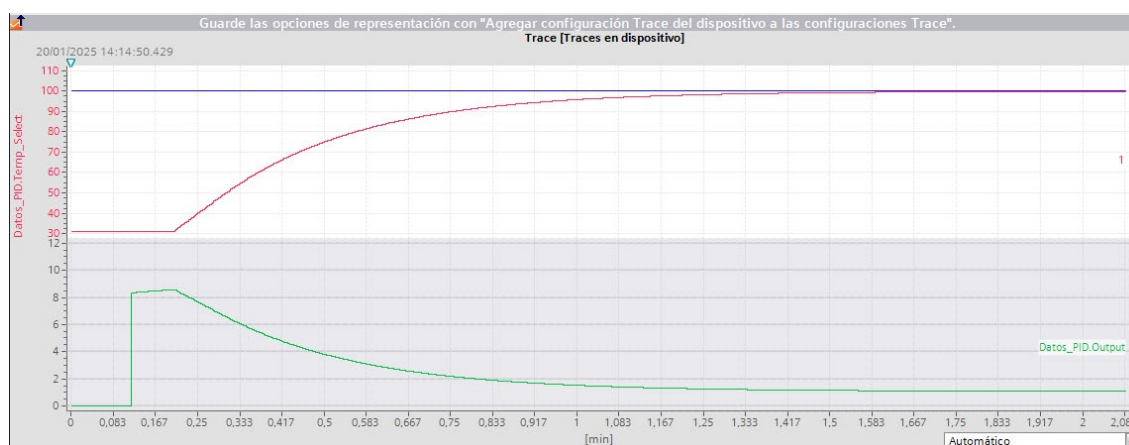


Figura 46. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado IMC



Video 5 - [Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado IMC](#)

Tras la simulación del método IMC para establecer los parámetros del controlador PID, el cual puede observarse en el Video 5 y la Figura 46, se llega a la conclusión que, como el salto para evitar la saturación tiene un valor de 82.37 °C y el valor de arranque es la temperatura ambiente de 31.2 °C, el setpoint máximo para evitar que se sature el controlador tiene un valor de 113.57 °C, por lo tanto, se establecen 100 °C y como se puede ver en la curva de la acción, ésta no llega al valor máximo de 10 VDC.

CONTROL IMC REALIZADO POR SKOGESTAD

Como se ha realizado con anterioridad, primero son calculados los parámetros para el proceso real, para ello, se usará la Ecuación 13 con las ecuaciones de la Tabla 8, y se establece un tiempo de respuesta adecuado.

En el proceso real, la constante de tiempo tiene un valor de 10 500 segundos, casi 3 horas, por lo tanto, el tiempo de respuesta debe ser mayor, observando el Apartado 4, el sistema posee un tiempo de respuesta de 6 horas aproximadamente, para calcular los parámetros del controlador PID del proceso real, es establecido un tiempo de respuesta de 6 horas, 21 600 segundos, para hacer la respuesta más rápida, obteniendo un valor de tiempo en bucle cerrado deseado de:

$$T_{BC}^d = 7\,100\,s$$

Kp	Ti	Td
0.022	10 500	0

Tabla 13. Parámetros del PID del proceso real mediante el método SIMC

Cuando es necesario calcular los parámetros del controlador para el proceso simulado, Ecuación 14, como el tiempo es en minutos, se establece un tiempo en bucle cerrado deseado de 220 minutos, por ello:

$$T_{BC}^d = 71.66\,min$$

Kp	Ti	Td
0.035	175	0

Tabla 14. Parámetros PID del proceso simulado mediante el método SIMC

Los parámetros calculados de la Tabla 14 son transferidos al programa de simulación como queda reflejado en la Figura 47.

☒ Activar entrada manual

Ganancia proporcional:

Tiempo de integración: s

Tiempo derivativo: s

Coefficiente retardo derivativo:

Ponderación de la acción P:

Ponderación de la acción D:

Tiempo muestreo algoritmo PID: s

Regla para la optimización

Estructura del regulador:

Figura 47. Valores del PID según SIMC en el proceso simulado

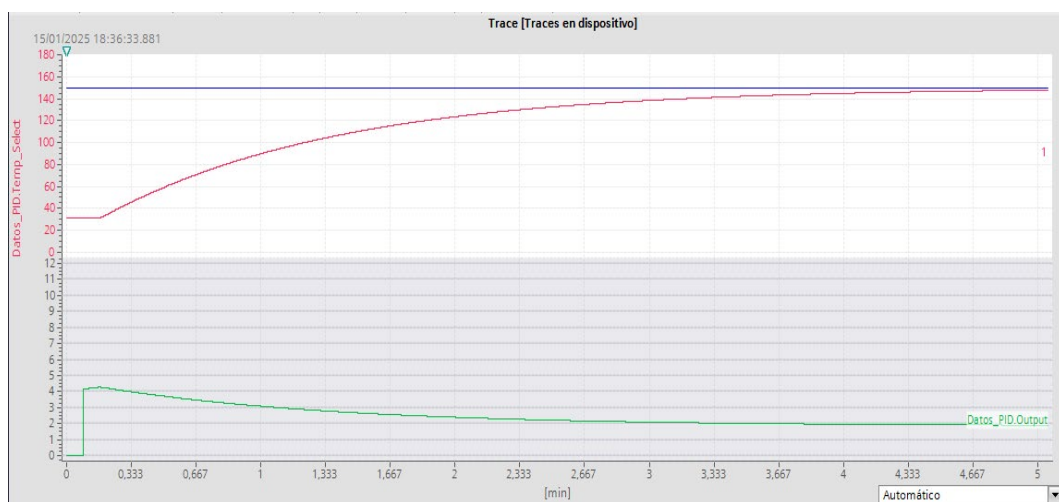


Figura 48. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado SIMC

Video 6 - [Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado SIMC](#)

Al observar la Figura 48 y el Video 6, se puede notar que:

- El controlador no se satura porque el salto tiene un valor de 285 °C y el setpoint tiene un valor de 150 °C.
- El tiempo de respuesta coincide con los 220 segundos establecidos.

SINTONIZACIÓN POR ZIEGLER-NICHOLS

Es momento de verificar el primer sintonizado mediante ensayos experimentales, en este caso, el método de Ziegler-Nichols, al igual que en los puntos anteriores se comienza con la obtención de los parámetros del PID del proceso real usando las ecuaciones derivadas de la Tabla 9.

	Kp	Ti	Td
PI	0.4917	1 000	0
PID	0.6556	600	150

Tabla 15. Parámetros del PID del proceso real mediante el método Ziegler-Nichols

Ahora corresponde realizar la prueba con el proceso simulado, utilizando las mismas ecuaciones de la Tabla 9. Los resultados obtenidos son los siguientes:

	Kp	Ti	Td
PI	0.4917	16.666	0
PID	0.6556	10	2.5

Tabla 16. Parámetros del PID del proceso simulado mediante el método Ziegler-Nichols

De los dos tipos de controladores que pueden realizarse mediante las ecuaciones de Ziegler-Nichols, se comenzará con el ensayo del proceso simulado con el controlador PI, siendo los valores introducidos los siguientes:

☒ Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 0.4916

Tiempo de integración: 16.6666 s

Tiempo derivativo: 0.0 s

Coefficiente retardo derivativo: 0.1

Ponderación de la acción P: 1.0

Ponderación de la acción D: 0.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 0.1 s

Regla para la optimización

Estructura del regulador: PI

Figura 49. Valores del PI según Ziegler-Nichols en el proceso simulado

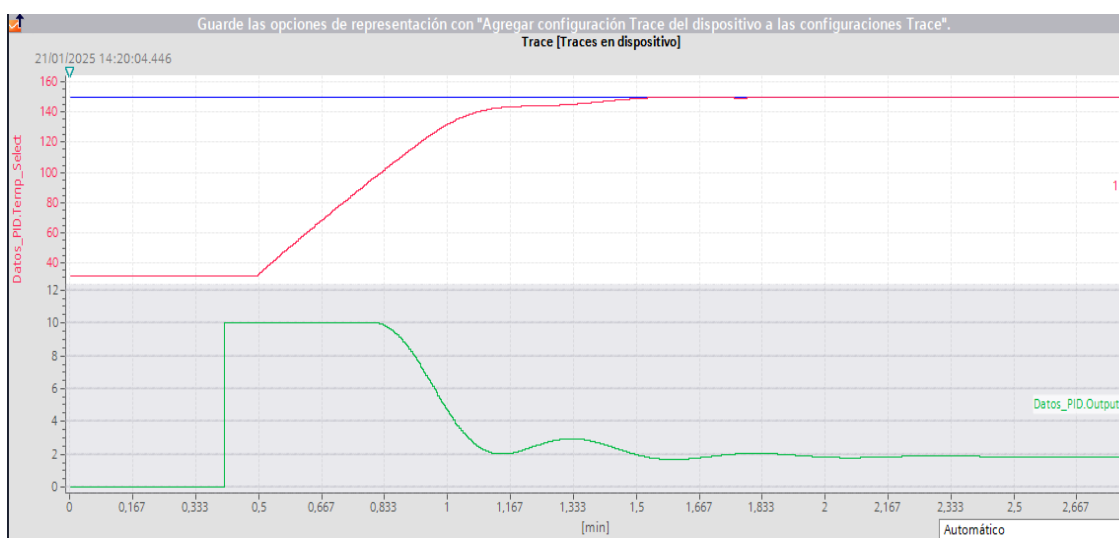


Figura 50. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Ziegler-Nichols

Video 7 - [Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del controlador PI de Ziegler-Nichols](#)

Es realizada la simulación del controlador PI con los parámetros de Ziegler-Nichols con el setpoint establecido de 150 °C, como puede observarse en la Figura 50 y Video 7, el controlador está saturado durante un tiempo prolongado mientras la temperatura simulada se va incrementando, y posteriormente regula el valor estacionario correctamente.

El salto no saturado para el controlador PI de Ziegler-Nichols tiene un valor de 20.34 °C, el cual, más la temperatura ambiente, establece un setpoint de 51.54 °C, por lo tanto, se realizará una simulación con un valor objetivo de 50 °C.

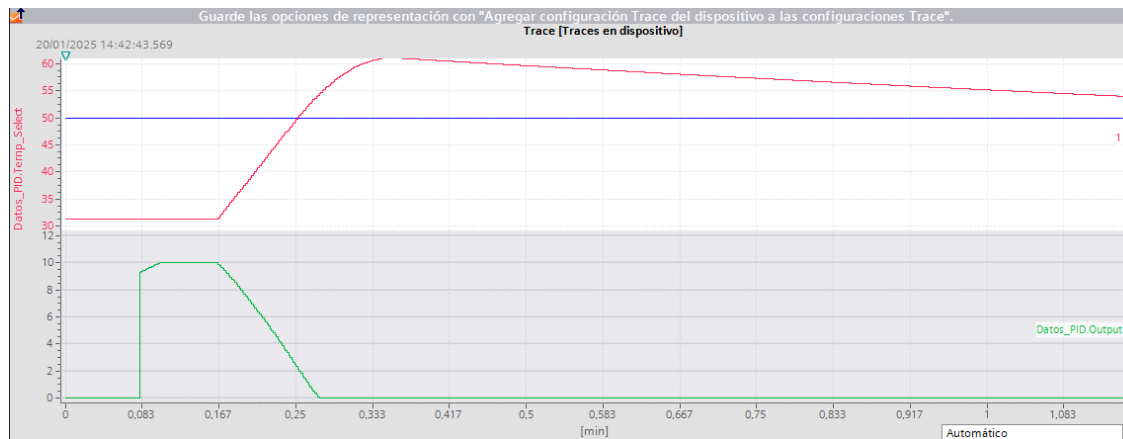


Figura 51. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Ziegler-Nichols

Video 8 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del controlador PI de Ziegler-Nichols con setpoint de 50 °C

Mediante la Figura 51 y el Video 8, se observa que los parámetros calculados mediante Ziegler-Nichols para un controlador sólo provocan saturación del controlador durante el retardo establecido, luego comienza a descender porque el setpoint está establecido en 50 °C, donde el controlador no se satura, pero el valor tan alto de ganancia proporcional y tan bajo del tiempo de integración, provoca que la respuesta tenga oscilación y sobrepase el valor de temperatura establecido.

Una vez realizado el ensayo con el controlador PI, es momento de evaluar la respuesta utilizando los valores del controlador PID, tal como se hizo en los ejemplos anteriores, el primer paso será cargar los datos al controlador:

Figura 52. Valores del PID según Ziegler-Nichols en el proceso simulado

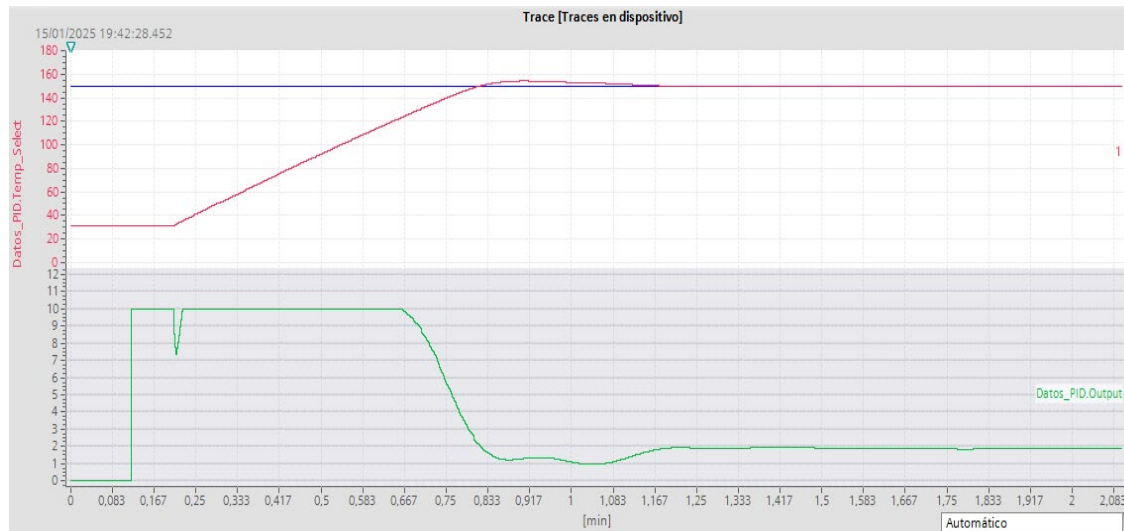


Figura 53. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Ziegler-Nichols

Video 9 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Ziegler-Nichols

Tras el ensayo del controlador PID tal como muestra la Figura 53 y el Video 9, se ha podido determinar varios aspectos relevantes del desempeño del sistema. En primer lugar, se observa que el controlador alcanza una saturación casi total hasta alcanzar el valor de setpoint, porque para evitar la saturación, el setpoint debería tener un valor de 45 °C, a continuación, se produce un rebasamiento de dicho setpoint, lo que indica una ligera oscilación en la salida del sistema.

Además, se registra un pico hacia abajo en el comienzo de la acción debido a que cuando empieza a disminuir el error la acción derivativa es negativa, generando un cambio abrupto en la señal de control. Este comportamiento es característico de los controladores PID cuando se enfrentan a transiciones rápidas en el error.

Como se ha realizado anteriormente, si aplicamos el salto no saturado a este controlador, éste tiene un valor de 15.25 °C, que añadido a la temperatura ambiente de 31.2 °C, da como resultado un setpoint para comprobar la respuesta de 45 °C.

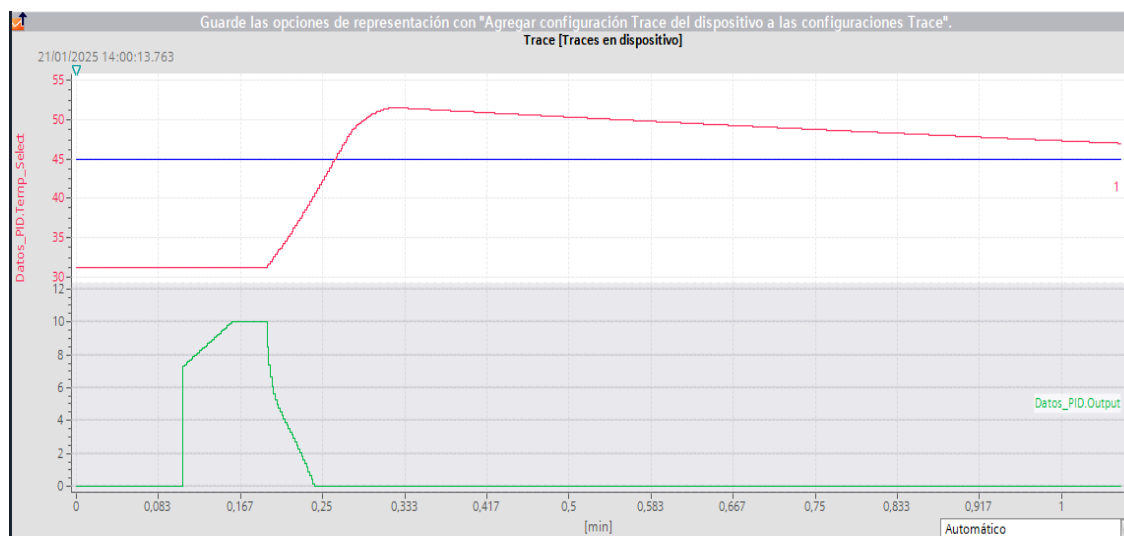


Figura 54. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Ziegler-Nichols con setpoint de 45 °C

Video 10 - Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Ziegler-Nichols con setpoint 45°C

La simulación de la respuesta del controlador con el setpoint a 45 °C se aprecia que existe un rebasamiento por un valor de la componente proporcional muy alto en comparación con la componente integral, lo que provoca que la acción del controlador no es capaz de regular la temperatura simulada adecuadamente.

SINTONIZADO POR COHEN-COON

Las ecuaciones que establecen los parámetros de un controlador PID obtenidas por el método de Cohen-Coon han sido establecidas en la Tabla 10. Siguiendo el procedimiento realizado, se comienza calculando los parámetros para los datos del proceso real, siendo los resultados:

	Kp	Ti	Td
PI	0.493	942.985	0
PID	0.7323	729.589	108.527

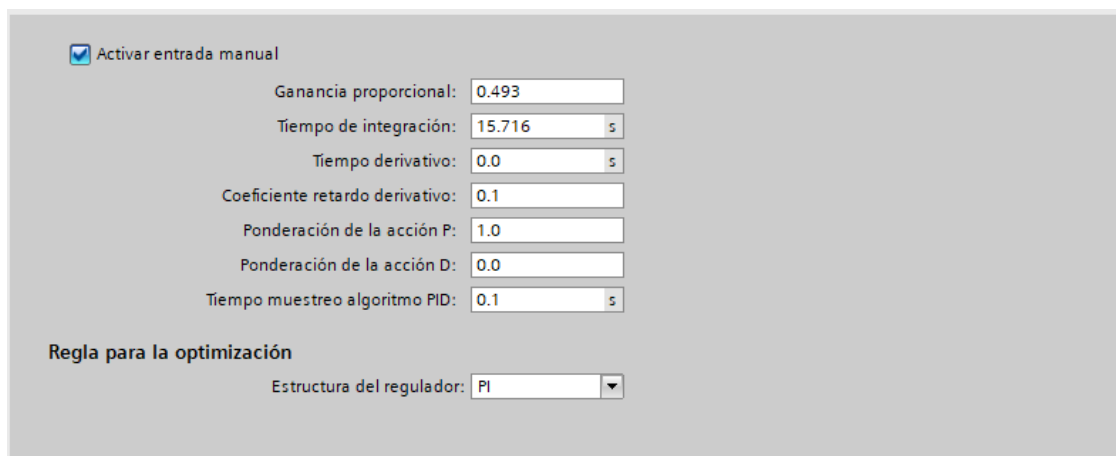
Tabla 17. Parámetros del PID del proceso real mediante el método Cohen-Coon

Es el momento de calcular los parámetros del controlador para el proceso simulado, obteniendo:

	Kp	Ti	Td
PI	0.493	15.716	0
PID	0.7323	12.159	1.808

Tabla 18. Parámetros del PID del proceso simulado mediante el método Cohen-Coon

Una vez calculados se transfieren al programa de simulación, comenzando con el controlador PI:



☒ Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 0.493

Tiempo de integración: 15.716 s

Tiempo derivativo: 0.0 s

Coeficiente retardo derivativo: 0.1

Ponderación de la acción P: 1.0

Ponderación de la acción D: 0.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 0.1 s

Regla para la optimización

Estructura del regulador: PI ▼

Figura 55. Valores del PI según Cohen-Coon en el proceso simulado

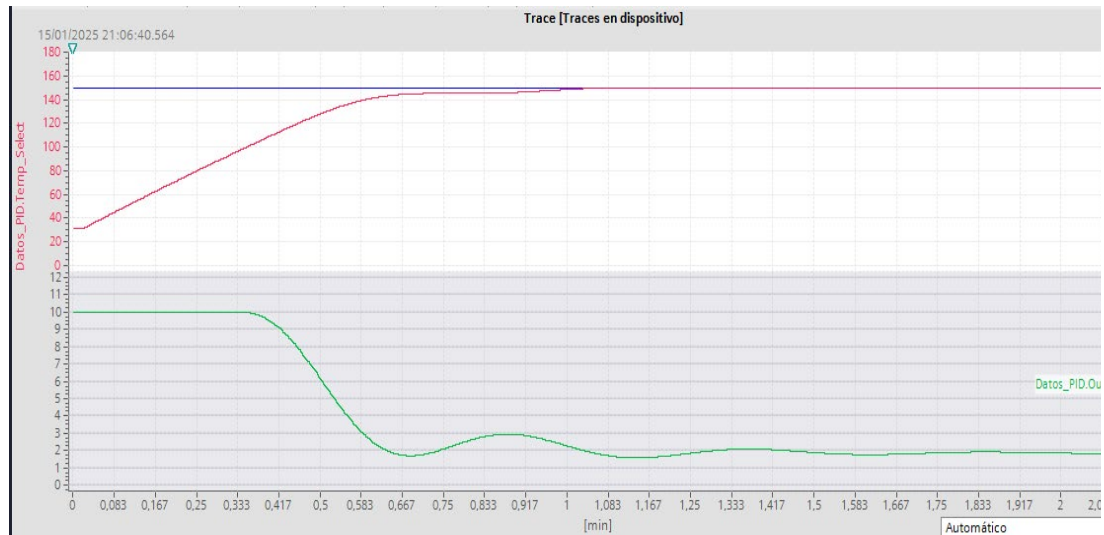


Figura 56. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Cohen-Coon

Video 11 - [Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Cohen-Coon](#)

Observando la Figura 56 y el Video 11 se llega a la misma conclusión descrita en el controlador PI de Ziegler-Nichols, ya que la respuesta es muy similar al simulado en la Figura 50.

Como en los casos anteriores se comprueba el salto no saturado, en este caso tiene un valor de 20.28 °C que, sumados a la temperatura ambiente, hace un setpoint total de 51.48 °C, por lo tanto, se analizará la respuesta de la temperatura simulada con un objetivo de 50 °C.

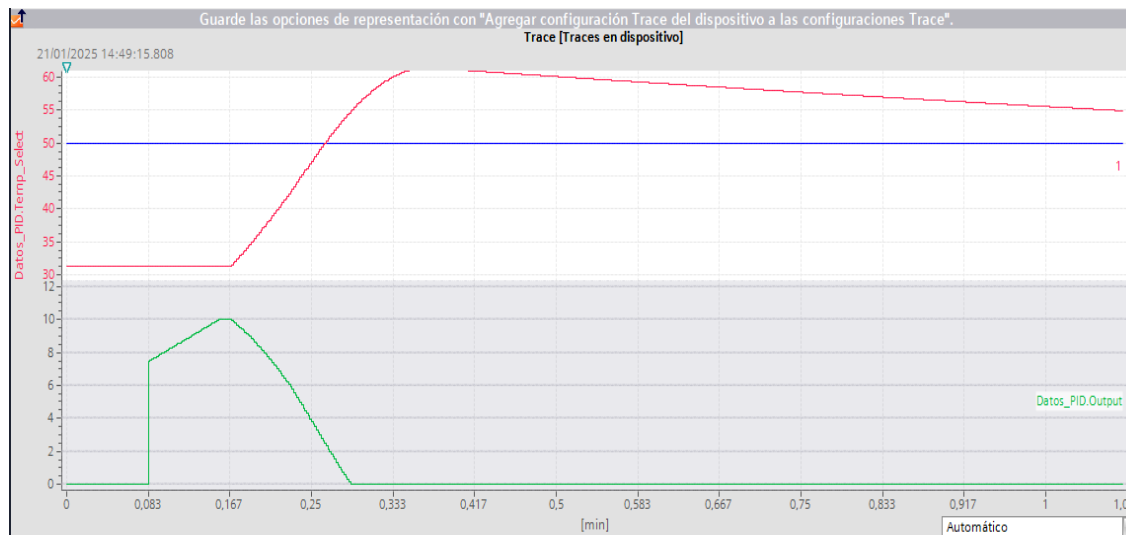


Figura 57. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Cohen-Coon con setpoint de 50 °C

Video 12 - [Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PI de Cohen-Coon con setpoint de 50 °C](#)

Tras la simulación con un setpoint de 50 °C que se muestra en la Figura 57 y en el Video 12, se observa que la acción del controlador y, por ende, la respuesta de la temperatura simulada tiene, presenta características prácticamente idénticas a la respuesta del controlador PI ajustado por el método de Ziegler-Nichols, mostrada en la Figura 51. Por lo tanto, se remite a lo explicado en dicha figura para realizar el análisis correspondiente de esta respuesta.

Por último, se analiza la respuesta del sistema ante los parámetros del controlador PID con los datos de Cohen-Coon:

☒ Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 0.7323

Tiempo de integración: 12.154 s

Tiempo derivativo: 1.808 s

Coefficiente retardo derivativo: 0.1

Ponderación de la acción P: 1.0

Ponderación de la acción D: 0.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 0.1 s

Regla para la optimización

Estructura del regulador: PID

Figura 58. Valores del PID según Cohen-Coon en el proceso simulado

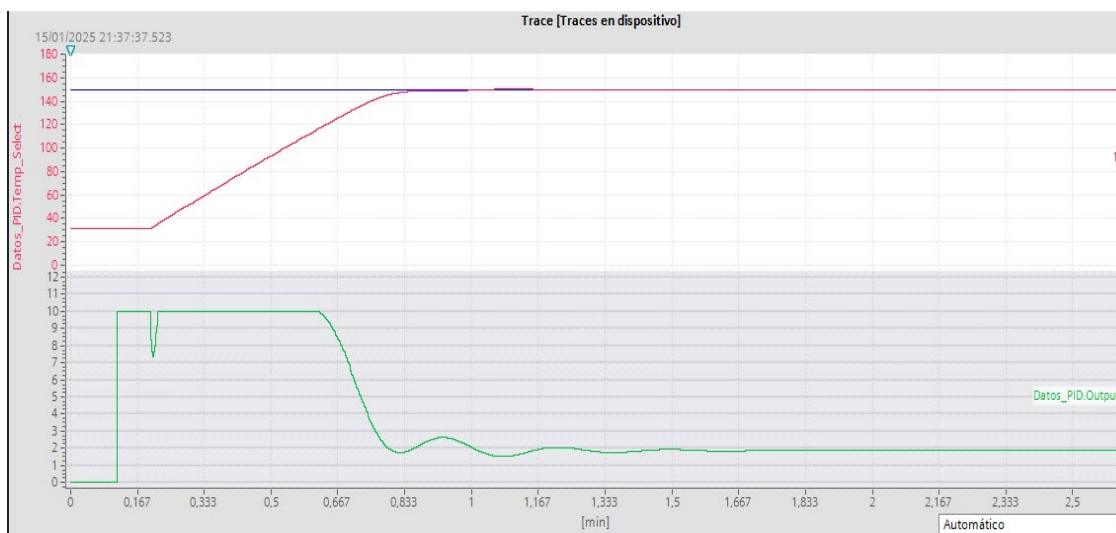


Figura 59. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Cohen-Coon

Video 13 - [Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Cohen-Coon](#)

Dado que los parámetros del controlador PID ajustados mediante el método de Ziegler-Nichols como por el método de Cohen-Coon son tan similares, era de esperarse que las respuestas obtenidas fueran prácticamente idénticas, por lo tanto, lo analizado previamente para el método de Ziegler-Nichols es igualmente aplicable al controlador actual. Además, la similitud entre ambos queda confirmada al observar la Figura 59 y el Video 13, que respaldan esta conclusión.

Calculando el salto no saturado para el controlador PID del método Cohen-Coon, se obtiene un valor de 13.65 °C, añadido a la temperatura ambiente, genera un setpoint de 44.85 °C. Por lo tanto, se comprobará respuesta del sistema con un setpoint de 43 °C

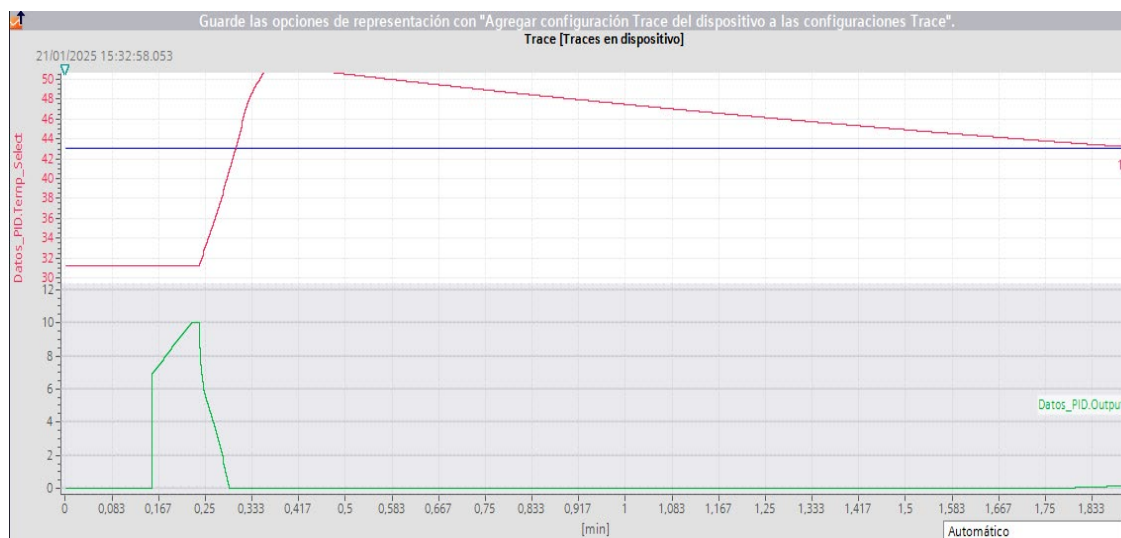


Figura 60. Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Cohen-Coon con setpoint de 43 °C

Video 14 - [Respuesta del proceso simulado mediante sintonizado del PID de Cohen-Coon con setpoint de 43 °C](#)

Finalizada la simulación del controlador PID de Cohen-Coon con un setpoint de 43 °C, se puede apreciar en la Figura 60 y en el Video 14 que la respuesta es muy similar al comportamiento del controlador PID ajustado por el método de Ziegler-Nichols de la Figura 54. Ganancia proporcional más alta en proporcional al valor de ganancia de la componente integral provoca que el ajuste sea irrealizable.

7.4 CONCLUSIONES TRAS LA SIMULACIÓN DE LOS SINTONIZADOS.

Tras realizar un estudio sobre los diferentes métodos de sintonización disponibles se llega a la conclusión que:

1. Los métodos basados en modelos son adecuados para el control de sistemas térmicos como es el que ocupa este trabajo, porque brinda un control más equilibrado y estable, favoreciendo la precisión y la estabilidad del sistema. Aunque proporcionan un tiempo de respuesta más lento, evitan la saturación, que puede provocar comportamientos no óptimos en el controlador.
2. De los métodos basados en modelos, el de Skogestad SIMC, permite modificar el tiempo de respuesta y adaptarlo a la necesidad del diseñador, por ello, se establece que es el más adecuado para el sistema térmico cuando se aplique al proceso real. Es decir, **cuando el controlador tenga que gobernar el horno de muestras tendrán que usarse los parámetros de la Tabla 13.**



3. Los métodos basados en ensayos experimentales, tanto Ziegler-Nichols, como Cohen-Coon, saturan el controlador, la saturación del controlador ocurre cuando su salida alcanza su valor máximo limitando su capacidad de reducir el error de manera adecuada. Aunque el tiempo de respuesta es menor al de los métodos basados en modelos, los controladores que se diseñan de esta manera tienden a tener un comportamiento no óptimo.
4. La saturación que aparece en los métodos basados en ensayos experimentales es debido a que la ganancia proporcional es muy alta debido a que el valor del tiempo del retardo es mucho menor que la constante de tiempo de la función de transferencia del sistema térmico a controlar. Como puede comprobarse con la Ecuación 13 y la Tabla 9 o la Tabla 10.
5. Aunque el tiempo de respuesta es mayor en los métodos basados en modelos que en los métodos basados en ensayos experimentales, en sistemas térmicos como sobre el que se realiza este trabajo, suele ser beneficioso porque los tiempos de calentamiento de los hornos suelen estar establecidos por el fabricante para evitar deterioros en la capa protectora o en el propio ladrillo debido al estrés térmico [23]. Por ello, no interesa modelos de calentamiento muy rápido que a su vez saturen el controlador.
6. Otro aspecto importante es que en procesos industriales donde existen perturbaciones, como es el caso del horno de muestras, donde la temperatura se ve afectada por la temperatura ambiente del cuarto donde está instalado, el encendido o no de otros elementos generadores de calor dentro del mismo habitáculo, la apertura de la tapa para introducir material que enfría a su vez las paredes del horno, es mejor el uso de controlador PI porque responden mucho mejor que los que tienen parte derivativa.

8 AUTÓMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES

Una vez determinados los parámetros del controlador PID tanto para el proceso real, como para el proceso simulado, es necesario utilizar una herramienta para implementar dicho controlador, por ello, la más adecuada es usar un autómata programable junto con una pantalla con interfaz hombre-máquina.

8.1 INTRODUCCIÓN A LOS AUTÓMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES

Con el desarrollo industrial a partir de la segunda mitad del siglo XX fue necesario vigilar y controlar una gran cantidad de variables físicas, por ello se planteó la creación de unos sistemas capaces de tratar toda esa información, estos sistemas se denominaron controladores lógicos, existen diferentes tipos de controladores, aunque en este Apartado se trata en profundidad los autómatas programables.

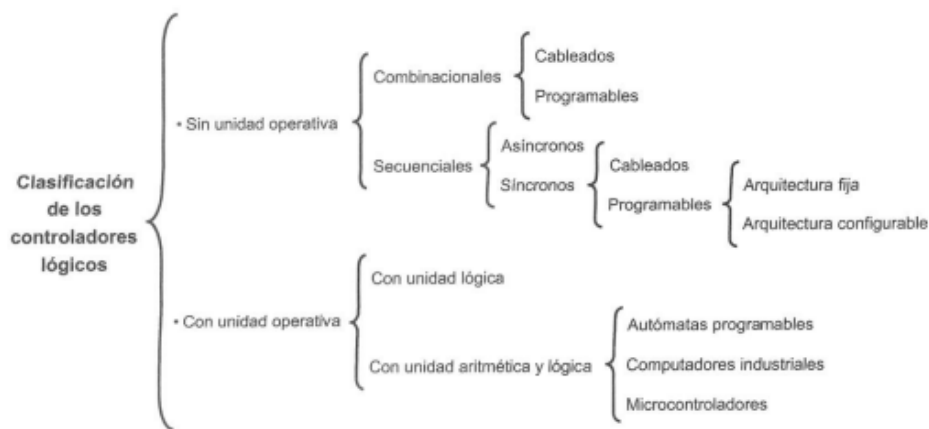


Figura 61. Clasificación de los controladores lógicos [24]

Los autómatas programables sustituyeron sobre 1960 a los sistemas de control electrónicos cableados que dominaban hasta ese momento el mundo industrial, están compuestos por dos grupos, la Unidad Central de Procesamiento, a partir ahora CPU del inglés Central Processing Unit y los elementos de periferia, ambos grupos están conectados por el bus de datos. Los grupos están formados por los siguientes elementos:

- CPU: Memoria de programa (RAM), unidad de control, memoria del sistema operativo (ROM), imagen de proceso de entradas (PAE) y de salidas (PAA), temporizadores y contadores internos y marcas.
- Periferia: Entradas y salidas tanto analógicas como digitales, módulos de temporización, contadores y comparadores, así como otro tipo de módulos funcionales.

Para que la CPU sea capaz de realizar un seguimiento y control, a la vez que ordenar funciones a los elementos de la periferia, es necesario que exista un programación, ésta se puede definir como “el establecimiento de una secuencia ordenada de instrucciones que resuelven una determinada tarea de control” [24]. La Comisión Electrotécnica Internacional, IEC (International Electrotechnical Commission) tiene como objetivo normalizar un sistema de programación normalizado, aunque cada fabricante suele tener el suyo con la peculiaridad que son incompatibles entre ellos, solo será nombrado en este trabajo el utilizado para la programación del autómata programable a instalar, que es el STEP-7 de Siemens.

Los autómatas programables se denominan habitualmente **PLC**, siglas en inglés de Programmable Logic Controller, cuyo significado en español sería: controladores lógicos programables.

El sistema de programación de Siemens STEP-7 dispone de diferentes lenguajes para la programación de sus PLC:

- Lenguaje AWL o lista de instrucciones: Muy usado en operaciones lógicas, como se puede ver en la figura inferior, aparecen una serie de instrucciones que corresponden a:

$$A8.1 = [(E7.1 + E9.2) \cdot A5.3] \cdot (M3.1 \cdot E6.0 + A6.1)$$

U	E 7.1	Selecciona la variable de entrada E7.1
O	E 9.2	0 lógica entre E7.1 y E9.2
UN	A 5.3	Y lógica entre A5.3 y (E7.1 + E9.2)
UN(		Inicia una segunda expresión
U	M 3.1	Selecciona M3.1
U	E 6.0	Y lógica entre M3.1 y E6.0
O	A 6.1	0 lógica entre A6.1 y M3.1-E6.0
)		0 lógica entre la primera expresión y el inverso de la
=	A 8.1	Asigna el resultado anterior a la salida externa A8.1

Figura 62. Ejemplo de programación en AWL [24]

- Lenguaje SCL o de texto estructurado: Similar al Pascal, es utilizado en proyectos complejos donde se mueven gran cantidad de datos. En la figura que se adjunta, se puede apreciar como mediante SCL se realizan la activación de una salida si las dos entradas cambian a estado 1, lógica AND.

Ejemplo 3: Asociación serie (AND) de dos variables de entrada.

Código SCL:

```

19 //Ejemplos SCL (C) REEA 2013
20 //Activación de una salida mediante dos entradas en serie.
21 IF "Entrada3" AND "Entrada4"=true THEN
22   "Salida3":=true;
23 ELSE
24   "Salida3":=FALSE;
25 END_IF;
26

```

Figura 63. Ejemplo de programación en SCL [25]

- Lenguaje KOP o LAD o de esquema de contactos. Este es el lenguaje más utilizado y el que se ha usado para la programación de este trabajo. En el ejemplo siguiente se muestra como son necesarios tres contactos a 1 para poder activar una salida, lógica AND.

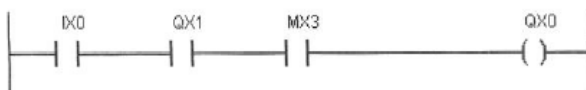


Figura 64. Ejemplo de programación en LAD [24]

- Otros lenguajes gráficos menos utilizados en el sector industrial.

Aunque los lenguajes sean diferentes y su programación difiera entre ellos, el objetivo de ellos es trabajar con diversos datos para conseguir el control deseado. A continuación, se recogen los tipos de datos en la Tabla 19.

DENOMINACIÓN	BITS	EJEMPLO	DESCRIPCIÓN
BOOL	1	FALSE O TRUE	Variable binaria
INT	16	-32768 ... 32768	Número entero con signo
DINT	32	$-2^{31} \dots 2^{31}-1$	Número entero doble con signo
REAL	32	0.4560	Número real
BYTE	8	0 ... 255	Conjunto de 8 bits
WORD	16	0 ... 65535	Conjunto de 16 bits
DWORD	32	0 ... $2^{31}-1$	Conjunto de 32 bits
TIME	32	T#5d4h2m38s3.5ms	Duración
DATE	16	D#2002-01-01	Fecha
TIME_OF_DAY	32	TOD#15:35:08.36	Hora del día
S5TIME	16	S5T#2h2m38s	Duración
DATE_AND_TIME	64	DT#2002-01-01- 15:35:08.36	Fecha y hora
CHAR	8	'A'	Carácter
STRING	-	'AUTOMATA'	Cadena de caracteres

Tabla 19. Tipos de datos en PLC Siemens STEP-7 [24]

8.2 HARDWARE

Para la elaboración de este trabajo se va a utilizar un PLC de la marca Siemens que incluye una CPU modelo 1512C-1 PN con referencia 6ES7 512-1CK01-0AB0, junto con dos módulos adicionales, uno analógico con 5 entradas y 2 salidas con número de referencia y otro módulo digital con 16 entradas y salidas



Figura 65. CPU del PLC de Siemens más los dos módulos usados en la elaboración del TFG [26]

Consultando la hoja de características del producto muestra la siguiente información como más destacable:

“SIMATIC S7-1500 CPU compacta CPU 1512C-1 PN, módulo central con memoria principal 250 KB para programa y 1 MB para datos, 32 entradas digitales, 32 salidas digitales, 5 entradas analógicas, 2 salidas analógicas, 6 contadores rápidos, 4 salidas rápidas para PTO/PWM/salida de frecuencia interfaz 1: PROFINET IRT con 2 Port Switch, 48 ns bit-performance, incl. conector frontal push-IN, requiere SIMATIC Memory Card” [26].

Para el control del horno de muestras se selecciona una pantalla HMI de la marca Siemens y modelo TP700 Confort donde el operario podrá realizar varias operaciones que serán posteriormente explicadas. Las siglas HMI son el acrónimo de Human Machine Interfaz, es decir, permiten la interacción entre un operario humano y el sistema de control, las principales ventajas y funciones que tienen son, por ejemplo, la visualización de datos, las operaciones sobre elementos concretos, configurar procesos y el diagnóstico y mantenimiento de diversos equipos. Los inconvenientes más usuales son la necesidad de que el HMI sea de la misma marca que el PLC para evitar problemas

de comunicación integrada en firmware y los problemas de compatibilidad con otro software de diseño aun siendo del mismo fabricante.



Figura 66. Pantalla HMI KP700 Comfort [27]

Según el data sheet del producto, las principales características son:

“Mando táctil, pantalla panorámica TFT 7", 16 millones de colores, interfaz PROFINET, interfaz MPI/PROFIBUS DP, memoria de configuración de 12 MB, Windows CE 6.0, configurable a partir de WinCC Comfort V11” [27].

La comunicación entre el PLC y la pantalla HMI será realizada mediante profinet, Figura 67, basado en el ethernet estándar ofreciendo más ventajas que las conexiones mediante profibus que se realizaban con cableado RS-485.



Figura 67. Conexión vía profinet del hardware

8.3 CONEXIONADO ELÉCTRICO

En el cuarto donde se encuentra instalado el horno, se llevará a cabo una modificación en el cuadro eléctrico. El cuadro eléctrico es de la marca Eldon con modelo MAS0404021R5. Esta modificación incluirá ajustes mecánicos, principalmente en la puerta, para permitir la integración de la pantalla HMI, las señales luminosas y el botón de emergencia, donde se alojará todo el hardware previamente descrito. Además, se realizarán modificaciones eléctricas, desmantelando los componentes innecesarios y conservando principalmente el circuito de fuerza.

En la Figura 68 se muestra una vista frontal del cuadro eléctrico y de la tapa que será modificada. La tapa tiene unas dimensiones de 400 x 400 mm, mientras que el panel interior, destinado a la instalación de los componentes electrónicos, presenta unas medidas de 370 x 350 mm. El material utilizado para el panel es acero dulce, pintado con recubrimiento en polvo de color gris claro. [28]

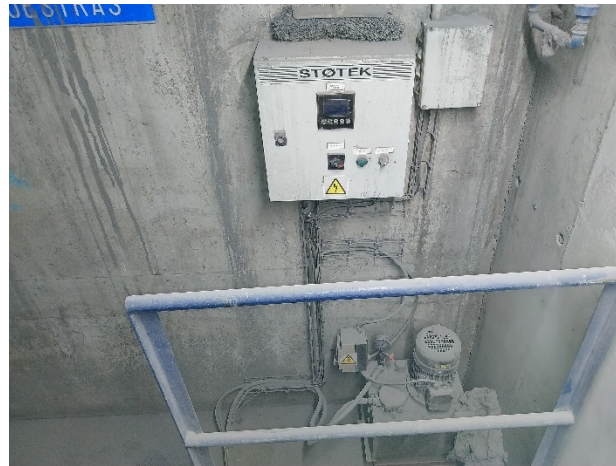


Figura 68. Cuadro eléctrico antiguo

Los trabajos mecánicos serán los siguientes, Figura 69:

- Marco para pantalla TP700 de dimensiones 198x142 mm.
- Retirar selector de alarma y aprovechar el orificio de 22.5 mm de diámetro para led rojo.
- Realizar agujero de 22.5 para la señal naranja por debajo del led verde y rojo.
- Realizar agujero de 22.5 para la seta de emergencia en la parte izquierda de la tapa.

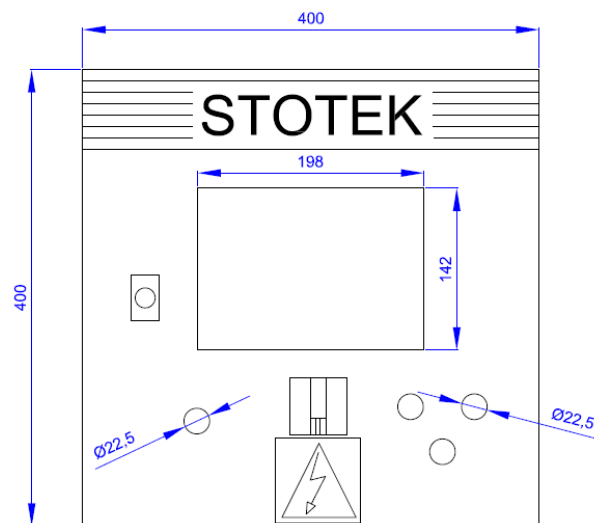


Figura 69. Dimensiones de la tapa y el mecanizado necesario

En la parte eléctrica hay que mantener la parte del circuito de fuerza, compuesta por el interruptor general, el transformador, el magnetotérmico y el guardamotor, todos marcado de amarillo en la Figura 70, también es necesario mantener el bornero 1, marcado de rojo, donde llegan los cables a 230 VAC de las resistencias del horno.

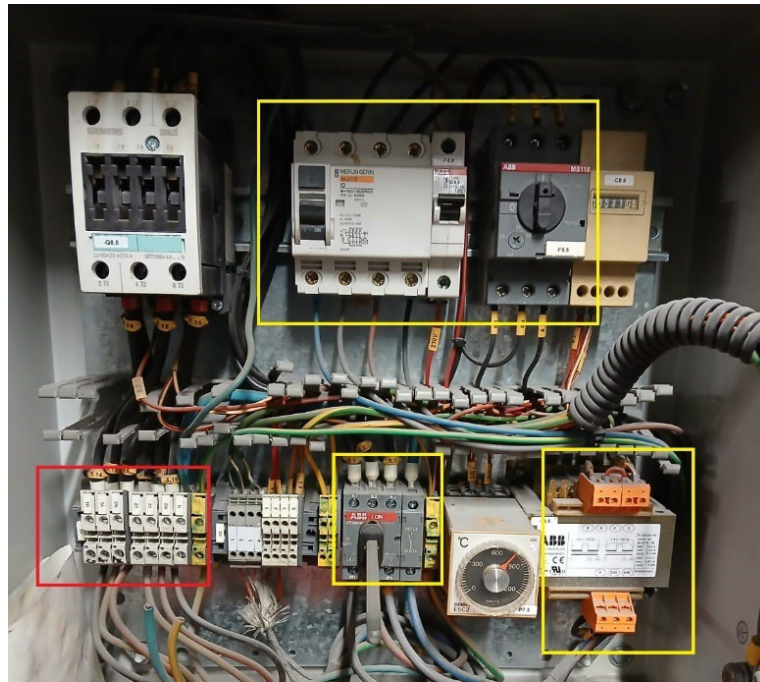


Figura 70. Imagen del interior del cuadro eléctrico

La salida del transformador de ABB, abajo derecha, tiene por salida 230 VAC más neutro que alimentará la fuente de alimentación de Siemens con referencia 6EP1333-4BA00, tal como refleja la Figura 71.

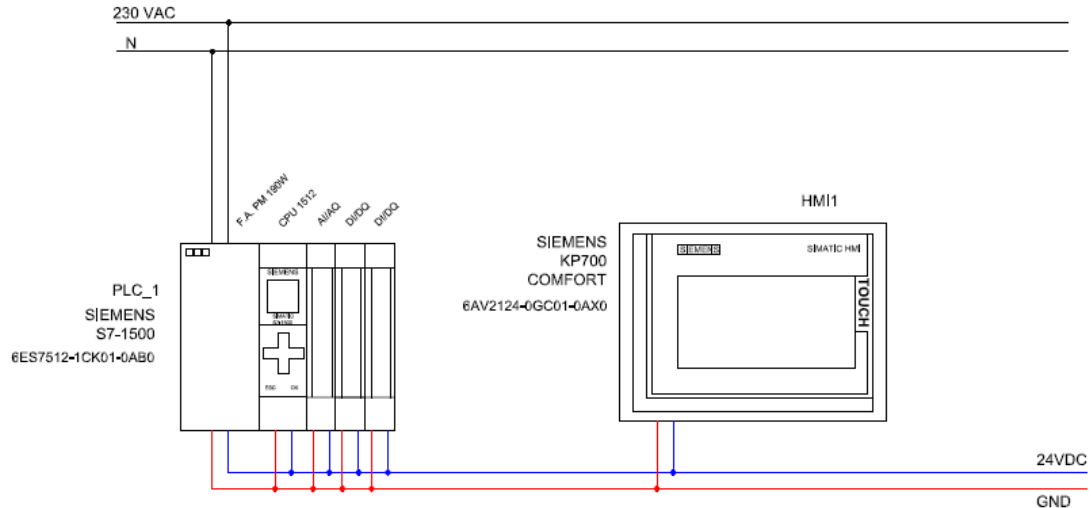


Figura 71. Alimentación del hardware

Una vez que tanto el autómatas programable como la pantalla HMI son alimentados con 24 VDC, se procede a especificar los canales que se utilizarán para las entradas y salidas periféricas, así como el cableado correspondiente.

- Entrada analógica: La conexión se realiza en la dirección IWO en los pines 2 y 3 para conectar una sonda de temperatura tipo termopar tipo K con transmisor de la marca Wika modelo TC10-H cuyo rango de medida es de -40 a 1200 °C, Figura 72. [29]
- Salida analógica: La salida será por la QW6 en tensión de 0 a 10v que alimentará un relé en estado sólido de la marca Revo que controlará el voltaje que alimenta las resistencias. La información sobre este tipo de relés se agrupa en su data sheet, Figura 72 y Figura 73. [30]

- Entradas digitales:
 - Pulsador de emergencia en I20.0, si se activa la seta de seguridad instalada en el panel del cuadro eléctrico directamente pone en inactivo al PID y corta la salida de señal analógica a las resistencias, cuando se rearma manualmente la seta es necesario pulsar también el botón de rearme desde la pantalla de avisos del HMI para que todo vuelva a la normalidad, Figura 74.
 - Final de carrera en I21.0, es utilizado para indicar cuando el horno está en la posición de abajo tras la basculación, de este modo se corta el circuito hidráulico, Figura 74.
- Salidas digitales:
 - Activación electroválvula de aspiración en Q10.0, cuando arranca el PID y las resistencias comienzan a calentar el horno se abre automáticamente una electroválvula que normalmente está cerrada para aspirar los humos de la fusión de la muestra. Cuando el horno está apagado cierra directamente para no perder poder de aspiración necesaria en otras partes de la planta productiva. Además, existe la posibilidad de realizar una apertura y cierre de forma manual, Figura 75.
 - Activación led verde en Q10.2, esta señal luminosa se activa cuando el horno está encendido y se apaga cuando no lo está, esta señal está instalada en el cuadro eléctrico de la pantalla HMI, Figura 75.
 - Activación led rojo en Q10.4, señal luminosa se enciende cuando está el horno apagado, pero hay presencia de tensión, sería conveniente indicarlo en el cuadro para poner en conocimiento de todo operario que pueda abrir el armario que ciertos bornes hay tensión en alterna, Figura 75.
 - Activación led naranja Q10.6, está activada el tiempo que dura la emergencia tras la pulsación de la seta, Figura 75.
 - Basculación en Q11.2, se activa mientras se pulsa el botón de basculación desde la pantalla HMI, es necesario mantener la pulsación para evitar que el operario se acerque al horno de muestra, Figura 75.
 - Bajar horno en Q11.6, al pulsar el botón de bajar horno, se libera la presión del cilindro que permite bascular el horno hasta que éste toca el final de carrera, Figura 75.

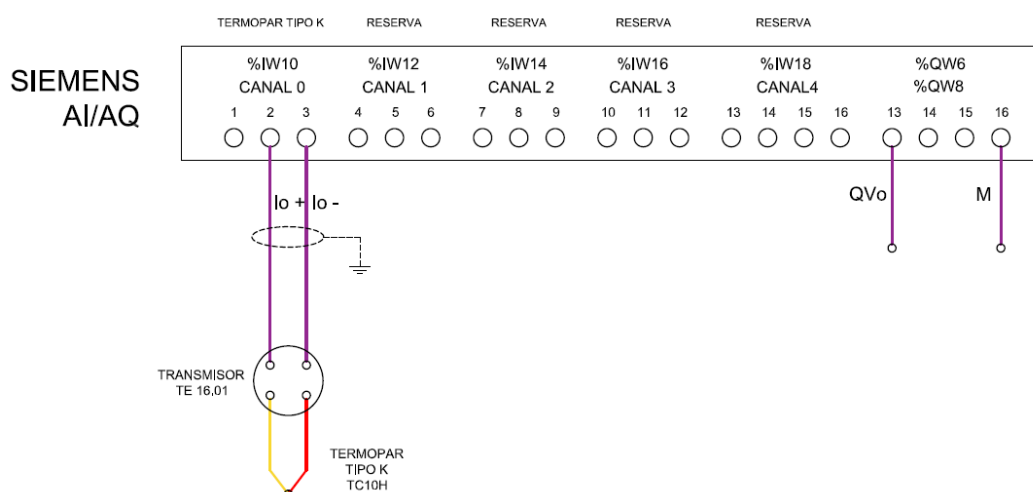


Figura 72. Conexión entrada y salida analógica

A continuación, se muestra la conexión eléctrica de la salida analógica que será la entrada en un módulo de relés en estado sólido que modifican una de las fases de cada conexionado de las resistencias del horno de muestras, el cableado desde el comienzo de las resistencias hasta los terminales que se aprecian en la Figura 73 ya están instalados en el bornero 1 marcado de rojo en la Figura 70.

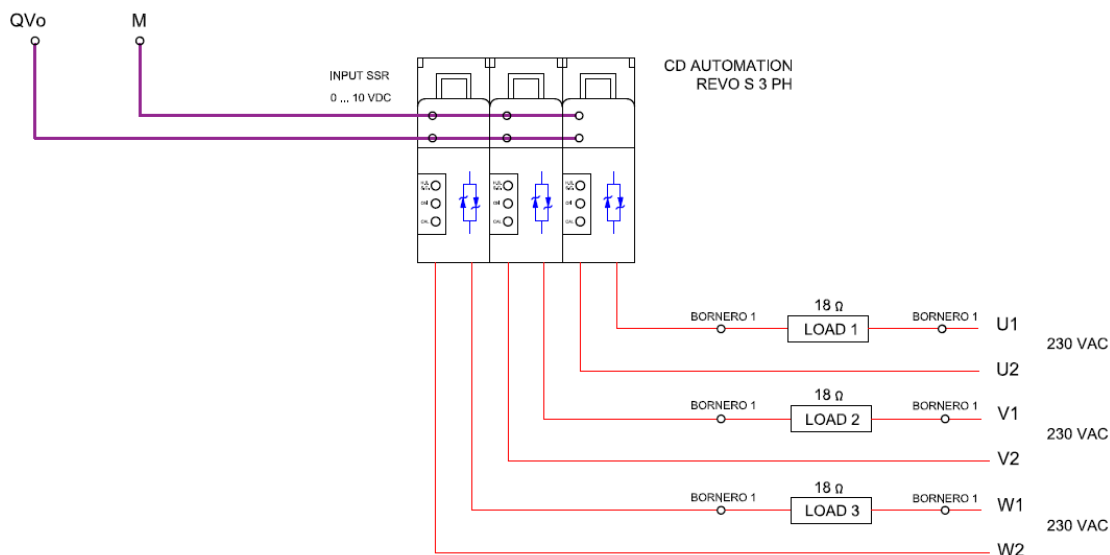


Figura 73. Conexión salida analógica

El módulo de conexión de entradas digitales se muestra en la Figura 74.

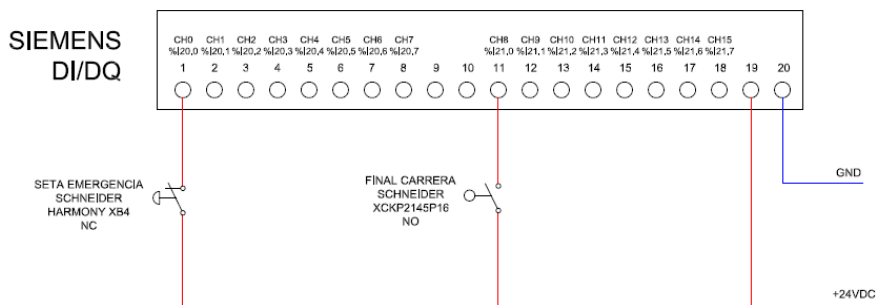


Figura 74. Conexión entradas digitales

Las salidas digitales son representadas en la Figura 75.

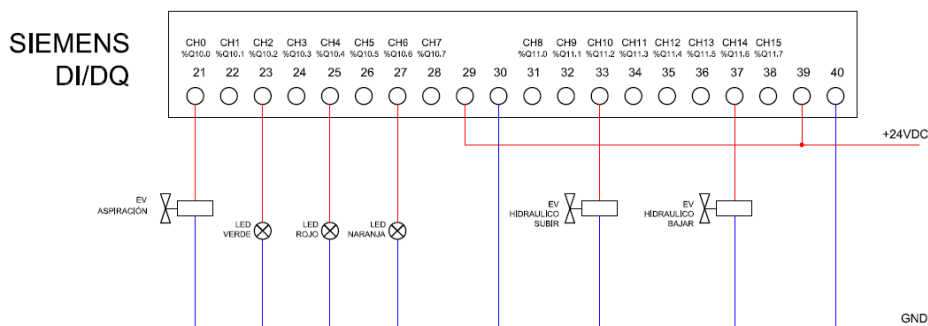


Figura 75. Conexión salidas digitales

8.4 HERRAMIENTAS DE PROGRAMACIÓN

El software utilizado para la programación del PLC es el Tia Portal V16, acrónimo de Totally Integrate Automation, desarrollado por Siemens que cuenta con Simatic STEP7 v16, Simatic WinCC v16 y PLCSim v16 como los más utilizados.

Al entrar en el software la primera pantalla que aparece permite abrir un proyecto ya existente o crear uno nuevo, aparte de otras opciones, en la zona derecha, es importante colocar el nombre y la ruta donde se va a guardar toda la información, como se puede apreciar en Figura 76.

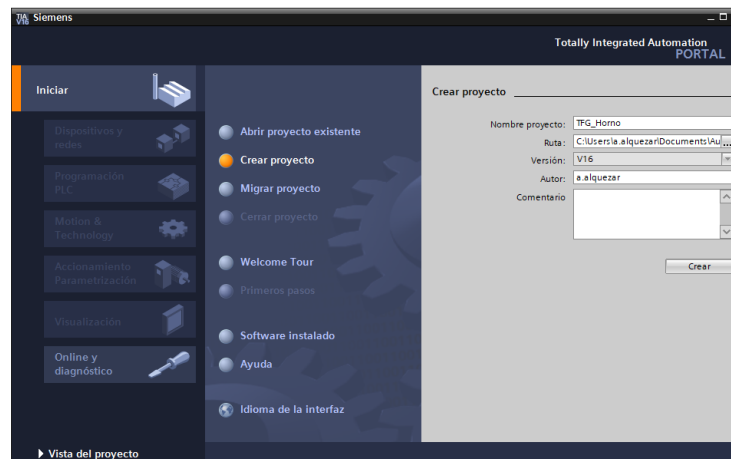


Figura 76. Pantalla principal de Tia Portal

Una vez que se ha creado el proyecto, el software pasa a otra pantalla denominada primeros pasos, Figura 77, donde permite todas las opciones de la parte derecha, lo recomendable es ir a la primera para configurar un dispositivo.

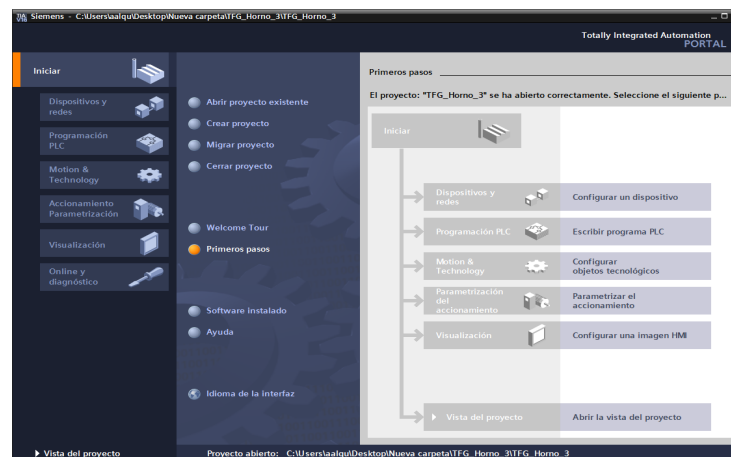


Figura 77. Pantalla de primeros pasos en Tia Portal

El siguiente paso es agregar un dispositivo, Figura 78, para comenzar se añade un controlador seleccionando la CPU deseada, en este caso y como se ha comentado anteriormente, se elige la 1512C-1 PN.

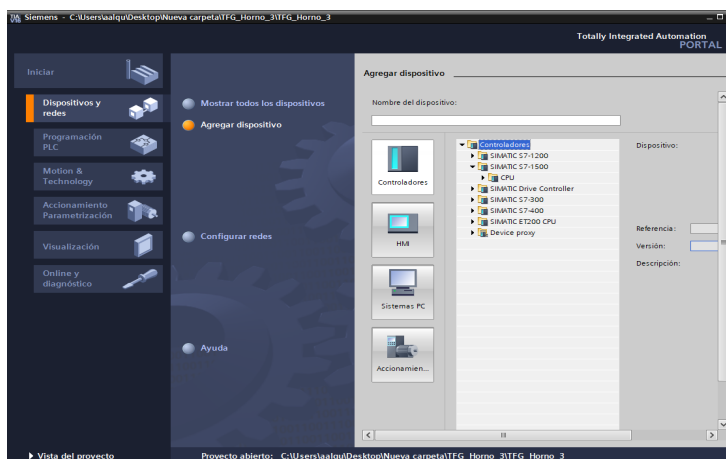


Figura 78. Pantalla de agregar dispositivo en Tia Portal

Una vez seleccionado el controlador necesario en momento se seleccionar la pantalla HMI que mejor de ajuste a las necesidades productivas, por ello, en la parte izquierda, bajo el nombre del proyecto, hay que pulsar en *Agregar dispositivo*.

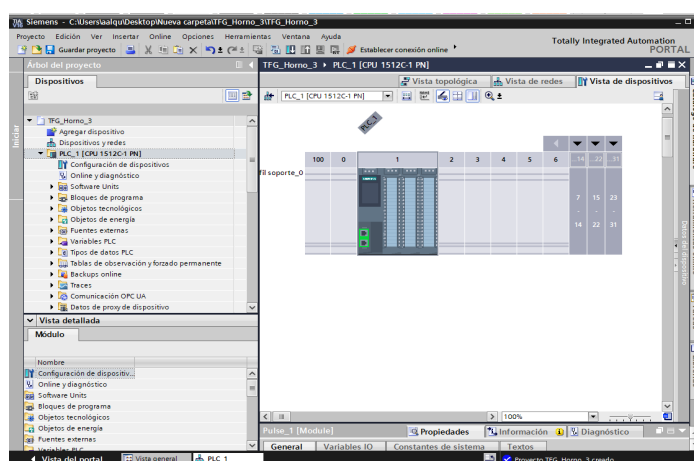


Figura 79. Vista previa del controlador seleccionado

En ese momento se abrirá una ventana emergente para añadir el dispositivo que el diseñador necesite, en este caso una pantalla Simatic HMI, más concretamente la TP700 Comfort, se puede apreciar en la Figura 80.

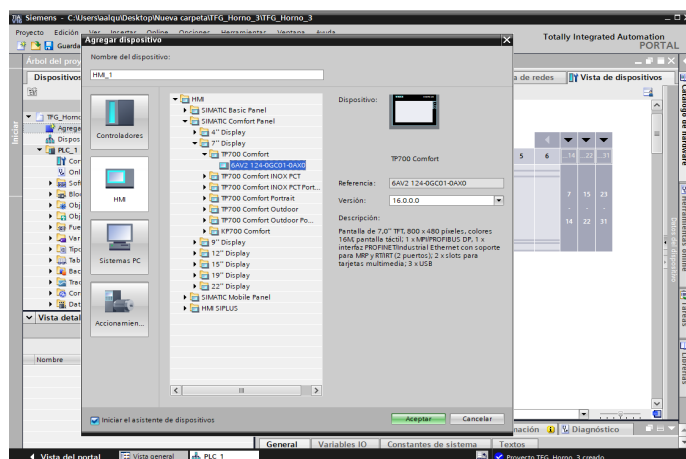


Figura 80. Selección de la pantalla HMI

El software cargará el dispositivo elegido y volverá a aparecer una nueva ventana emergente para la configuración de la pantalla, la primera opción será *Conexiones de PLC*, en la parte derecha se pulsa sobre examinar y se elige el PLC seleccionado anteriormente, si es posible por los dispositivos elegidos se puede configurar el interfaz de comunicación.

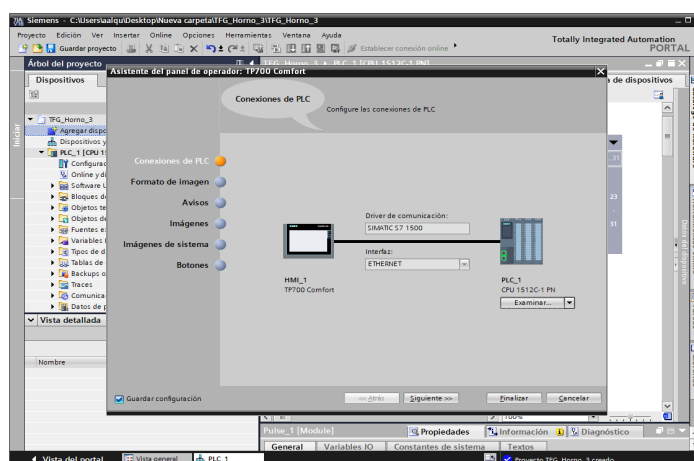
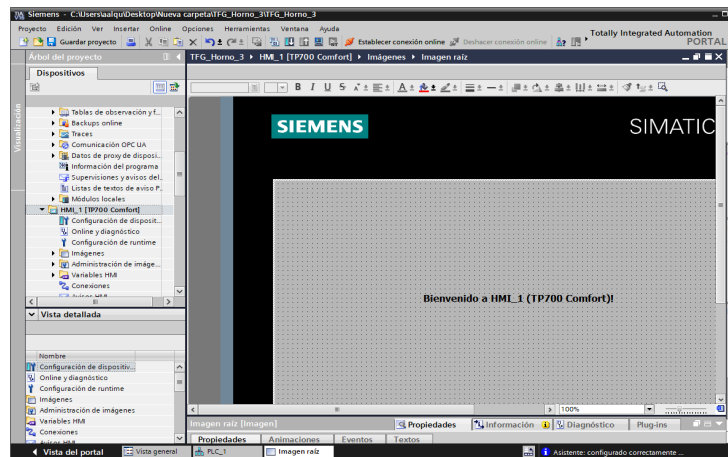


Figura 81. Conexión entre pantalla y PLC

Las pantallas posteriores de configuración de la pantalla HMI no requieren mucha importancia, por ello, al pulsar *Finalizar* aparece la Figura 82, desde donde se podrán diseñar y programar las imágenes necesarias de la pantalla.



Posteriormente en el menú de la izquierda denominado *Árbol del Proyecto* hay que seleccionar *Dispositivos y redes* para comprobar que existe conexión entre el PLC y la pantalla HMI a través de una conexión PN/IE que permitirá cuando se programe la pantalla, pueda llamar a las variables del PLC para poder trabajar con ellas. Como se puede observar en la Figura 83.

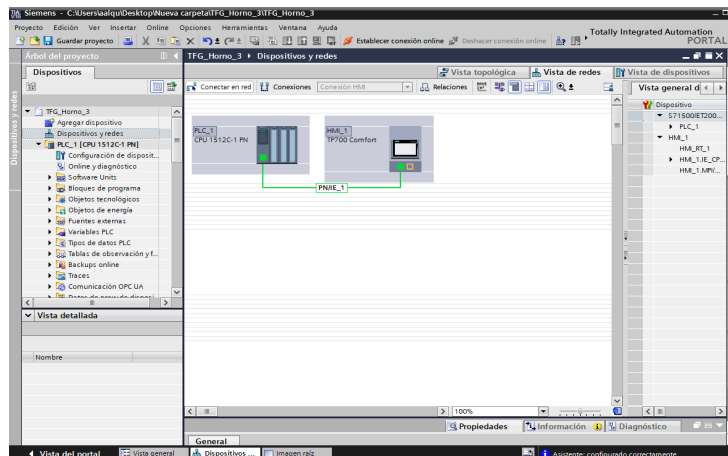


Figura 83. Dispositivos y redes

Cuando se llega a este punto ya se puede comenzar a programar el PLC, del propio interfaz del Tia Portal es importante familiarizarse con los menús, sobre todo con lo relacionado con la compilación, la carga a dispositivos si se dispone de ellos, la simulación en el caso que no, el arranque o parada de la CPU y la activación y desactivación de la observación.

8.5 ASPECTOS BÁSICOS PARA LA PROGRAMACIÓN DEL PLC

El programa del PLC está dividido en unidades de organización según la complejidad de este, hay que tener en cuenta que existen programas muy extensos, para una visualización más clara es mejor ir ordenando el programa en diferentes bloques, estos bloques pueden ser de diferentes tipos:

- Bloques de organización (OB): Como su nombre indican son bloques que permiten la organización del programa pero que su elección depende del periodo de ejecución cíclico.
- Funciones (FC): Son unidades cuyo objetivo es agrupar una cantidad de funciones que se ejecutan varias veces según las necesidades del diseñador.
- Bloque de funciones (FB): Es un bloque compuesto por diferentes funciones que una vez ejecutado genera variables de salida, su principal característica es la posibilidad de utilizar variables internas, por ello, siempre tiene asociado un bloque de datos (DB).

Para seleccionar el tipo de bloque deseado hay que pulsar sobre *Agregar nuevo bloque* disponible en el *Árbol del proyecto*, también se puede elegir el lenguaje de programación deseado y explicado en Apartado 8.1, como se puede apreciar en Figura 84.

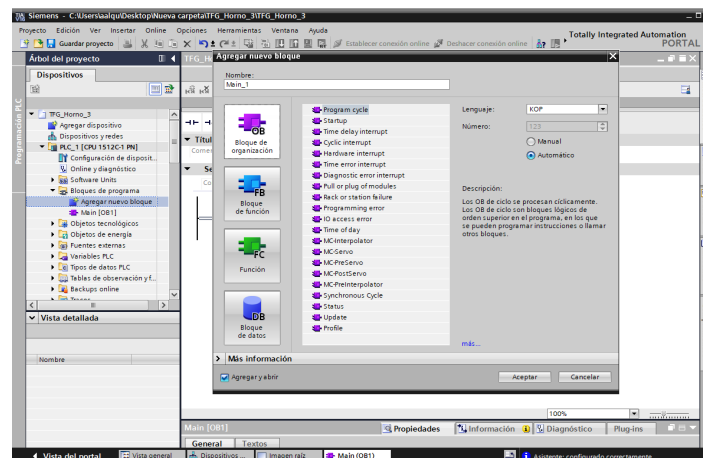


Figura 84. Agregar nuevo bloque

Como el lenguaje seleccionado es KOP, el programa de los diferentes bloques se dividen en segmentos donde se irán incluyendo los diferentes elementos necesarios para la programación, seleccionables en la parte derecha en Instrucciones, como se ve en la Figura 85.

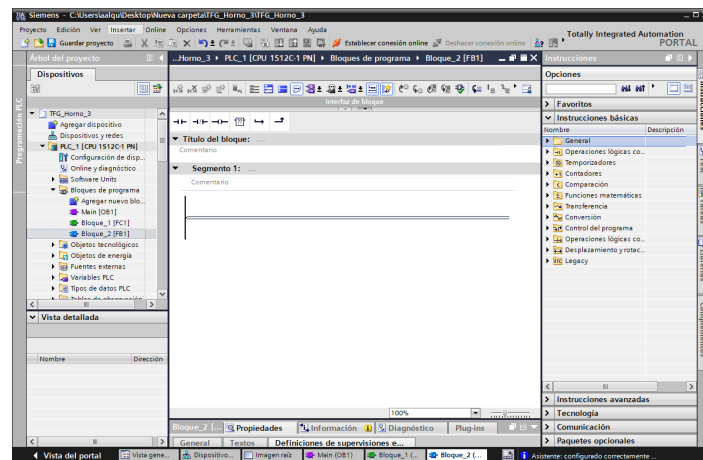


Figura 85. Pantalla principal de programación

A continuación, se van a mostrar las diferentes instrucciones más importantes, o por lo menos, más utilizadas en la elaboración de este trabajo.



Instrucciones básicas	
Nombre	Descripción
General	
	Insertar segmento
	Cuadro vacío [Mayús+F5]
	Abrir rama [Mayús+F8]
	Cerrar rama [Mayús+F9]
	Insertar entrada

Figura 86. Instrucciones básicas – General

Temporizadores	
	Impulso
	Retardo al conectar
	Retardo al desconectar
	Acumulador de tiempo
	–(TP)– Arrancar temporizador como impulso
	–(TON)– Arrancar temporizador como retardo a la conexión
	–(TOF)– Arrancar temporizador como retardo a la desconexión
	–(TONR)– Acumulador de tiempo
	–(RT)– Inicializar temporizador
	–(PT)– Cargar tiempo
Legacy	

Figura 87. Instrucciones básicas – Temporizadores

Comparación	
	CMP == Igual
	CMP <> Diferente
	CMP >= Mayor o igual
	CMP <= Menor o igual
	CMP > Mayor
	CMP < Menor
	IN_Range Valor dentro del rango
	OUT_Range Valor fuera del rango
	–[OK]– Comprobar validez
	–[NOT_OK]– Comprobar invalidez
Variant	

Figura 88. Instrucciones básicas – Comparación

Funciones matemáticas	
CALCULATE	Calcular
ADD	Sumar
SUB	Restar
MUL	Multiplicar
DIV	Dividir
MOD	Obtener resto de división
NEG	Generar complemento a dos
INC	Incrementar
DEC	Decrementar
ABS	Calcular valor absoluto
MIN	Determinar mínimo
MAX	Determinar máximo
LIMIT	Ajustar valor límite
SQR	Calcular cuadrado
SQRT	Calcular raíz cuadrada
LN	Calcular logaritmo natural
EXP	Calcular valor exponencial
SIN	Calcular valor de seno
COS	Calcular valor de coseno
TAN	Calcular valor de tangente
ASIN	Calcular valor de arcoseno
ACOS	Calcular valor de arcocoseno
ATAN	Calcular valor de arcotangente
FRAC	Determinar decimales
EXPT	Elevar a potencia

Figura 89. Instrucciones básicas - Funciones matemáticas

PID Control	
Compact PID	
PID_Compact	Regulador PID universal con optimización integrada
PID_3Step	Regulador PID con optimización integrada de válvulas
PID_Temp	Regulador PID para temperatura
Funciones básicas PID	
CONT_C	Regulador continuo
CONT_S	Regulador paso a paso para elementos finales de control de acción I
PULSEGEN	Generador de impulsos para elementos finales de control de acción proporcional
TCONT_CP	Regulador de temperatura continuo con generador de impulsos
TCONT_S	Regulador de temperatura para elementos finales de control de acción I
Funciones auxiliares	
Polyline	Realizar polilínea con interpolación lineal
SplitRange	Repartir el rango de valores de salida de un regulador PID
RampFunction	Limitar la velocidad de cambio de la señal
Filter_PT1	Implementar filtro paso bajo o simulación del proceso con elemento de retardo de primer orden
Filter_PT2	Implementar filtro paso bajo o simulación del proceso con elemento de retardo de segundo orden
Filter_DT1	Implementar filtro paso alto o elemento diferencial con retardo de primer orden

Figura 90. Tecnología - PID Control

8.6 LIBRERÍAS ADICIONALES

La librería LSIM de Siemens, concretamente en este caso la LSIM_LIB_V3, permite la simulación de diferentes sistemas en STEP7, es muy utilizado, por ejemplo, para simular un proceso que en la vida real si hay errores, pueden generar problemas y para la realización de estudios o ensayos de carácter técnico o educativo. Este tipo de librerías tienen que ser descargas de manera individual de la página web de Siemens y cargadas a Tia Portal manualmente, Figura 91.

En este trabajo es utilizada para realizar una simulación del PID para comprobar y realizar un estudio del sintonizado y así, si el programa se cargara en un PLC real, conocer cómo va a responder con los parámetros de PID ya establecidos antes de dicha carga.

La parte del programa del PLC encargada de dicha simulación es explicada en apartado siguiente.

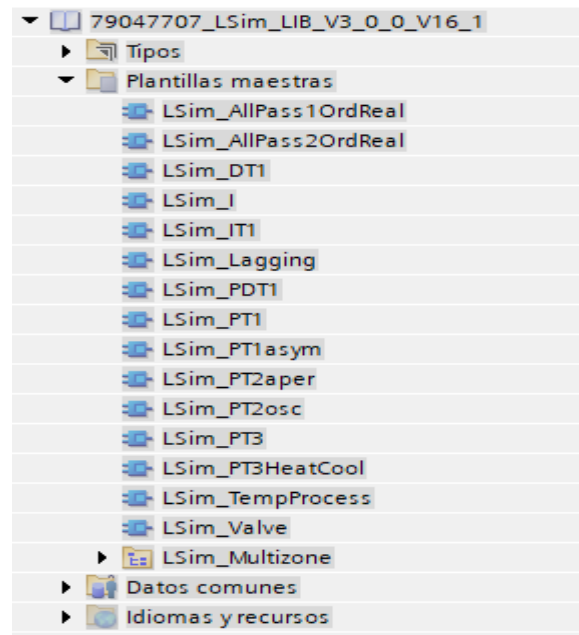
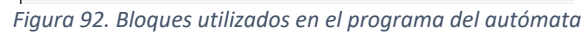


Figura 91. Elementos disponibles en esta librería

9 PROGRAMA DEL PLC

El programa está organizado de la siguiente manera, tal como se puede ver en la Figura 92:

- Main [OB1]: Es el bloque de organización principal del programa que ejecuta el código en cada ciclo de forma constante y periódica.
- PID [OB30]: Bloque de organización donde se puede elegir el tiempo de ejecución, son muy comunes para los controladores PID porque se ejecutan de forma periódica, si el PID estuviera en el código de un OB1, su tiempo sería variable, mientras que en un OB30 es constante.
- LSim_PT1 [FB50] y LSim_Lagging [FB59] con variables almacenadas en DB3 y DB5 para la simulación del PID y así poder realizar el estudio de sintonizado.
- Calentamiento automático [FB1]: Bloque que contiene todo el código necesario para la programación y control a la hora de seleccionar la opción de calentamiento automático, las variables de dicho bloque se almacenan en el DB9.
- Sintonizado [FB2]: Bloque que alberga las funciones y operaciones aritméticas necesarias para modificar los parámetros del PID calculados tras la selección del tipo de sintonizado, variables almacenadas en el DB14.
- Alarmas [DB10]: Bloque de datos que guarda las modificaciones en las variables que disparan alarmas en el programa del PLC.
- Datos_PID [DB2]: Bloque que contiene las variables que actúan directamente al controlador PID.
- HMI [DB6]: Bloque que almacena las variables que pueden cambiar de estado tras una acción desde la pantalla HMI.



- PID y simulación: Explicación del control PID y el uso de los elementos de la librería LSIM para la simulación, además, y con los resultados obtenidos de los diferentes sintonizados del Apartado 7 se muestra cómo responde el PID con cada uno de ellos. Por ello, los bloques implicados son OB30, FB50, FB59 y DB2.
- Programa principal: Muestra el main y las alarmas programadas, se mostrarán el OB1 y el DB10.
- Operaciones desde HMI: Son recogidos las dos acciones principales que se pueden realizar desde la pantalla HMI, el sintonizado del PID y el calentamiento automático, junto con el bloque de datos de entradas y salidas hacia HMI, por lo tanto, se representarán FB1, FB2 y DB6

Tanto el control PID como el programa de simulación se encuentran alojados en el OB30. Las variables de entrada y salida de todo bloque de organización se alojan en el DB2, como representa la Figura 93.

Figura 93. Variables usadas en el OB30

VARIABLES DE ENTRADAS Y SALIDAS DEL PID_Compact

- EN: Activación del bloque
- Setpoint: Variable tipo real con la temperatura objetivo
- Input: Variable real de la temperatura actual medida por el termopar
- Input_PER: No usada, recoge el valor de la entrada física y su escalado se realiza en la configuración del bloque
- ManualEnable: Entrada booleana que permite al usuario tener en la salida el valor que desee
- ManualValue: Entrada real del valor deseado en la salida del bloque PID
- Reset: Entrada booleana que para y reinicia el PID
- ModeActivate: Entrada booleana necesaria para confirmar el cambio de modo del bloque PID
- Mode: Entrada entera con 4 posibilidades, valor 0 para PID inactivo, valor 1 para realización de pretuning, valor 2 para el tuning fine y valor 3 para que el PID trabaje en automático, cada cambio en el modo será necesario una confirmación en el ModeActivate.
- Disturbance: No usada, es una entrada en valor real para simular una perturbación.
- ErrorAck: Entrada booleana para resetear un mensaje de error
- Output: Salida de porcentaje en valor real configurable por el usuario como respuesta al error entre el setpoint y la entrada de temperatura
- Output_PER: No usada, al igual que la Input_PER, es una salida directa a la periferia del PLC y configurable desde el propio bloque PID
- Output_PWM: No usada, salida booleana para la modulación en pulsos.
- Setpointlimit_H: No usada, salida que avisa si el valor del setpoint es mayor al configurado
- Setpointlimit_L: No usada, salida que avisa si el valor del setpoint es menor al configurado
- Inputwarning_H: No usada, salida que avisa si el valor de entrada es mayor al configurado
- Inputwarning_L: No usada, salida que avisa si el valor de entrada es menor al configurado
- State: Variable entera que muestra el valor del modo en que se encuentra el bloque en ese momento
- Error: Salida booleana que indica que existe un error
- Errorbits: No usada, variable de salida tipo doble palabra para indicar cual es el error que ha aparecido

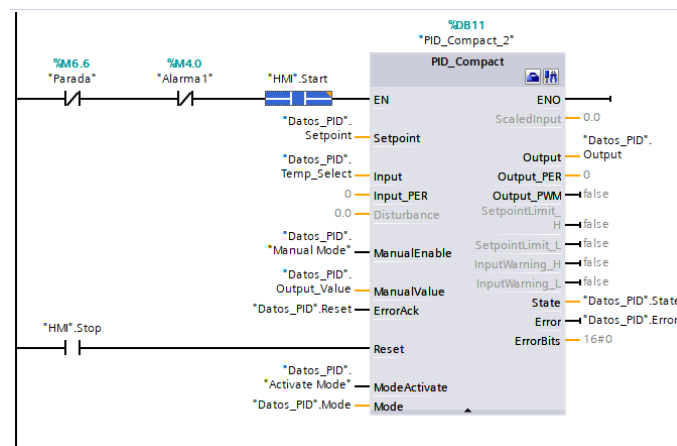


Figura 94. Segmento 1 del OB30

Un aspecto muy importante a la hora de trabajar con este tipo de bloques en realizar su configuración, que para el ámbito de este trabajo se ha realizado de la siguiente forma:

La primera pantalla de la configuración, como se observa en la Figura 95, se denomina ajustes básicos donde se puede cambiar el tipo de variable que va a regular, en este caso temperatura, pero podría ser presión, longitud, fuerza, etc. También se puede cambiar el modo del PID cada vez que se arranque la CPU, ahora está en manual, pero cuando se cargue al PLC físico tiene que estar en automático y los parámetros de entrada/salida, donde hay que elegir qué tipo de entrada o de salida se desea entre las descritas anteriormente en las variables del bloque PID.

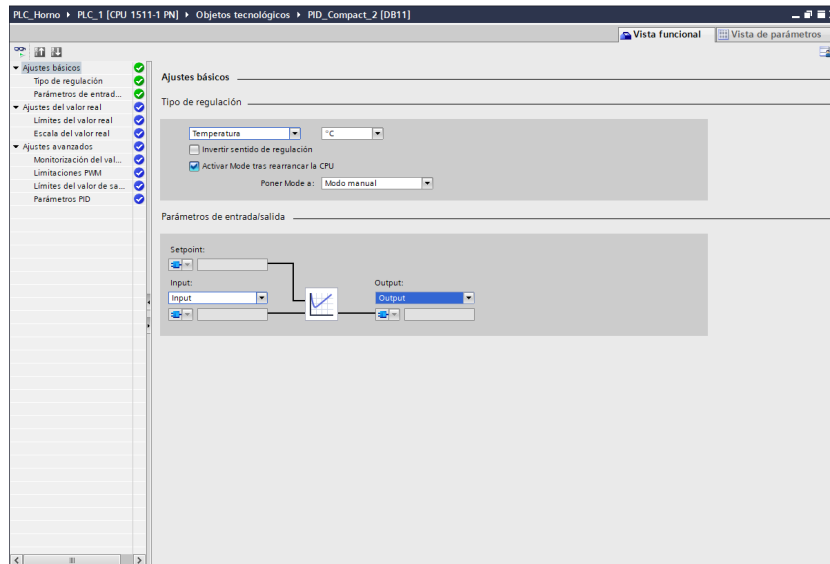


Figura 95. Configuración PID - Ajustes básicos

La pantalla siguiente es la de ajustes del valor real, Figura 96, se refiere a los límites que tiene la entrada del control PID, en este caso, el límite superior es 1200 °C, si se alcanza esta temperatura hay una alarma que para la salida para proteger el horno. Escala de valor real no se utiliza porque es para configurar la entrada física vista anteriormente del Input_PER.

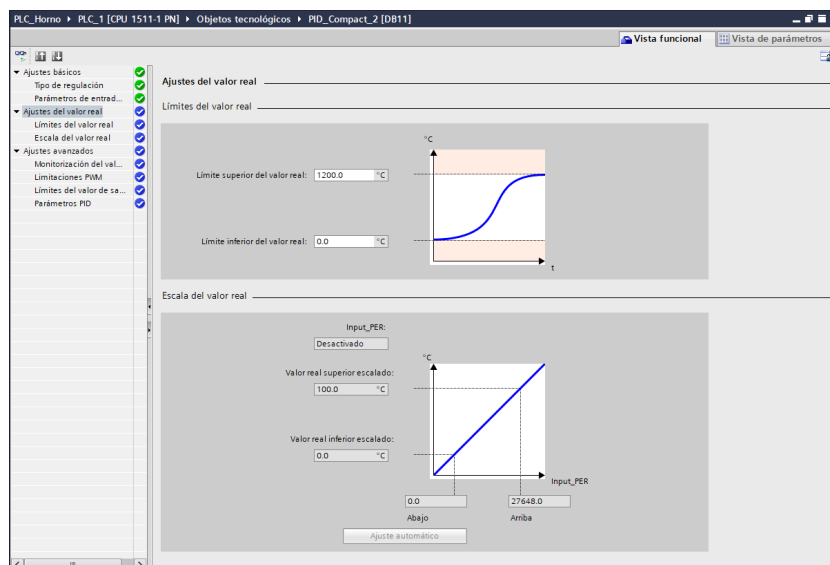


Figura 96. Configuración PID - Ajustes del valor real

La última parte de la configuración es la Figura 97, donde, obviando los dos primeros apartados no tienen importancia, es importante la parte de límites del valor de salida, donde se ajusta el rango de la salida del PID y parámetros PID que son los valores de ajuste de la ecuación del controlador.

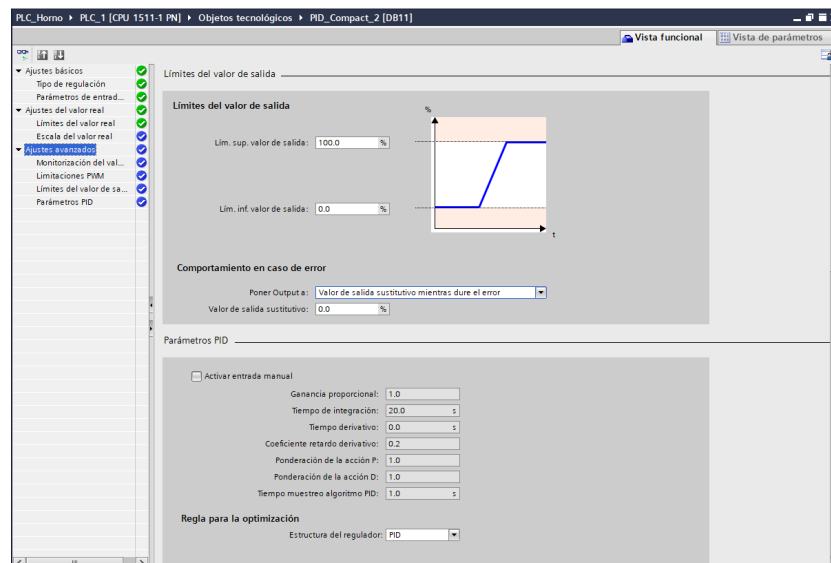


Figura 97. Configuración PID - Ajustes avanzados

Una vez configurado el PID es necesario la librería indicada en el Apartado 8.6 para la realización del programa que ayudará a realizar una simulación del control, es decir, para la simulación hay que elegir en la pantalla HMI que se va a realizar un proceso de simulación cambiando la variable de entrada "Datos_PID".Temp_Select, véase la Figura 94, entre la temperatura escalada del termopar %MD56, por una variable que se irá modulando según el programa denominada "Datos_PID".Temp_Sim.

La programación mostrada a continuación sirve para crear una función de transferencia como la del sistema real con dos bloques de la librería, el LSim_PT1 para crear un sistema de primer orden y un LSim_Lagging para añadir el retardo, y realimentar la temperatura simulada constantemente al PID, como se ha reflejado en la Figura 98.

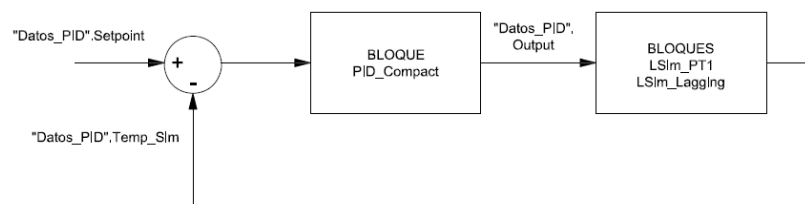


Figura 98. Esquema de funcionamiento del programa de simulación

Las variables de entrada y salida del programa de simulación también pertenecen al bloque de datos DB2, mientras que los bloques para la simulación tienen bloques de funciones propios con la programación de Siemens para su desarrollo con sus bloques de datos asociados para el almacenamiento de sus propias variables internas.

En el segmento 2 del programa de simulación se coloca el bloque LSim_PT1 que como se ha dicho anteriormente simula una función de transferencia de primer orden, donde se introducen los valores calculados en el Apartado 4 que corresponde con el horno de muestras.

VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA DEL LSim_PT1

- EN: Activación del bloque
- calcParam: No usada, entrada booleana para recalcular las variables internas del bloque

- input: Entrada real por donde entra la acción de salida del controlador PID
- tmLag1: Entrada real para introducir el valor de la constante de tiempo de un sistema de primer orden
- gain: Entrada real para introducir el valor de la ganancia del sistema a simular
- cycle: Entrada real para la duración del tiempo de llama del OB
- maxOut: Entrada real que limita superiormente el valor de salida del propio bloque
- minOut: Entrada real que limita inferiormente el valor de salida del propio bloque
- Reset: No usada, entrada booleana que resetea el bloque
- Error: No usada, salida booleana que indica si existe un error en el bloque
- Status: No usada, variable tipo Word que se activa si tmLag1 es menor que 0
- maxRached: No usada, salida booleana si la salida del bloque alcanza maxOut
- minRached: No usada, salida booleana si la salida del bloque alcanza minOut
- Output: Variable real de la salida del primer orden

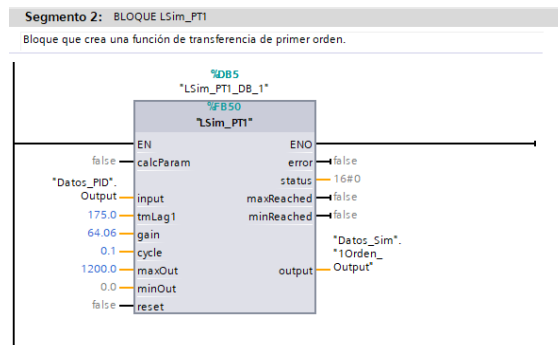


Figura 99. Segmento 2 del programa de simulación

En el segmento 3 es colocado el bloque LSim_Lagging que añade el retardo correspondiente del ensayo del horno a la función de primer orden del segmento 2, este bloque, Figura 100, posee las siguientes entradas y salidas.

VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA DEL BLOQUE LSim_Lagging

- EN: Activación del bloque
- Input: Entrada real donde se introduce la salida del bloque LSim_PT1
- delayCicles: Valor entero que incluye el retardo ensayado
- output: Salida real del bloque

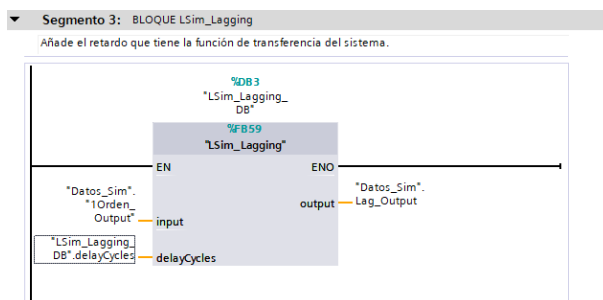


Figura 100. Segmento 3 del programa de simulación

Por último, en el segmento 4 se añade a la temperatura simulada el valor de la temperatura ambiente mediante un bloque que realiza una operación matemática y así hacer la simulación lo más real posible.

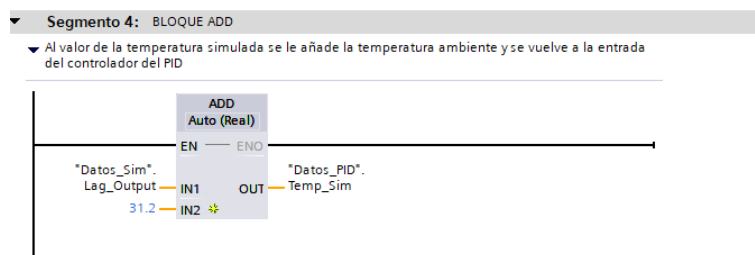


Figura 101. Segmento 4 del programa de simulación

9.1.2 PROGRAMA PRINCIPAL

El programa principal del autómata programable se escribe en el bloque de organización OB1, está separado en 11 segmentos, en esta memoria sólo se expone el programa junto con una breve explicación, los comentarios más detallados de cada uno de ellos podrán ser vista en el Anexo 1 que complementa esta memoria

En la Tabla 20 se recogen todas las variables internas que aparecen en este bloque de organización:

VARIABLE	NOMBRE	UBICACIÓN	COMENTARIO
MD0	Output_Norm	Segmento1	Valor normalizado de la salida del PID
MD28	Output_Scale	Segmento1	Valor de 0 a 10 v de la salida del PID
MD52	Temp_Norm	Segmento1	Valor normalizado de la entrada del termopar
MD56	Temp_Scale	Segmento1	Valor escalado del termopar que es entrada del PID
M6.3	Sistema_OK	Segmento2	Si la seta no está pulsada esta variable estará en reset
M6.6	Parada	Segmento2	Variable que se activa si es pulsada la seta de
MD8	Forzar_Output	Segmento4	Variable que hace cero la salida
M12.0	Activar_Pretuning	Segmento7	Activa el modo de optimización inicial
M12.1	Activar_Tuning	Segmento7	Activa el modo de optimización fina

Tabla 20. Variables internas del programa principal OB1

- Segmento 1 del OB1: Normalizado y escalado de las señales analógicas, tanto la de entrada del termopar como la salida del PID, de la cual se aprovecha un escalado para representar posteriormente el voltaje de salida.

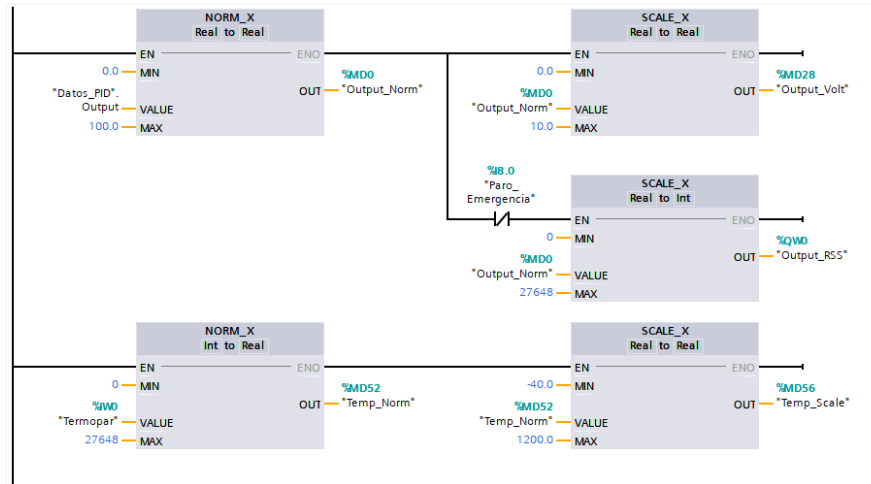


Figura 102. Segmento 1 del programa principal

- Segmento 2 del OB1: Programación de la parada de emergencia

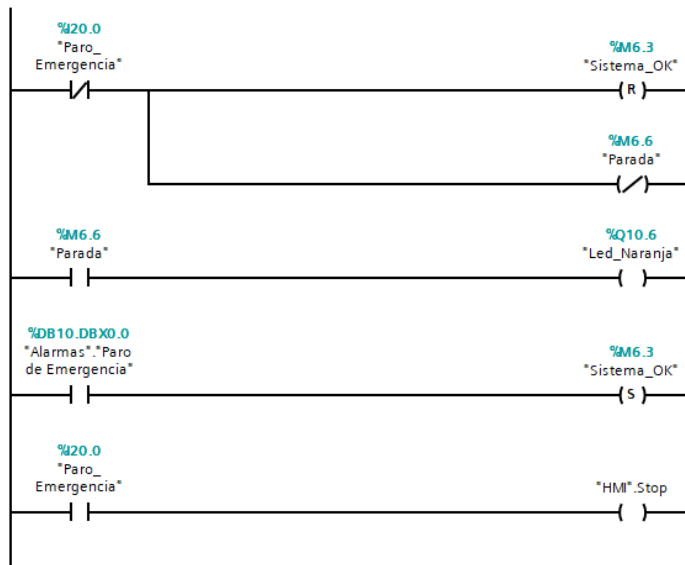


Figura 103. Segmento 2 del programa principal

- Segmento 3 del OB1: Establece las cinco alarmas configuradas en este trabajo

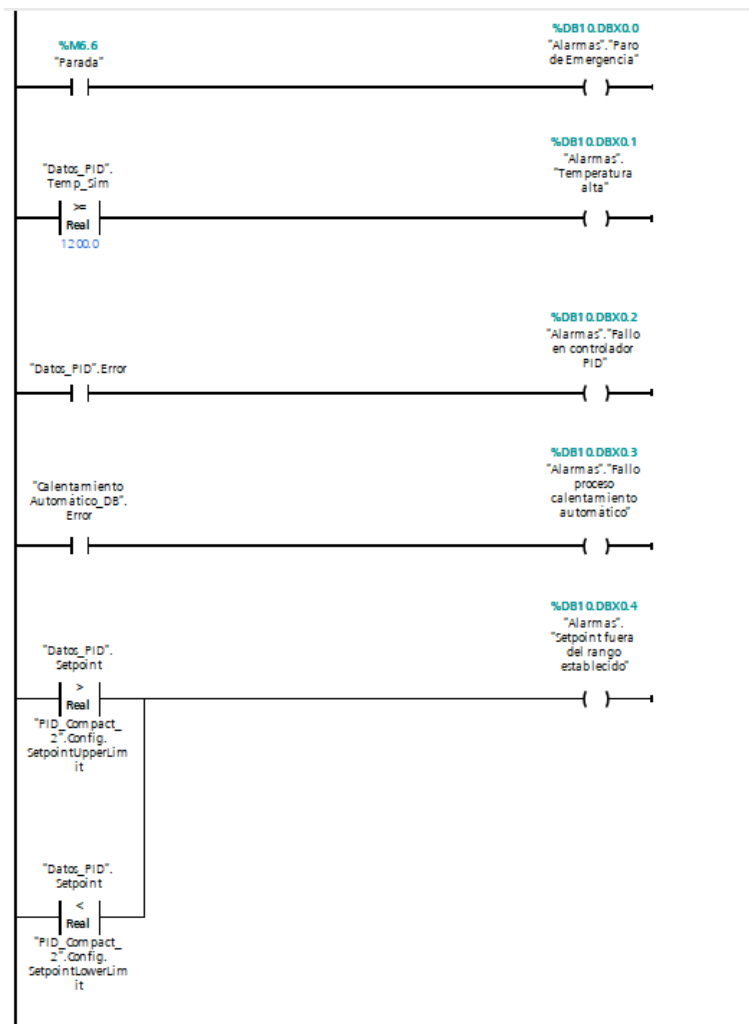


Figura 104. Segmento 3 del programa principal

- Segmento 4 del OB1: Configuración de la marcha-paro del PID cambiando el modo del bloque PID y activándolo posteriormente.

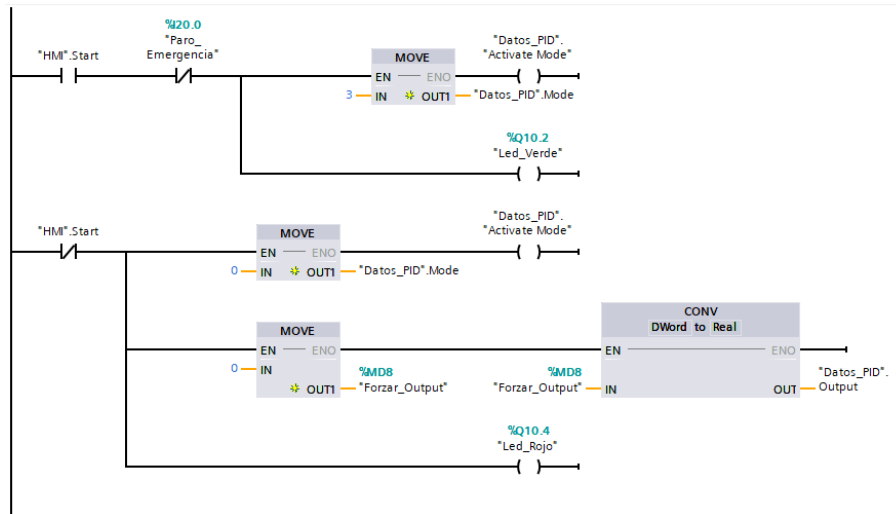


Figura 105. Segmento 4 del programa principal

- Segmento 5 del OB1: Accionamiento automático y manual de la electroválvula de aspiración.

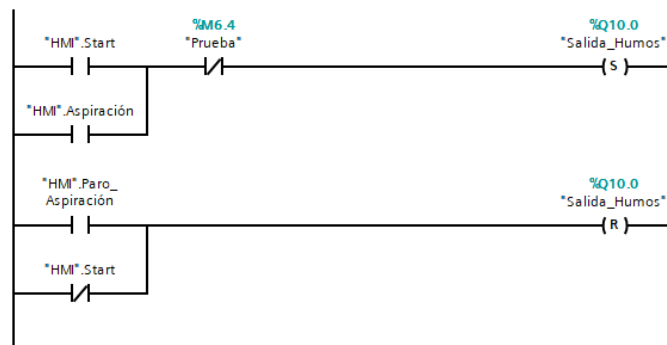


Figura 106. Segmento 5 del programa principal

- Segmento 6 del OB1: Segmento para el forzado manual de la salida del PID

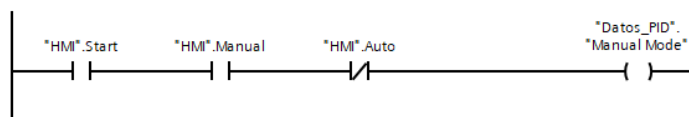


Figura 107. Segmento 6 del programa principal

- Segmento 7 del OB1: Cambia el modo de actuación del control PID para la realización de la optimización inicial y la optimización fina.

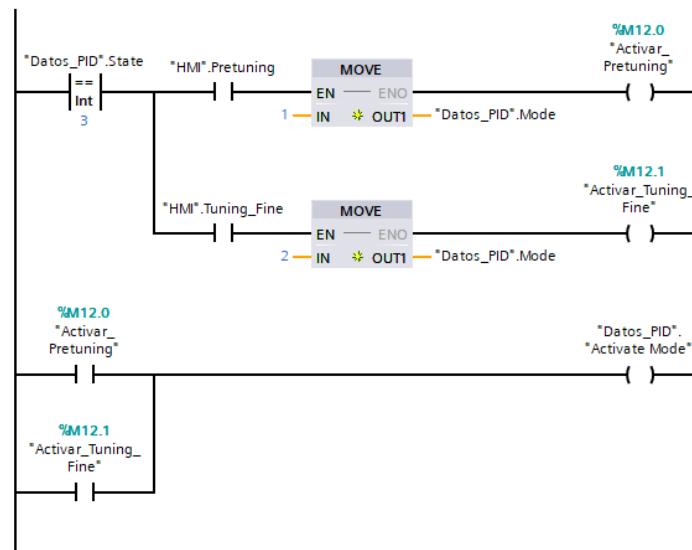


Figura 108. Segmento 7 del programa principal

- Segmento 8 del OB1: Llamada al bloque de función de sintonización.

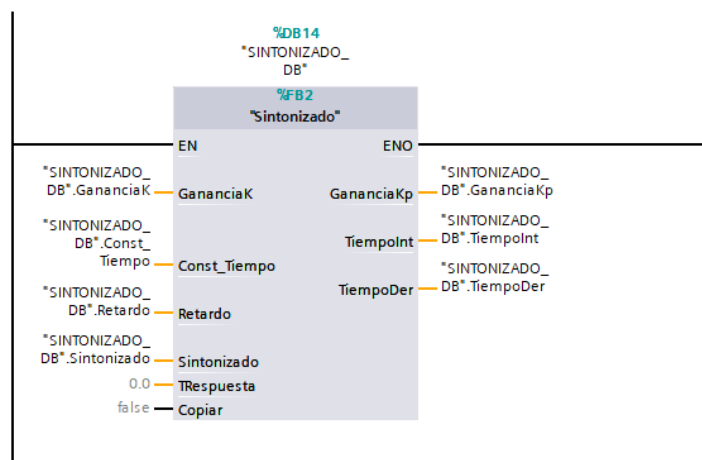


Figura 109. Segmento 8 del programa principal

- Segmento 9 del OB1: Activación o desactivación de la basculación del horno de muestras

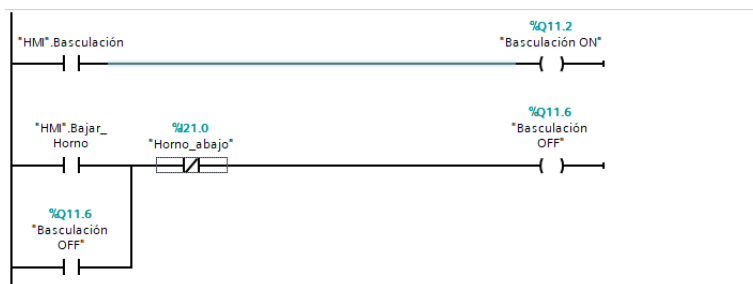


Figura 110. Segmento 9 del programa principal

- Segmento 10 del OB1: Si el valor del setpoint es mayor o menor al configurado, envía los límites al setpoint del PID.

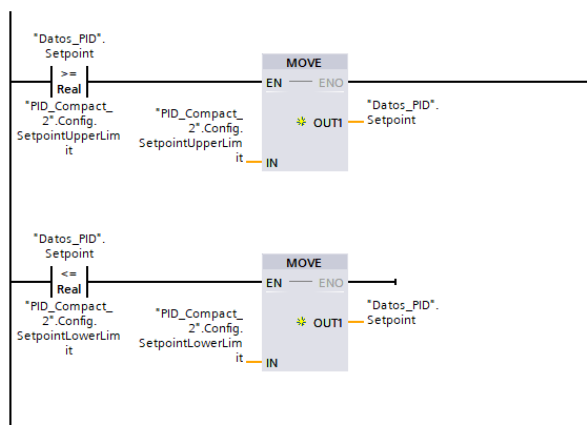


Figura 111. Segmento 10 del programa principal

- Segmento 11 del OB1: Llamada al bloque de función de calentamiento automático

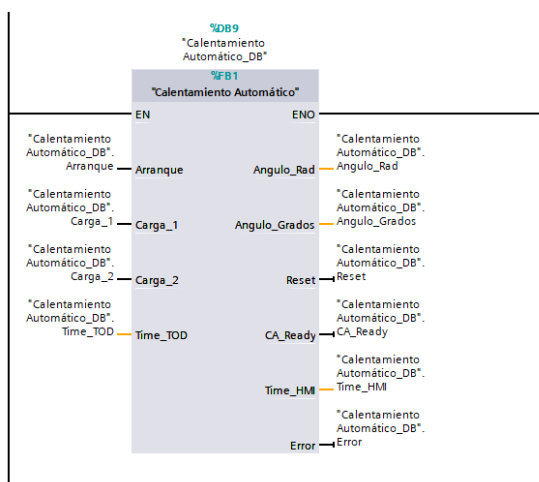


Figura 112. Segmento 11 del programa principal

Las alarmas del programa se recogen en el DB10, y son organizadas como puede verse en la para posteriormente ser tratadas en el visor de avisos de la pantalla HMI, el acuse de este tipo de alarmas se realiza mediante el botón de la propia pantalla de avisos.

Alarmas									
	Nombre	Tipo	Valor					V...	Sup...
1	Static								
2	Paro de Emergencia	Bool	false						
3	Temperatura alta	Bool	false						
4	Fallo en controlador PID	Bool	false						
5	Fallo proceso calentamiento automático	Bool	false						
6	Setpoint fuera del rango establecido	Bool	false						

Figura 113. Listado de alarmas recogidas en DB10

9.1.3 FUNCIONES DE LA PANTALLA HMI PROGRAMADAS EN EL PLC

A parte del control y alguna configuración básica que se puede realizar desde la pantalla HMI sobre el bloque del PID, existen dos funciones importantes diseñadas por motivos diferentes:

- Sintonizado del PID: Como se ha visto en el Apartado 7 los diferentes tipos de sintonizado son ecuaciones cuyas incógnitas vienen definidas por los valores de ganancia, tiempo y retardo de la función de transferencia del sistema térmico obteniendo los valores del controlador PID. Se crea una pantalla donde, cambiando los valores de la función de transferencia y eligiendo el método programado, solo hay tres, el IMC de Skogestad, PI de Ziegler-Nichols y PI de Cohen-Coon, se obtienen nuevos valores para el controlador que son guardados en sus configuración.

Una de las principales funciones de esta imagen es la posibilidad de introducir los valores en segundos de un sistema térmico y seleccionar si se desean calcular los parámetros del controlador tanto si se va a implementar como proceso real, o si son utilizados para realizar una simulación.

Este sintonizado se realiza en un bloque de función denominado FB2 cuyas variables internas se guardan en el DB14 y son las mostradas en la Tabla 15 menos las temporales de las operaciones aritméticas.

NOMBRE	TIPO DE DATOS	ARRANQUE	COMENTARIO
Input			
GananciaK	Real	0.0	Entrada ganancia función de transferencia
Sintonizado	Int	0	Variable para elegir el método de sintonizado
TRespuesta	Real	0.0	Entrada del tiempo de respuesta para el método SIMC
Copiar	Bool	false	Variable para copiar parámetros a la configuración PID
Const_Tiempo_Min	Real	0.0	Entrada constante tiempo función de transferencia en segundos
Retardo_Min	Real	0.0	Entrada retardo función de transferencia en segundos
Output			
GananciaKp	Real	0.0	Variable con el valor de la ganancia proporcional del PID
TiempoInt	Real	0.0	Variable con el valor del tiempo de integración del PID
TiempoDer	Real	0.0	Variable con el valor del tiempo derivativo del PID
InOut			
Const_Tiempo_Min	Real	0.0	Entrada constante tiempo función de transferencia en minutos
Retardo_Min	Real	0.0	Entrada retardo función de transferencia en minutos
Static			
TDBC	Real	0.0	Variable que calcula T_{BC}^d
Constante_Tiempo	Real	0.0	Variable de la constante de tiempo con la que se realizan las operaciones
Retardo_1	Real	0.0	Variable del retardo con la que se realizan las operaciones

Tabla 21. Variables del FB2 Sintonizado en DB14

El bloque de funciones FB2 está formado por 4 segmentos, el segmento 1 recoge la selección del método PI de Ziegler-Nichols y las operaciones aritméticas de la Tabla 9 para el controlador PI, el segmento 2 se activa si es seleccionado el método PI de Cohen-Coon entonces se calculan las ecuaciones de la Tabla 10, el segmento 3 es para los cálculos, si el método elegido es Skogestad, realizando las operaciones de las ecuaciones de la Tabla 8 y el último, el segmento 4 copia los resultados obtenidos tras la elección de cualquiera de los métodos antes seleccionados y los mueve a los parámetros del PID como puede verse en la Figura 114.

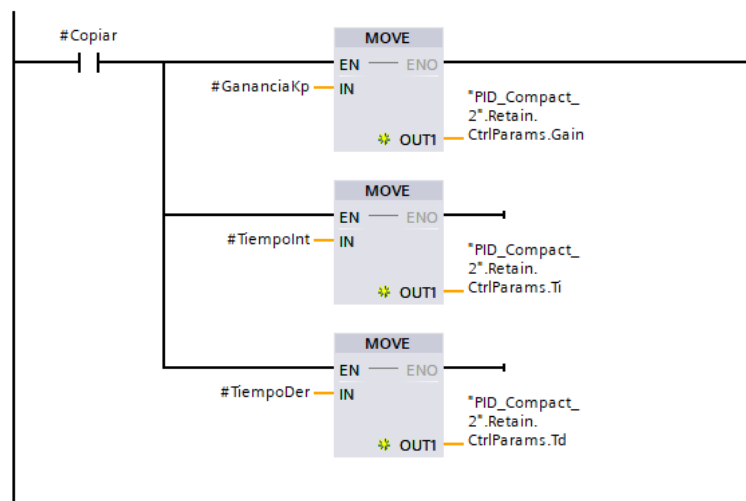


Figura 114. Segmento 4 del FB2

- Calentamiento automático: Para la protección de la cerámica del crisol del horno el fabricante establece dos tiempos de calentamientos, uno por si horno lleva más de 72 horas apagado y otro si se ha cambiado el crisol y hay que realizar un calentamiento inicial, en ellos, al pulsar en la pantalla HMI los botones correspondientes automáticamente carga los valores de setpoint y tiempo preestablecidos. El programa, además, permite cambiar estos valores manualmente modificando los valores oportunos para cambiar la rampa de calentamiento

Toda esta programación se realiza en un bloque de funciones FB1 con el bloque de datos que almacena las variables DB9 mostradas en la Tabla 22.

NOMBRE	TIPO DE DATOS	ARRANQUE	COMENTARIO
Input			
Arranque	Bool	false	Arranca el calentamiento automático
Carga_1	Bool	false	Activa la carga tras 72 horas parado
Carga_2	Bool	false	Activa la carga tras cambio de crisol
Time_TOD	Time_Of_Day	TOD#00:00:00	Introduce el tiempo manualmente
Output			
Angulo_Rad	Real	0.0	Salida en radianes de la pendiente de la rampa
Angulo_Grados	Real	0.0	Salida en grados de la pendiente de la rampa
Reset	Bool	false	Reseteo del bloque de función de rampa
CA_Ready	Bool	false	Calentamiento automático completado
Time_HMI	Time_Of_Day	TOD#00:00:00	Descuento del tiempo para terminar el proceso de
Error	Bool	false	Indica si aparece un fallo en la función de rampa
Static			
Output_CA	Real	0.0	Salida del bloque de función de rampa
Tiempo_Real	Real	0.0	Duración del tiempo en dato real
TimeBCD	Word	16#0	Tiempo de descuento del proceso en formato BCD
Time_10	Time	T#0ms	Tiempo introducido manualmente convertido en formato time
Time_11	S5Time	S5T#0ms	Tiempo introducido al temporizador en formato S5Time

Time_12	Dint	0	Tiempo introducido manualmente convertido en doble entero
Time_13	Dint	0	Tiempo de descuento del proceso en formato doble entero
Time_14	Time	T#0ms	Tiempo de descuento del proceso en formato time
Visible	Array[0...16] of		Array que contiene los estados de cada uno de los tramos de la
ResetVisible17	Bool	false	Resetea el último tramo de la representación gráfica
StructLimite	Struct		Struct que contiene los cálculos para los tramos
Finalización	Bool	false	Indica el fin del calentamiento automático

Tabla 22. Variables del DB9 del FB1

El bloque de función FB1 contiene en el segmento 1 el bloque de la función rampa, el setpoint objetivo es el input del bloque mientras que en la salida output el valor del setpoint va incrementándose en función del tiempo.

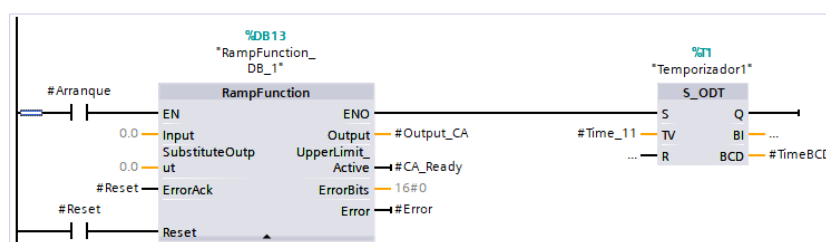


Figura 115. Segmento 1 del FB1

En el segmento 2 se obtiene la pendiente de la rampa que determina el aumento del setpoint del bloque de función, y modifica ese valor en grados centígrados para mostrarlo en pantalla.

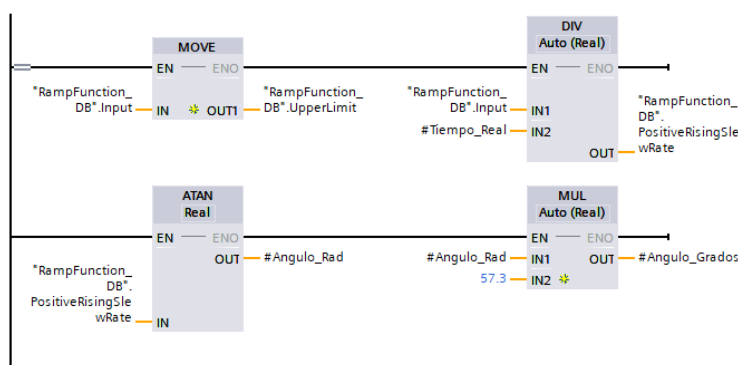


Figura 116. Segmento 2 del FB1

En el segmento 3 se envía la salida del bloque función rampa a la entrada del setpoint del controlador PID y el segmento 4 introduce los valores recomendados por el fabricante pulsando carga 1 o carga 2 desde la pantalla HMI.

Mientras, los segmentos 6 y 7 se encargan del cálculo del setpoint en 17 tramos para mostrar la evolución del proceso de calentamiento mientras está en marcha el proceso.

Todo el programa del PLC está incluido en el Anexo 1 junto con comentarios explicativos de cada segmento tanto del programa principal como de los dos bloques de funciones incluidos.

10 PROGRAMACIÓN DE LA PANTALLA HMI

10.1 ASPECTOS BÁSICOS PARA LA PROGRAMACIÓN DE PANTALLAS HMI

La principal característica que debe tener la programación de una pantalla HMI es que sea eficaz, cumpla con lo necesario y sea muy intuitiva para la persona que tiene que trabajar con ella. La programación de este tipo de pantallas es diferente a la programación de un PLC, con una programación más visual usando variables propias, aunque habitualmente usará entradas y salidas del PLC, con las que se podrán actuar de diferentes formas.

Antes de comenzar con la programación de una pantalla, hay que tener bien diseñado lo que se quiere hacer y aprovechar las herramientas de configuración del *Árbol del Proyecto*, Figura 117, para facilitar el trabajo posterior.

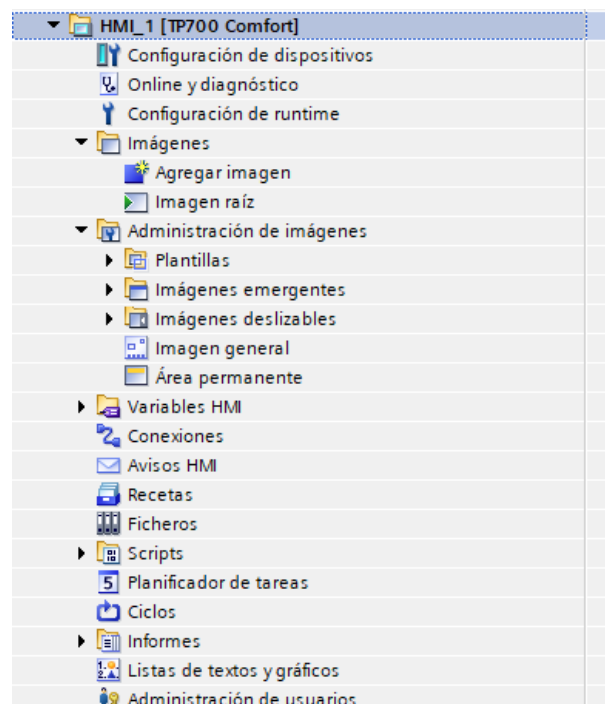


Figura 117. Configuración de la pantalla HMI

La programación de este tipo de pantallas se realiza mediante imágenes donde se incluirán los elementos visuales, sobre los cuales se pueden realizar diferentes acciones, por ejemplo, cambiar su apariencia, colores, tamaños, posiciones en pantalla, textos, actuaciones sobre entradas o salidas del PLC según la función ideada del diseñador, cambiar el movimiento por pantalla, la visualización, etc. Las herramientas más usadas son:

- **Objetos básicos:** Figura 118, compuesto por la línea, la polilínea, polígono, elipse, círculo, cuadrado y texto sobre los cuales puede actuarse sobre su apariencia para crear el diseño principal de la pantalla, además de actuar sobre ella o su visibilidad según cambio de estado en variables. También hay disponible un visor de gráficos que permite cargar una imagen en multitud de formatos.

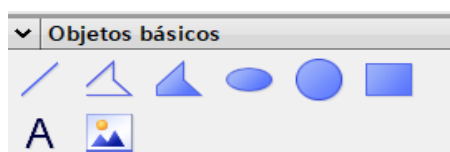


Figura 118. Herramientas - Objetos básicos

- Elementos: Figura 119, estos elementos se encargan de realizar actuaciones directas sobre el PLC enviando o recibiendo información, está formado por el campo E/S, botón, campo E/S simbólico, campo E/S gráfico, campo de fecha y hora, barras, interruptos, librería de símbolos, deslizador, indicador gauge y reloj.

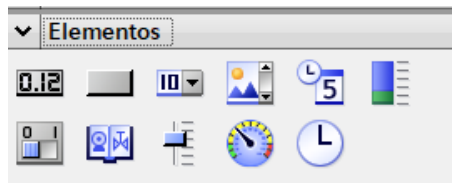


Figura 119. Herramientas - Elementos

- Controles: Figura 120, conjunto que actúa sobre el control y el diagnóstico del programa de la pantalla HMI, porque incluye características como el visor de avisos, visor de curvas, visor de usuarios, navegador HTML, tabla de observación, visor Sm@rtClient, visor de recetas, visor de curvas $f(x)$, media player, visor de código del plc, vista general de Graph, vista general de ProDiag, visor de análisis de criterios, visor de cámara y visor de pdf.

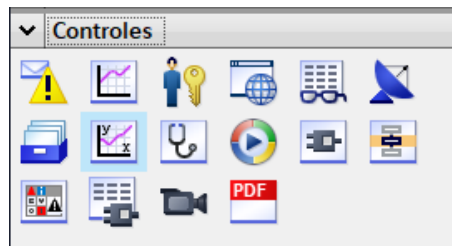


Figura 120. Herramientas - Controles

- Gráficos: Figura 121, representaciones gráficas de multitud de elementos industriales y arquitectónicos con el cual poder diseñar la pantalla HMI incluidas en Siemens WinCC, aunque el usuario también puede añadir propias lo que permite una amplia gama de posibilidades.

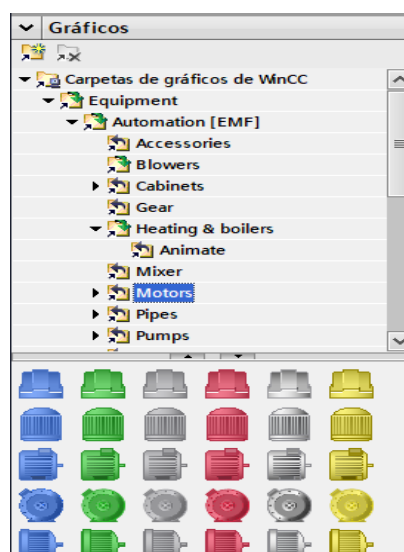


Figura 121. Herramientas - Gráficos

Una vez determinadas las operaciones básicas para la programación de una pantalla HMI, es el momento de mostrar las acciones más importantes que se pueden realizar en cada una de las imágenes que forman la programación de la pantalla HMI.

La programación está compuesta por 6 pantallas denominadas de tal forma:

- Pantalla principal: Es la imagen desde donde se puede acceder al resto de imágenes.
- PID Básico: Imagen con las operaciones designadas a realizar por el operario del horno de muestras.
- PID Experto: Imagen donde se incluyen configuraciones del PID.
- Sintonizado: Imagen en la cual se pueden realizar 3 métodos de sintonizado.
- Calentamiento automático: Imagen para realizar el calentamiento gradual del horno de muestras.
- Visor de avisos: Imagen me muestra los avisos de las alarmas configuradas.

Existes dos tipos de usuarios para el control de esta pantalla, con cierre de sesión tras el transcurso de un tiempo determinado, a continuación, se relatan los tipos de usuario y las imágenes a las que pueden acceder:

- Operario: Pantalla principal, PID Básico.
- Admin: Pantalla principal, PID Básico, PID Experto, Sintonizado, Calentamiento automático y Visor de Avisos.

Cada imagen está diseñada a partir de una plantilla con una foto de la planta productiva, el logo en la parte izquierda superior y la fecha y la hora en la parte superior derecha. Se procede a explicar cada imagen, su objetivo y funcionamiento mediante video.

10.2 PANTALLA PRINCIPAL

Desde la imagen principal se tiene la capacidad de navegar por todas las imágenes de la pantalla si se tiene el acceso total del Admin o al PID Básico si es Operario. El recorrido por las imágenes puede verse en el Video 15. Siendo la Figura 122 la imagen principal.

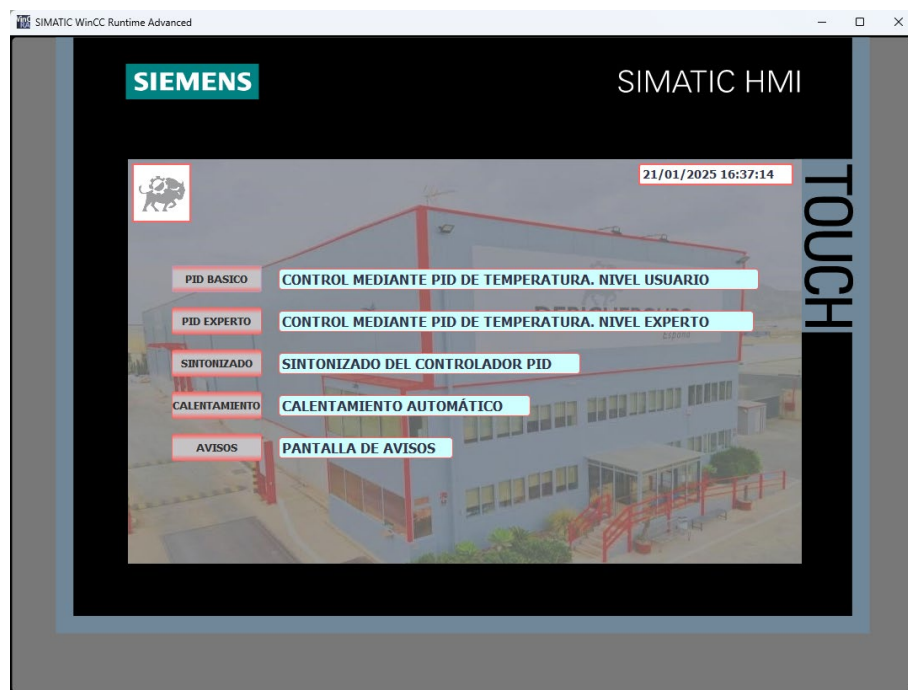


Figura 122. Imagen principal de la pantalla HMI

Video 15 - [Pantalla principal del HMI](#)

10.3 PID BÁSICO

Como se ha comentado con anterioridad, esta imagen se tiene acceso tanto a nivel Operario como a nivel Admin, visualmente se puede destacar:

- Botones de marcha y paro del controlador PID, cambian de apariencia cuando son activados e impiden accionarse de manera conjunta.
- Selector de la entrada de temperatura, entre el proceso real usando el termopar del horno de muestras y el proceso simulado.
- Visualización de los valores de setpoint, temperatura actual y voltaje de salida que afectan al horno de muestras.
- Imagen del horno de muestras que cambia de estado si se activa el controlador.
- Accionamiento de la electroválvula de aspiración representada por un ventilador en el gráfico del horno.
- Botones de basculación y bajar horno que cambian de apariencia cuando se activan apareciendo además avisos del estado del propio horno.
- Grafica con las curvas de setpoint, temperatura actual, acción y voltaje.

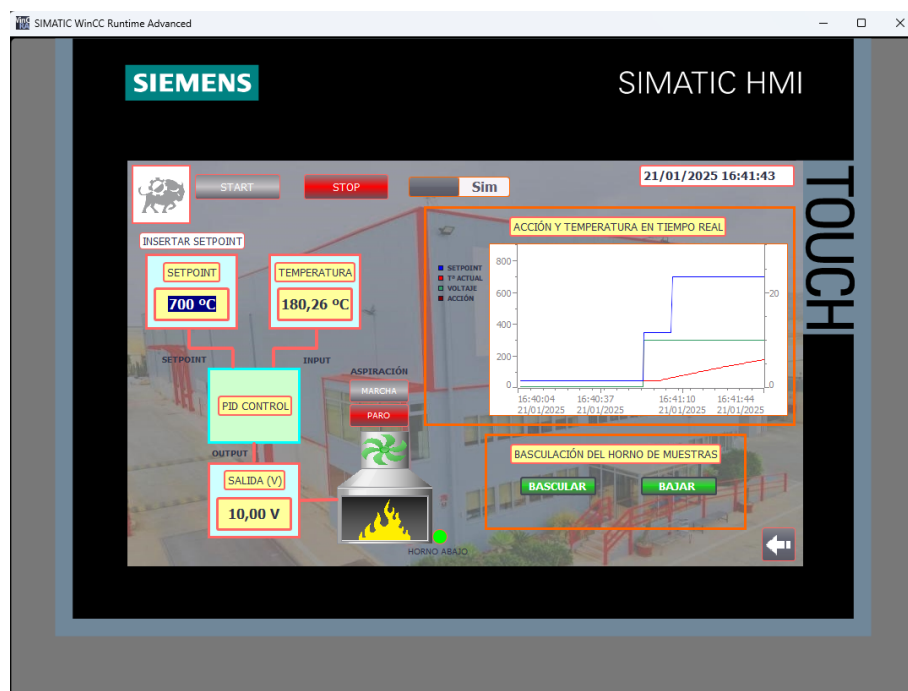


Figura 123. Imagen del PID Básico de la pantalla HMI

Como se puede apreciar en la Figura 123, esta es la imagen con la que el operario puede realizar su desempeño del día a día sin problemas, para ello, lo primero que tiene que hacer es insertar un valor de setpoint dentro de un rango preestablecido, arrancar el controlador mediante el botón Start, si el horno está encendido, la válvula de aspiración se abrirá, además puede bascular el horno para descargar el caldo obtenido de la muestra, para ello es preciso que la tecla se mantenga pulsada para asegurarse que no se acerca a la boca del horno de muestras, para bajar el horno con una pulsación en Bajar Horno es suficiente. Para mayor claridad de las funcionalidades de la imagen, se realizan todas las operaciones en el siguiente Video 16.

Cuando el controlador está muy cerca ya del valor de setpoint objetivo, la temperatura sube muy lentamente y por no alargar mucho el video se realiza el cambio de setpoint antes, hay que tener en cuenta que estos valores están ajustados para el **proceso simulado**.

Video 16 - [PID Básico de la pantalla HMI](#)

10.4 PID EXPERTO

Esta imagen es de acceso exclusivo para el usuario Admin, el Operario no puede modificar valores de configuración del PID, como indica la propia imagen, sólo pueden modificarse las casillas cuyo fondo en azul, las de fondo blanco sirven para mostrar datos importantes, visualmente la imagen está dividida en:

- Control PID: Zona izquierda superior, al igual que en la imagen de PID Básico, muestra los valores del controlador tanto de acción, voltaje, temperatura actual en función del setpoint, el cual, sí que puede ser modificado.
- Forzar salida manual: Zona izquierda central, cuando se pone en manual es posible forzar la salida del controlador al valor que quiera el usuario introduciendo el valor en la casilla habilitada para tal función, el valor siempre tiene que estar dentro del rango establecido, como se puede observar en él, si el valor de la acción es superior o inferior a los límites lo ajusta al límite superior o inferior.
- Parámetros del PID: Zona izquierda inferior, están divididos en dos partes, el *retain* que son los datos actuales del controlador, es decir, los que almacena el PLC en ese momento y el *backup* que son los que guarda el proyecto.
- Configuración PID: Zona derecha superior, lugar donde se pueden cambiar rangos de valor real, es decir, temperatura, valor de salida, valor sustitutivo de salida si el PID entra en error y el rango entre que tiene que estar el setpoint introducido.
- Sintonizado predeterminado: Zona derecha inferior, desde Tia Portal, Siemens permite realizar un pretuning, si se cambiar el bloque del controlador PID en el programa es imprescindible y un tuning, donde realiza un sintonizado que modifica los valores del controlador PID tras un proceso automático.

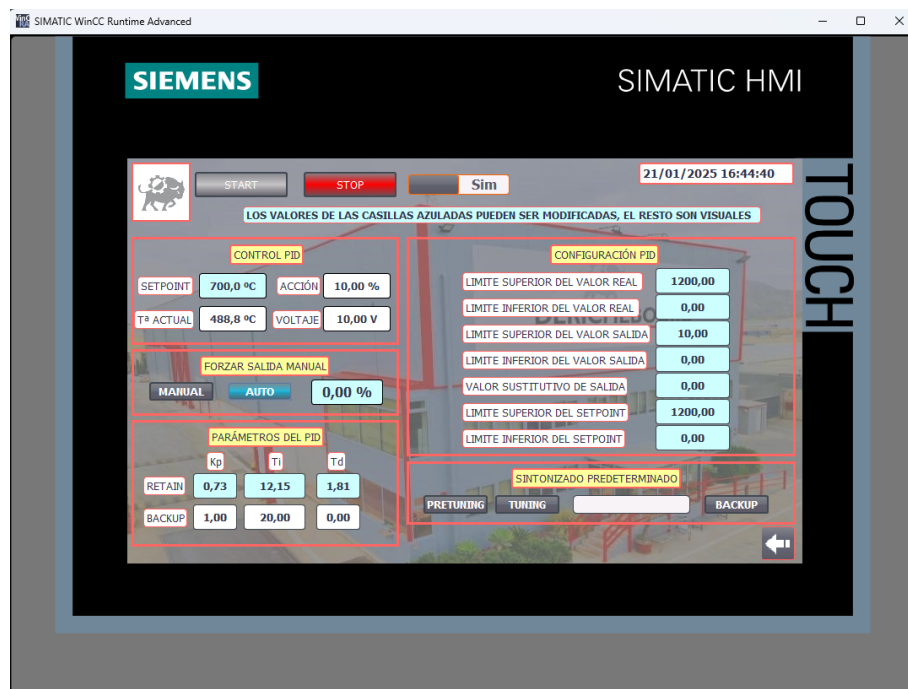


Figura 124. Imagen del PID Experto de la pantalla HMI

En la Figura 124 se muestra la imagen que debe ser tratada por el usuario Admin porque puede provocar problemas en la configuración o de temperatura excesiva, en el Video 17 se muestra como realiza el tuning desde la pantalla HMI y mostrando que realmente realiza la misma operación en el software de Siemens, cuando el proceso acaba, se modifican automáticamente los valores de los parámetros del controlador PID retain y mediante el botón Backup se cargarán en el proyecto, el proceso de tuning en ocasiones dura un tiempo excesivo, en este caso, el video es cortado hasta llegar al momento donde el software prueba diferentes acciones para ajustar los parámetros del controlador además también se muestra cómo se fuerza la salida manual del controlador PID, como está configurado al 20% no permite introducir más salida que la establecida, por ello, el valor de acción manual debe de estar dentro del rango configurado.

Video 17 - [PID Experto de la pantalla HMI](#)

10.5 SINTONIZADO

Al igual que en la imagen PID Experto, el sintonizado sólo puede hacerse por el Admin porque modifica los parámetros del controlador PID, el proceso de cálculo se realiza por las operaciones aritméticas del bloque de funciones FB2 y en base a las tablas obtenidas en el Apartado 7.

La principal característica de esta imagen en la pantalla HMI es que tiene la posibilidad de realizar el sintonizado de cualquier función de transferencia de primer orden con retardo, bien sea para el **proceso real** con la medida del termopar del horno de muestras, o bien para cualquier ensayado con el **proceso simulado**, simplemente hay que seleccionarlo en pantalla y el programa modificará los valores que posteriormente se cargan al controlador PID.

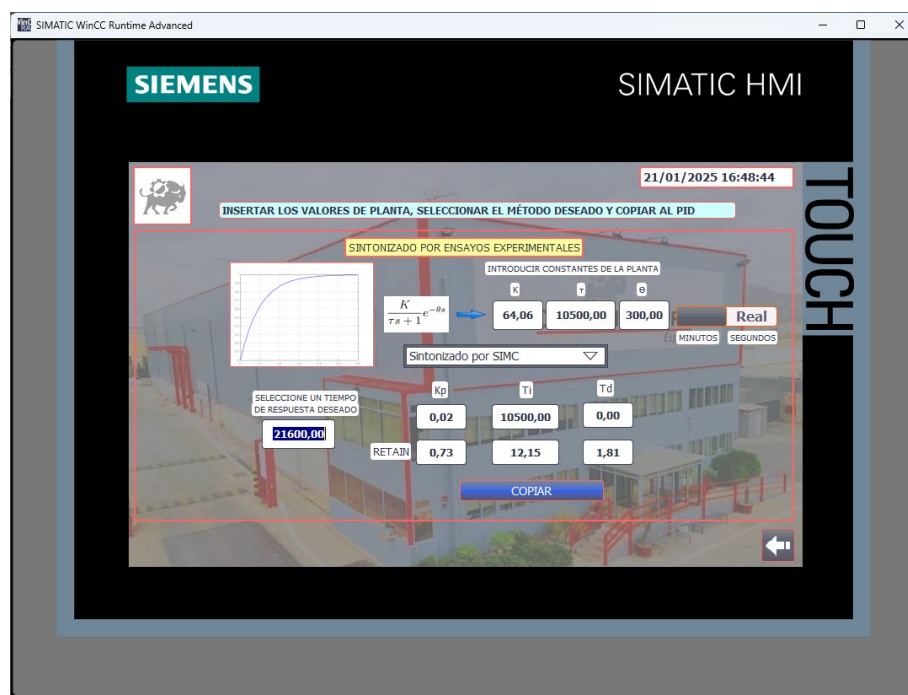


Figura 125. Imagen de Sintonizado de la pantalla HMI

La distribución de la imagen, como muestra la Figura 125, en la zona superior izquierda muestra como es la respuesta de una función de transferencia de primer grado con retardo y su ecuación característica, la zona superior derecha permite introducir los valores de la función de transferencia que se desee y si es para un **proceso real** o un **proceso simulado**. Por ultimo hay un selector para elegir un método de sintonización que modificará los parámetros del controlador PID si se pulsa el botón de copiar.

La metodología es la siguiente, como el horno de muestras es un sistema térmico con una función de transferencia de primer orden con retardo, si el horno es cambiado o se realiza otro ensayo por el cual se obtiene una función de transferencia diferente a la del Apartado 4, los datos obtenidos son introducidos en los valores de *Constantes de la planta*, posteriormente, hay que seleccionar uno de los tres métodos que hay disponibles, que son los siguientes:

- PI de Ziegler-Nichols: Para las operaciones del FB2 se utilizan las ecuaciones de la Tabla 9.
- PI de Cohen-Coon: Donde el FB2 realiza los cálculos con las ecuaciones de la Tabla 10.
- IMC de Skogestad: Con la peculiaridad que hay que introducir el tiempo de respuesta para obtener los valores mediante las ecuaciones de la Tabla 8.

Una vez seleccionado el método que se desee, los parámetros nuevos del controlador se mostrarán bajo sus iniciales, pero no serán transferidos al retain hasta que no se pulse *copiar*. Todas estas operaciones pueden ser visibles en el Video 18.

Video 18 - [*Imagen de Sintonizado de la pantalla HMI*](#)

10.6 CALENTAMIENTO AUTOMÁTICO

Otra imagen donde sólo es posible actuar con el usuario Admin porque el calentamiento automático del horno de muestras es muy importante porque puede afectar a la cerámica del crisol, de hecho, el fabricante recomienda dos acciones muy importantes:

- Calentamiento automático 1: Tras más de 72 horas apagado los valores de arranque están establecidos en 800 °C en 8 horas.
- Calentamiento automático 2: Tras la sustitución del crisol del horno el calentamiento debe realizarse hasta 850 °C en 24 horas.

Estos datos se pueden introducir directamente en el proceso de calentamiento automático desde los botones de *Carga 1* y *Carga 2*, ubicados en la esquina inferior izquierda, aunque manualmente el Admin puede modificar los valores de setpoint y duración de tiempo desde la gráfica de la izquierda.

Visualmente la imagen está separada en dos gráficas:

- Gráfica de la izquierda: Tiene la misión de representar la duración del calentamiento iluminando el valor de setpoint dividido en 14 tramos, es decir, cuando la temperatura del generador de rampa que controla el setpoint alcanza el valor superior del primer tramo, éste queda encendido y se ilumina el siguiente, así hasta que el proceso se termina.
- Gráfica de la derecha: Representación del setpoint y de la temperatura actual en tiempo real para comprobar la evolución del calentamiento.

Además, en la parte inferior derecha hay tres indicadores, uno con el setpoint actual, otro con la temperatura actual y el último para ver cuánto tiempo queda para que acabe el calentamiento automático.

En la Figura 126 se muestra una imagen de la pantalla HMI con el proceso de calentamiento automático activado.

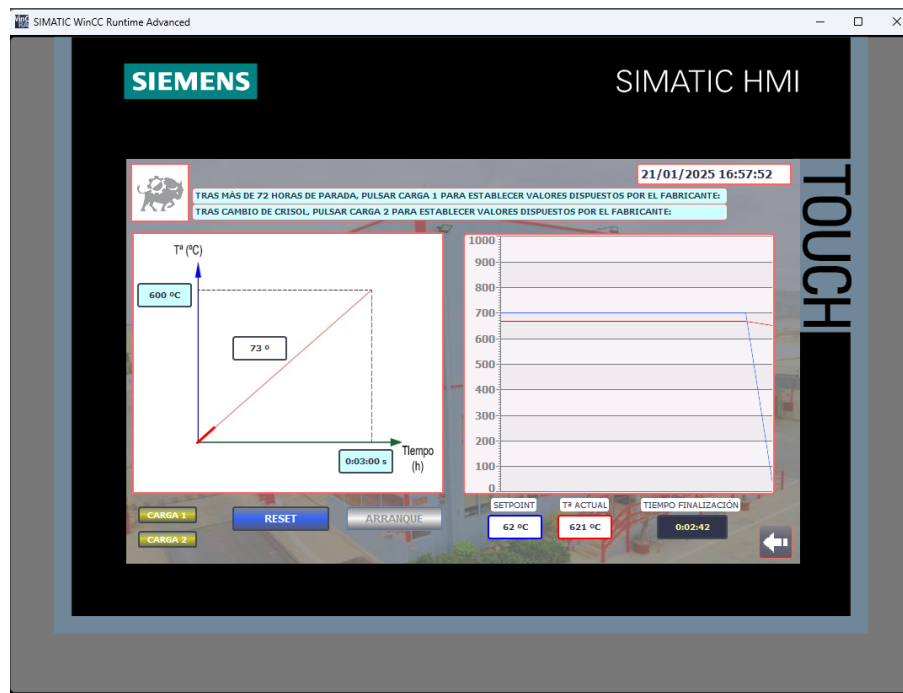


Figura 126. Imagen de Calentamiento Automático de la pantalla HMI

El proceso queda reflejado en el Video 19, cuando se cargan los datos de Carga 1 la pendiente es 2 porque el tiempo es de 8 horas de calentamiento, mientras que cuando son los datos de Carga 2 los que son introducidos al generador de rampa, la pendiente es de 1, posteriormente se introducen valores no reales de calentamiento para comprobar de forma rápida la evolución gráfica de la imagen, como son 400 °C de setpoint en un tiempo de 3 minutos. Todo esto es visible en el Video 19.

Video 19 - [Imagen Calentamiento Automático de la pantalla HMI](#)

10.7 VISOR DE AVISOS

Para este trabajo se han dispuesto cinco alarma como se indica en el DB10 visible en la Figura 91 que son las siguientes:

- Cuando la seta de emergencia es pulsada se activa esta alarma impidiendo la acción del controlador PID
- Temperatura alta es indicada si esta excede la programada como alta, en este caso 1200 °C.
- Fallo controlador PID se activa si el controlador marca que está en fallo, pero no indica que fallo es, por lo tanto, será necesario conectarse para comprobar que ocurre.
- Fallo proceso de calentamiento automático es igual que la alarma anterior, sólo se activa cuando el generador de rampa está en fallo.
- Si el setpoint que se introduce al controlador está fuera del rango establecido, se activa la alarma para la corrección de dicho error.

El estilo del visor de avisos puede verse en la Figura 127.

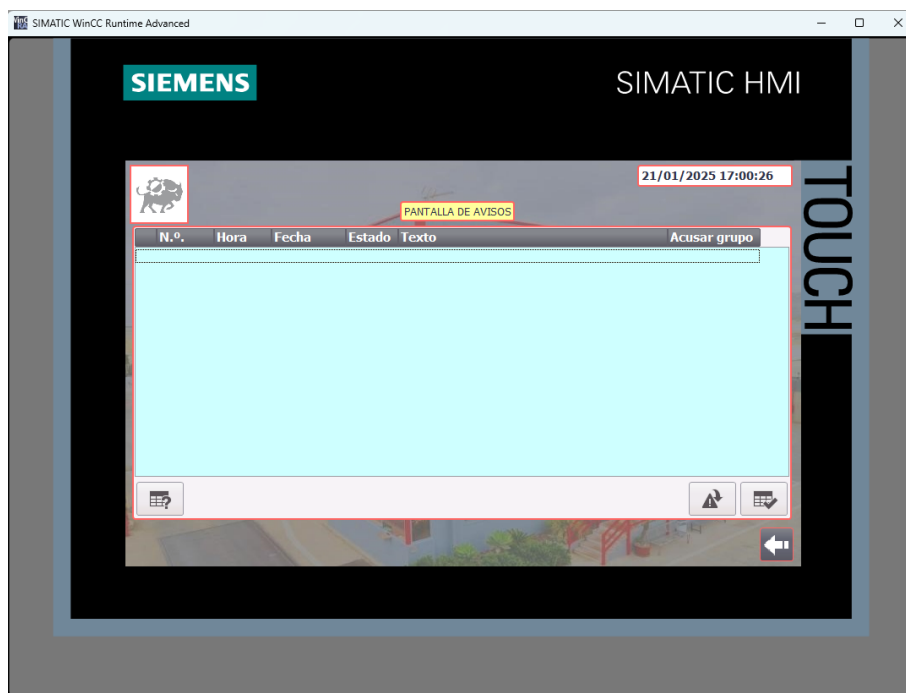


Figura 127. Imagen de Avisos de la pantalla HMI

En el Video 20 se muestran los errores cuando se pulsa la seta, cuando el setpoint está fuera de rango, los que aparecería si existe un fallo en el controlador o en el generador de rampa y el fallo por temperatura alta.

Video 20 - [Imagen de Visor de Avisos de la pantalla HMI](#)



11 PROPOSICIÓN DE MEJORAS FUTURAS

El objetivo principal del horno de muestras es obtener una composición química representativa de la muestra del camión descargado, lo que permitirá utilizar ese material en la fabricación de aleaciones sin el riesgo de obtener valores fuera de los rangos establecidos para cada aleación.

Adicionalmente existe otra línea de trabajo relacionada con el horno de muestra que consiste en determinar el rendimiento del material descargado mediante un balance de masas. Es decir, el peso de la muestra introducida al horno tiene que ser igual al peso del caldo producido, más las escorias y los volátiles que liberan por la aspiración Ecuación 70 . Al calcular el cociente entre el peso del caldo y el peso de la muestra se obtiene el rendimiento del material, el cual debe coincidir aproximadamente con el indicado por proveedor de la materia prima descargada Ecuación 71, si se detecta una diferencia considerable y el rendimiento es inferior al esperado se puede renegociar el precio del camión, por esta razón, este proceso es determinante para la gerencia de la empresa.

Actualmente, para realizar esta función el operario encargado del horno de muestras debe mover manualmente los cubos que tienen el caldo y las escorias, llevándolos a una báscula, existiendo un riesgo de caída al mismo nivel con material muy caliente en las manos.

Por mitigar ese riesgo y a modo de mejora futura, se podría instalar una báscula en el punto de descarga de la boca del horno, la cual pesaría automáticamente los cubos desde la pantalla del HMI, manipulando los cubos a una estructura lateral reduciendo considerablemente el riesgo. El PLC calcularía automáticamente los volátiles y el rendimiento del material, incluso enviar los datos directamente a gerencia para que actúe en caso de ser necesario.

$$P_{muestra} = P_{caldo} + P_{escorias} + Volátiles \quad \text{Ecuación 70}$$

$$Rendimiento = \frac{P_{caldo}}{P_{muestra}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 71}$$

12 BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. E. Suess and H. C. Urey, "Abundances of the Elements," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 28, no. 1, pp. 53–74, Jan. 1956, doi: 10.1103/RevModPhys.28.53.
- [2] J. R. Turpial, "Proceso Bayer," *Minerales del aluminio*. Accessed: Jan. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.academia.edu/33816967/Proceso_Bayer
- [3] International Aluminium Institute, "Alumina Production." Accessed: Feb. 09, 2024. [Online]. Available: <https://international-aluminium.org/>
- [4] "Proceso Hall-Heroult." Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: https://www.quimica.es/enciclopedia/Proceso_Hall-Heroult.html
- [5] Asociación Española del Aluminio y Tratamiento de Superficies, "Aluminio, propiedades y ventajas." Accessed: Dec. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.asoc-aluminio.es/el-aluminio>
- [6] U.S. Geological Survey, "Mineral commodity summaries 2024," Reston, VA, 2024. doi: 10.3133/mcs2024.
- [7] M. Esteban, *Electroquímica y medio ambiente en el umbral del siglo XXI*. La Coruña, 1995.
- [8] J. Aleksic and D. Boero, "La demanda de Al crecerá un 40% hasta 2030 ¿Como fabricarlo de manera sostenible?," *Foro Económico Mundial*. Accessed: Dec. 30, 2024. [Online]. Available: <https://es.weforum.org/stories/2023/12/la-demanda-de-aluminio-aumentara-un-40-de-aqui-a-2030-como-hacerlo-sostenible/>
- [9] F. J. Gil *et al.*, *Aleaciones ligeras*, Primera. Barcelona: Barcelona Digital S.L., 2001.
- [10] T. Lewis and P. Pollack, *American National Standard Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum*. U.S.A., 2009, p. 13.
- [11] "Aluminio, un material «limpio»." Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://promei.com/aluminio-un-material-limpio/>
- [12] A. Martínez, "Identificación experimental de sistemas," 2011, *Universidad de Alicante*. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10045/18965>
- [13] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, 5^{o.}, vol. 16, no. 1. Madrid: Pearson Educación S.L., 2022.
- [14] S. Castaño, "Sistemas de primer orden control." Accessed: Jan. 07, 2025. [Online]. Available: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/sistemas-dinamicos-de-primer-orden/>
- [15] F. H. Pereira Silva, "On/Off Control Versus PID Control: A Comparative Case Study On Condensers of Cooling Systems," in *Proceedings of The 4th International Conference on Advanced Research in Applied Science and Engineering*, Brussels: GLOBALKS, Sep. 2022, p. 12. doi: 10.33422/4th.raseconf.2022.09.48.
- [16] F. Cubides, M. Jeimy, and L. A. Noguera, "Análisis de eficiencia energética utilizando control on-off y PID en una resistencia calefactora," *Tecnura*, vol. 17, pp. 48–59, 2013, doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.7222>.
- [17] B. Kuo, *Sistemas de Control Automático*. Naucapal de Juárez: Prentice-Hall Hispanoamericana S. L., 1996.
- [18] ElProCus, "Controlador PID." Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.theengineeringconcepts.com/pid-controller/>
- [19] A. Sala, "Diseño de PID por metodología IMC," 2019, *Universidad Politécnica de Valencia*. [Online]. Available: <https://personales.upv.es/asala/YT/V/imcpid.html>
- [20] S. Skogestad, "Tuning for Smooth PID Control with Acceptable Disturbance Rejection," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 45, no. 23, pp. 7817–7822, Nov. 2006, doi: 10.1021/ie0602815.
- [21] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," *J. Fluids Eng.*, vol. 64, no. 8, pp. 759–765, Nov. 1942, doi: 10.1115/1.4019264.
- [22] G. H. Cohen and G. A. Coon, "Theoretical Consideration of Retarded Control," *J. Fluids Eng.*, vol. 75, no. 5, pp. 827–834, Jul. 1953, doi: 10.1115/1.4015451.



- [23] Greenenergy Refractory & Insulation Material Co. Ltd., "Principales factores que afectan la vida útil del revestimiento de ladrillos refractarios del horno rotatorio de cemento." Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.greenenergyrefractarios.com/info/analysis-of-main-factors-affecting-the-service-50421173.html>
- [24] E. Mandado, J. Marcos, C. Fernandez, and J. Armesto, *Autómatas programables y sistemas de automatización*, 2ª. Barcelona: Marcombo, 2009.
- [25] J. C. Castillo, "Iniciación a la programación en SCL." Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: <https://reea-blog.blogspot.com/2013/05/perdiendo-el-miedo-al-scl-i.html>
- [26] Siemens, "Data Sheet CPU 1512," 2024.
- [27] Siemens, "Simatic HMI 700 Comfort," 2024. [Online]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/WW/Catalog/Product/6AV2124-0GC01-0AX0>
- [28] nVent, "Armarios murales de chapa de acero," 2024.
- [29] Wika, "Modelo TC10-H," 2021. [Online]. Available: https://www.wika.com/es-es/tc10_h.WIKA
- [30] CD Automation S.r.L., "REVO RSS," 2023, *Legnano (MI) - Italia*.



13 ANEXO 1

PLC_Horno_v2 / PLC_1 [CPU 1512C-1 PN] / Bloques de programa

PID [OB30]

PID Propiedades

General

Nombre	PID	Número	30	Tipo	OB
Idioma	KOP	Numeración	Automático		

Información

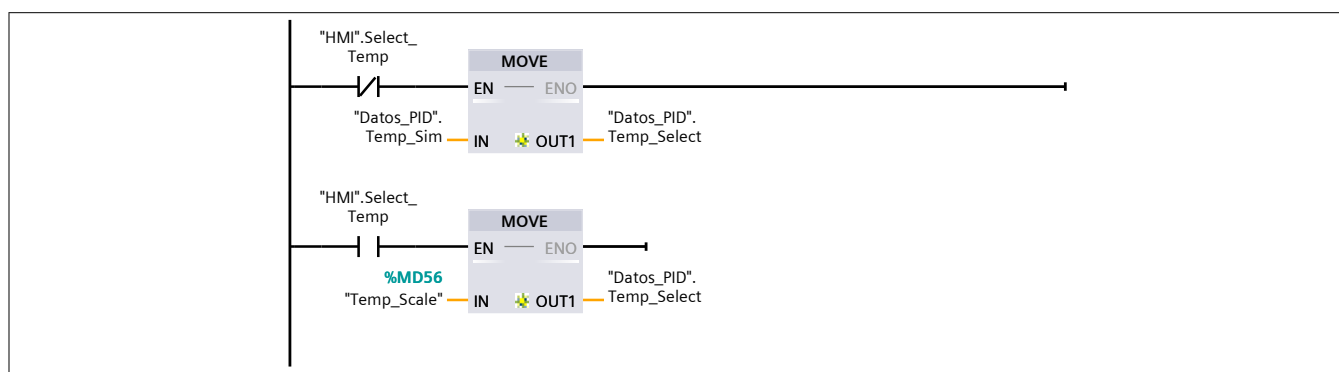
Título	BLOQUE PID Y PROGRAMA DE SIMULACIÓN	Autor		Comentario	Este bloque de organización contiene el bloque PID que regula la temperatura del horno de muestras mediante el "proceso real" y el programa que permite realizar el "proceso simulado", la selección de un modo u otro puede realizarse mediante la pantalla HMI
Familia		Versión	0.1	ID personalizado	

PID

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario
▼ Input			
Initial_Call	Bool		Initial call of this OB
Event_Count	Int		Events discarded
Temp			
Constant			

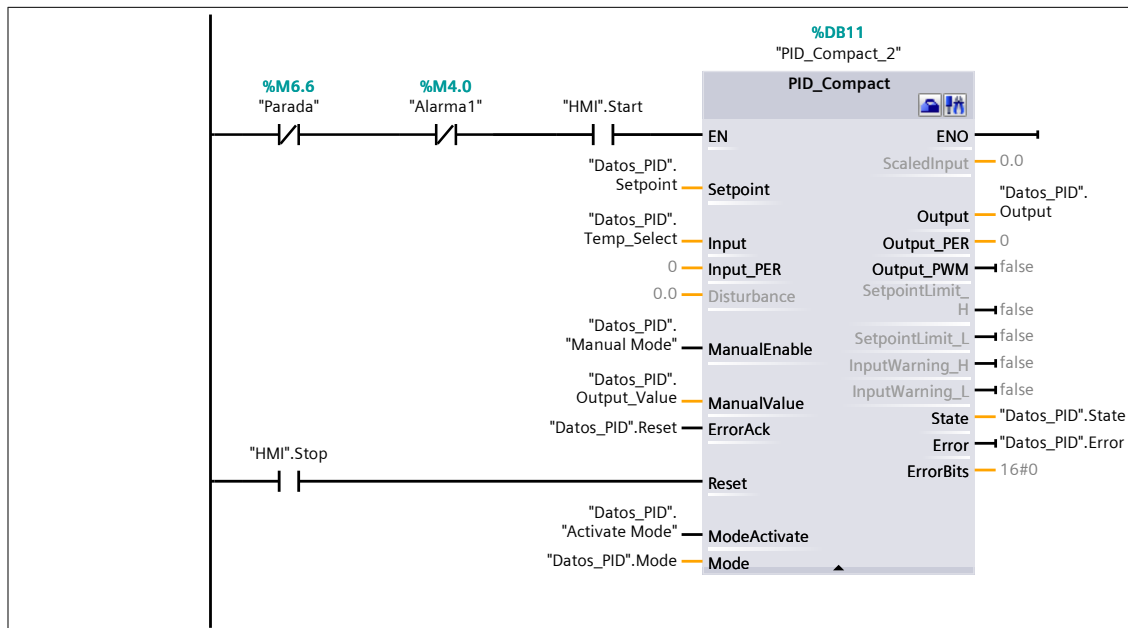
Segmento 1: SELECTOR DEL MODO DE TRABAJO

Por defecto el bloque de organización trabaja en el modo de simulación, pero esto puede ser cambiado al modo "proceso real" y realizar la lectura desde el termopar del horno de muestras



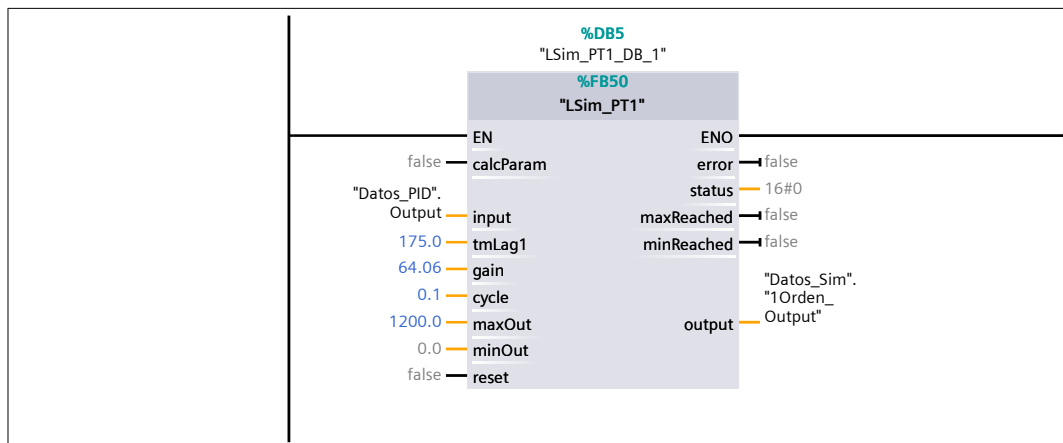
Segmento 2: BLOQUE DE INTERRUPCIÓN CICLICA

Objeto tecnológico PID_Compact versión 2, contiene un DB1 con las variables internas del PID, un DB2 con las salidas y entradas del PID y accionamiento y paro desde la pantalla HMI.



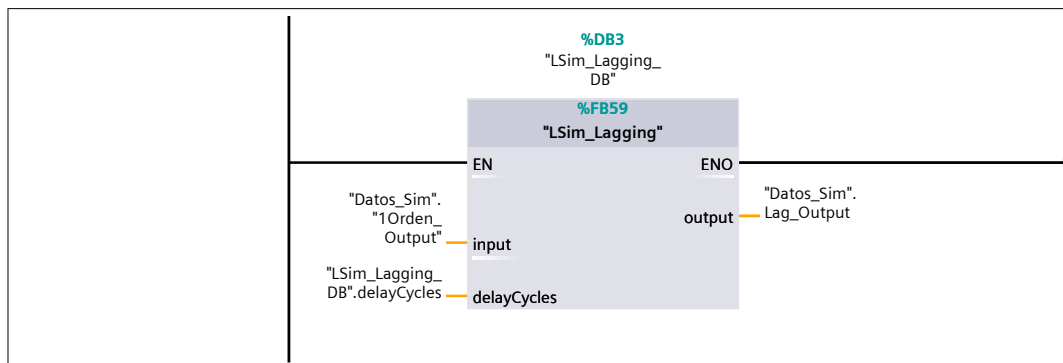
Segmento 3: BLOQUE LSim_PT1

Bloque que crea una función de transferencia de primer orden.



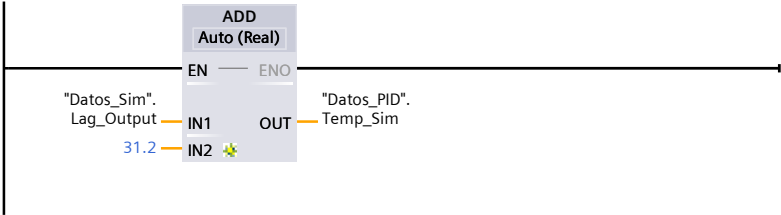
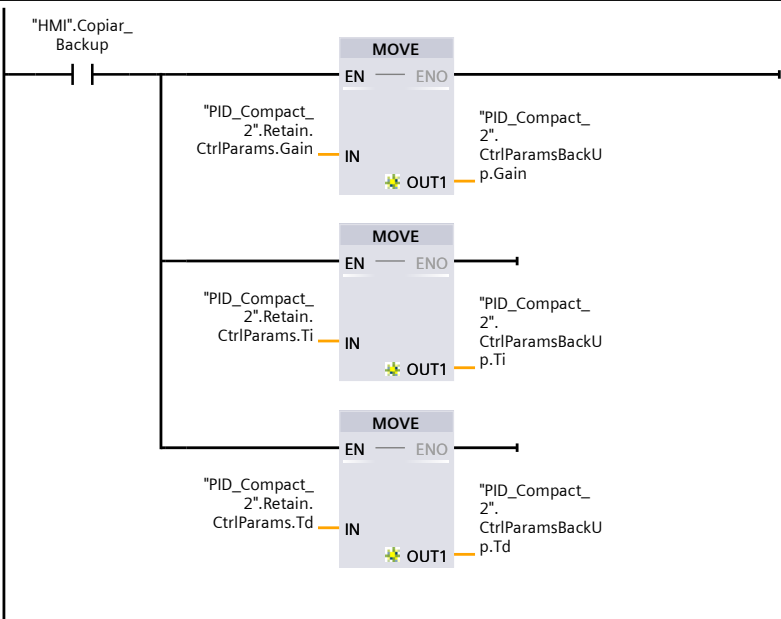
Segmento 4: BLOQUE LSim_Lagging

Añade el retardo que tiene la función de transferencia del sistema.



Segmento 5: BLOQUE ADD

Al valor de la temperatura simulada se le añade la temperatura ambiente y se vuelve a la entrada del controlador del PID

Totally Integrated Automation Portal		
		
Segmento 6: GUARDAR PARÁMETROS DEL PID Cuando desde la pantalla HMI se pulsa el botón BACKUP cuando acaba la optimización inicial o la optimización fina, copia los valores calculados por el software de Siemens y modificados en la configuración interna del PID Retain a los parámetros del PID Backup		
		

PLC_Horno_v2 / PLC_1 [CPU 1512C-1 PN] / Bloques de programa

Main [OB1]

Main Propiedades

General

Nombre	Main	Número	1	Tipo	OB
Idioma	KOP	Numeración	Automático		

Información

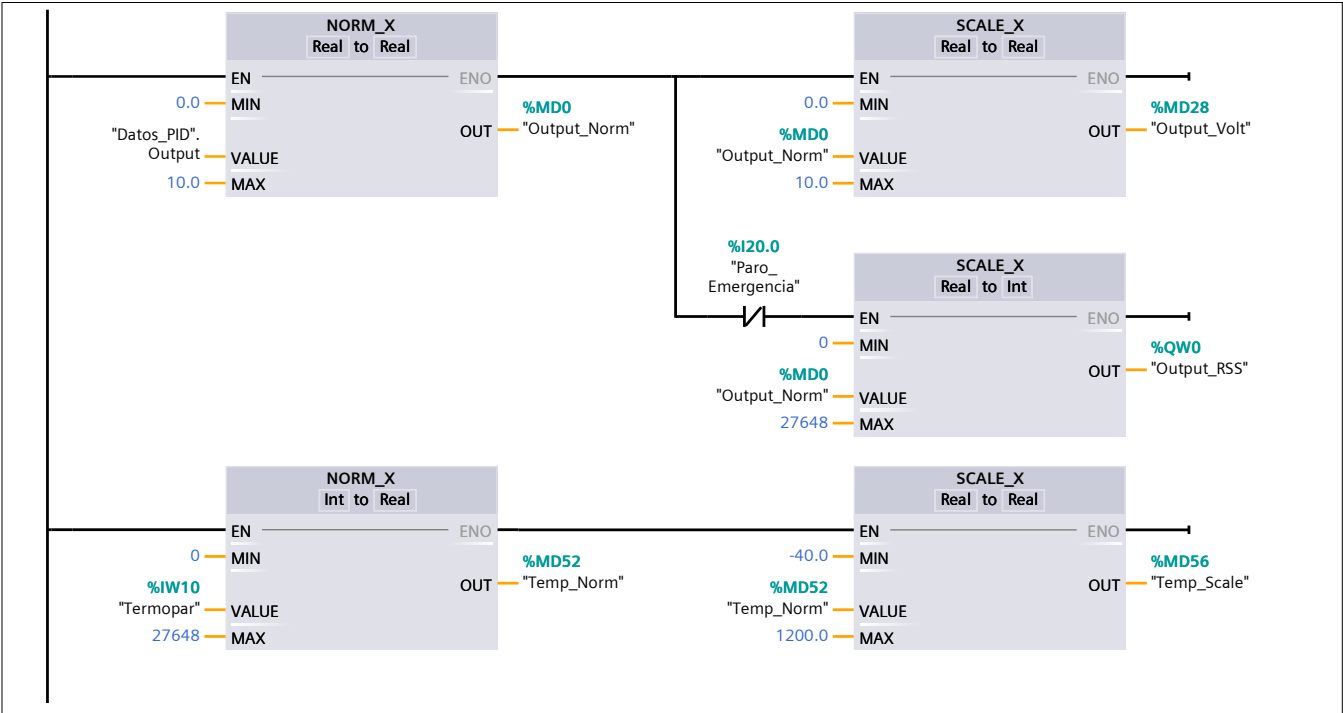
Título	PROGRAMA PRINCIPAL	Autor		Comentario	El programa agrupa las principales funciones para el control del horno de muestra y las llamadas a los bloques de función correspondientes.
Familia		Versión	0.1	ID personalizado	

Main

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario
▼ Input			
Initial_Call	Bool		Initial call of this OB
Remanence	Bool		=True, if remanent data are available
Temp			
Constant			

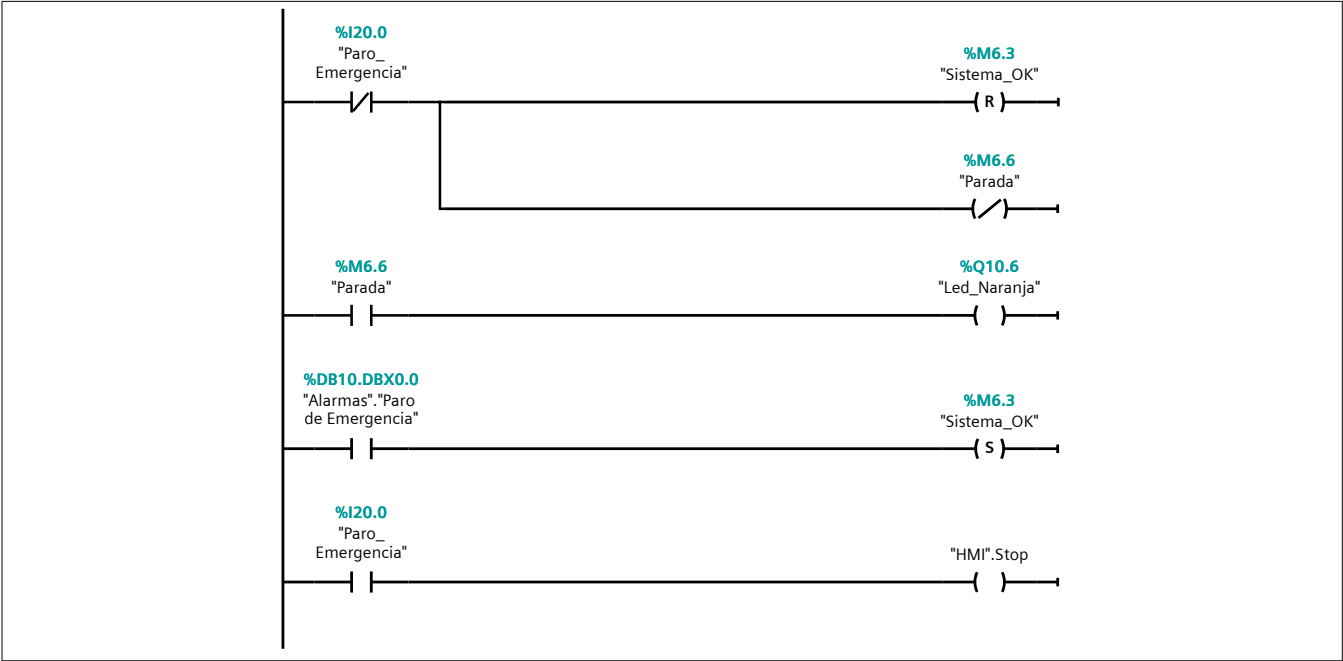
Segmento 1: ESCALADO DE SEÑALES ANALÓGICAS

Normalizado y escalado de la salida analógica en tensión de 0 a10v Output_RSS que alimenta al rele en estado sólido, esta salida se corta inmediatamente si la seta de emergencia es pulsada y a una señal Ouput_Volt para la representación gráfica del valor de voltaje en la pantall aHMI. Además, también se produce el normalizado y escalado de la otra señal analógica, en este caso una entrada que representa la temperatura del termopar tipo K instalado en la parte inferior del horno.



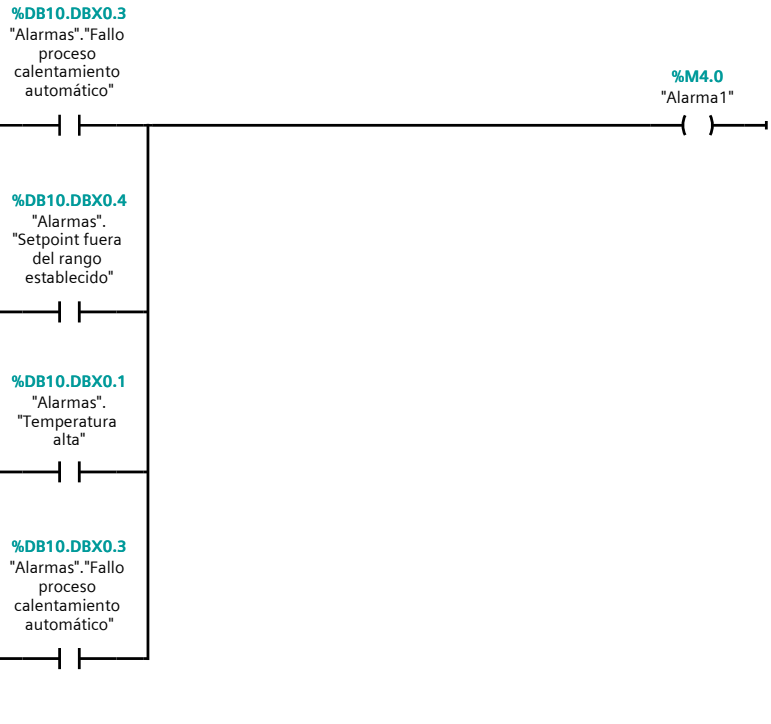
Segmento 2: PARO DE EMERGENCIA

En caso de pulsar la seta de emergencia, se enciende el indicador del panel naranja y se corta el proceso de calentamiento, se para el control pid y se envía un 0 a la salida analógica como se ha comentado anteriormente, volviendo a rearmar la seta no es suficiente para que el sistema vuelva a calentar en horno, es necesario un rearme manual desde la imagen de avisos de la pantalla HMI, una vez todo esto sea realizado el PID comenzará a calentar de nuevo el horno.



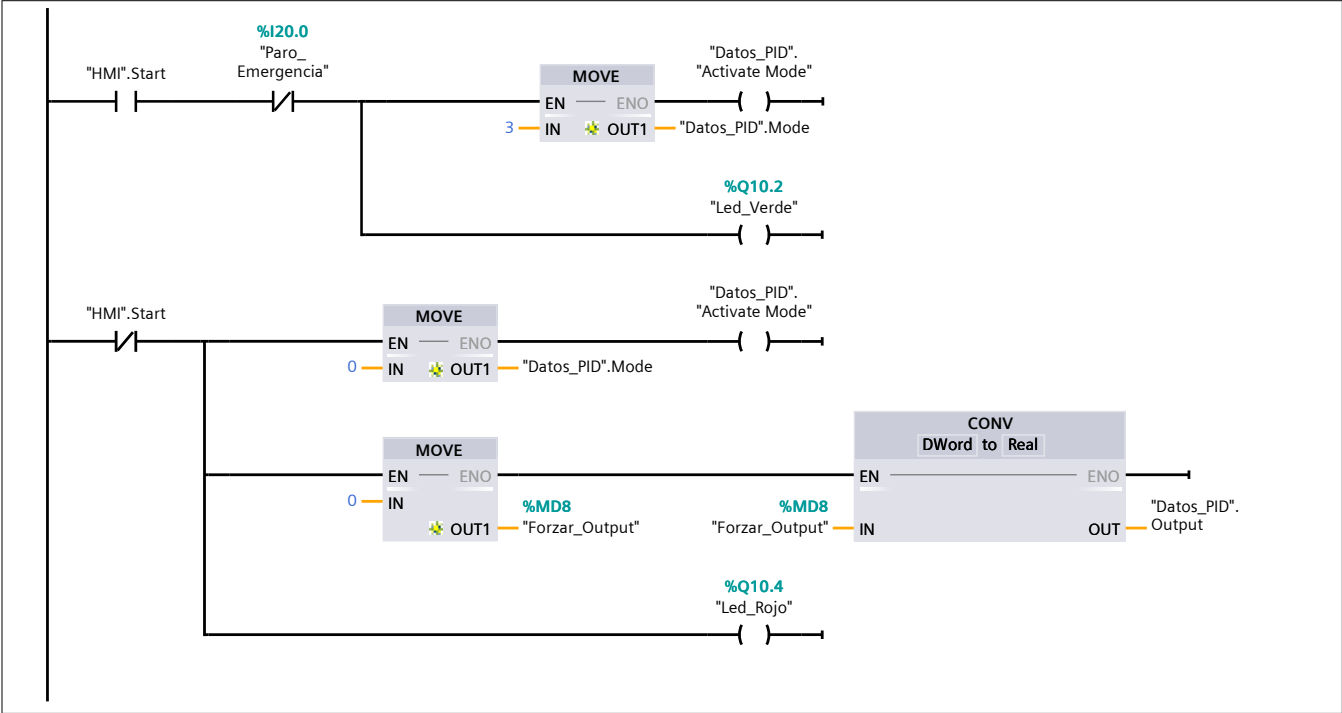
Segmento 3: ALARMAS

Condiciones de activación de las alarmas registradas en el bloque de datos. Indicaciones en la descripción del DB correspondiente.



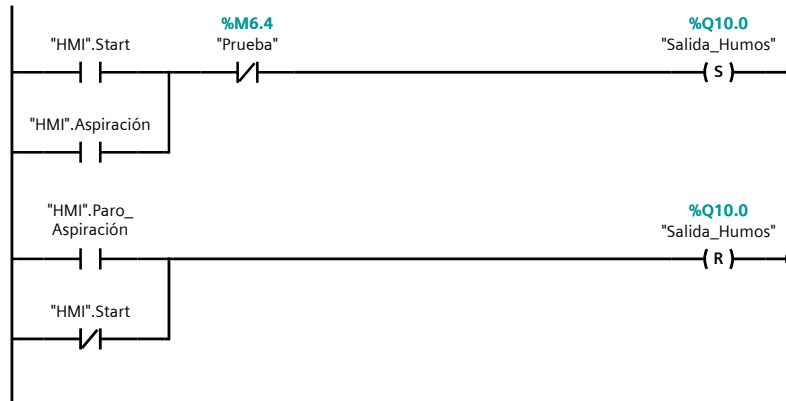
Segmento 5: CAMBIO DE MODO CON LA MARCHA PARO DEL PID

Cuando se activa desde el HMI el botón de START, se pone el modo del PID a 3, es decir, en automático y se activa, para el STOP del HMI, se pone a 0 el modo del PID y se fuerza la salida del PID a 0. Ademñas, se activan tanto la señal luminosa verde cuando el PID arranca o roja si el botón de STOP es pulsado.



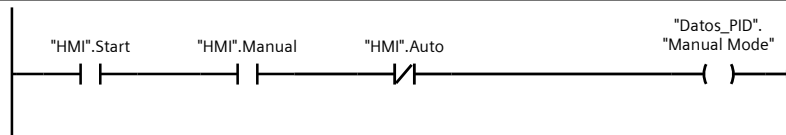
Segmento 6: ACCIONAMIENTO ELECTROVÁLVULA ASPIRACIÓN DE GASES

Cuando arranca el horno se abre una electroválvula para que el sistema de aspiración se lleve los gases emitidos por el horno, esta operación también puede realizarse de forma manual.



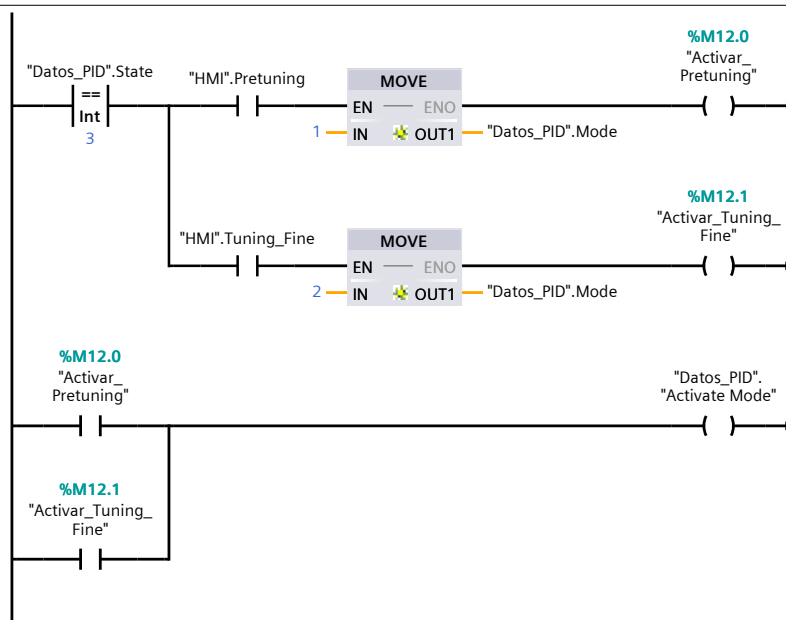
Segmento 7: FORZAR LA SALIDA A MANUAL

Mediante el botón de Manual de la imagen PID Experto del HMI se activa la entrada Manual Mode del PID que permite introducir en porcentaje la salida deseada. Una vez la necesidad de la entrada manual acabe, basta con pasar a automático el PID para que arranque con las condiciones guardadas.



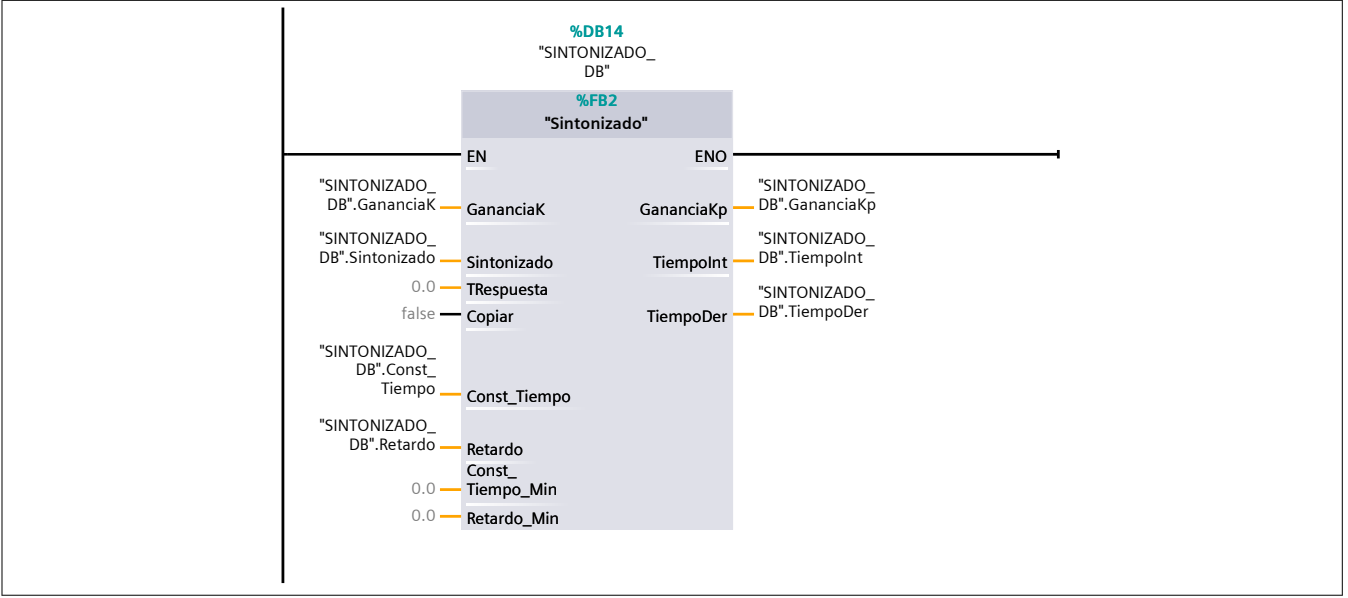
Segmento 8: SELECCIÓN DE PRETUNING Y TUNING FINE

Desde la pantalla HMI puede activarse tanto el ajuste inicial como el ajuste fino, para ello se modificará el número del modo del PID con cada botón y se activará automáticamente. Durante el proceso el progreso será indicado en pantalla, pudiendo cargar los valores resultantes en el backup del PID.



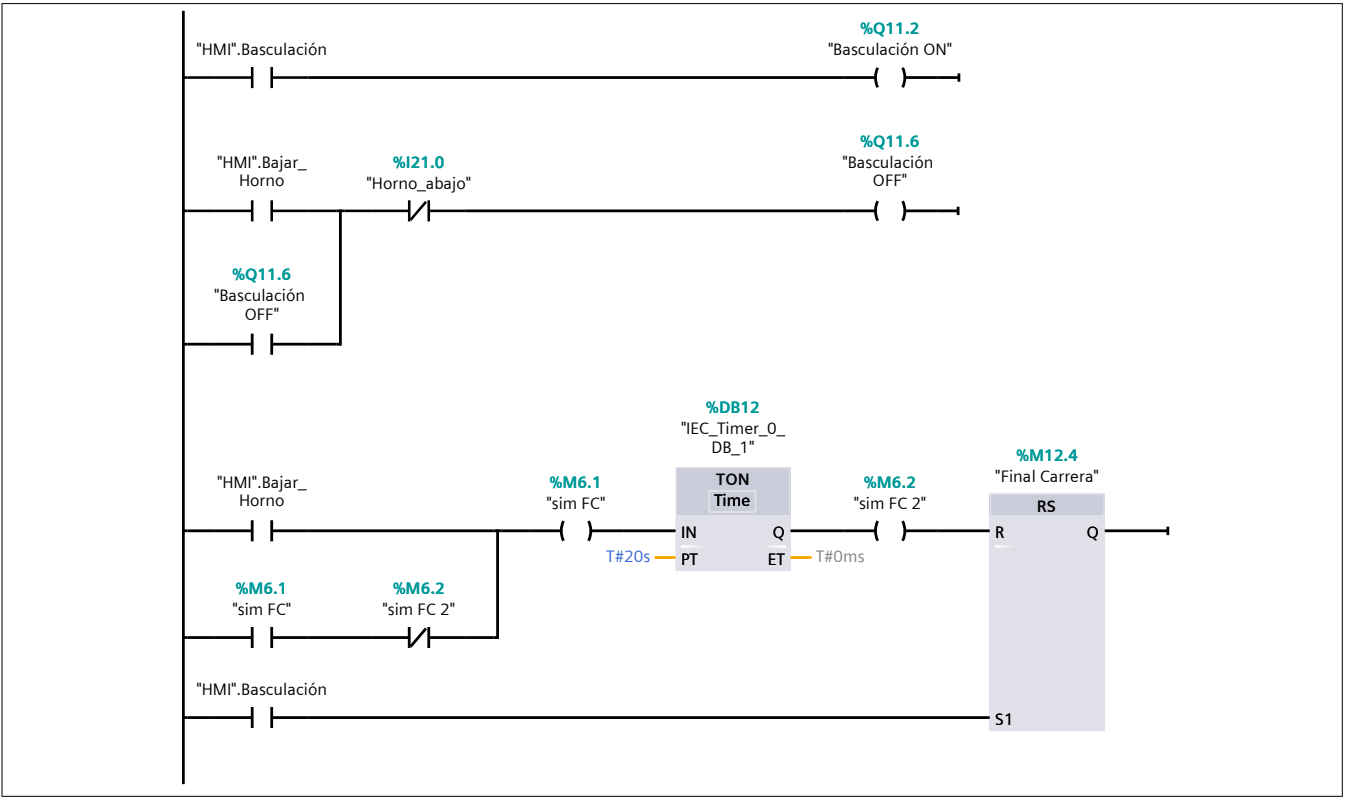
Segmento 9: BLOQUE DE FUNCIÓN SINTONIZADO

En este bloque de función se recogen todas las operaciones aritméticas necesarias para el cálculo de los parámetros del PID según el método de sintonizado elegido.



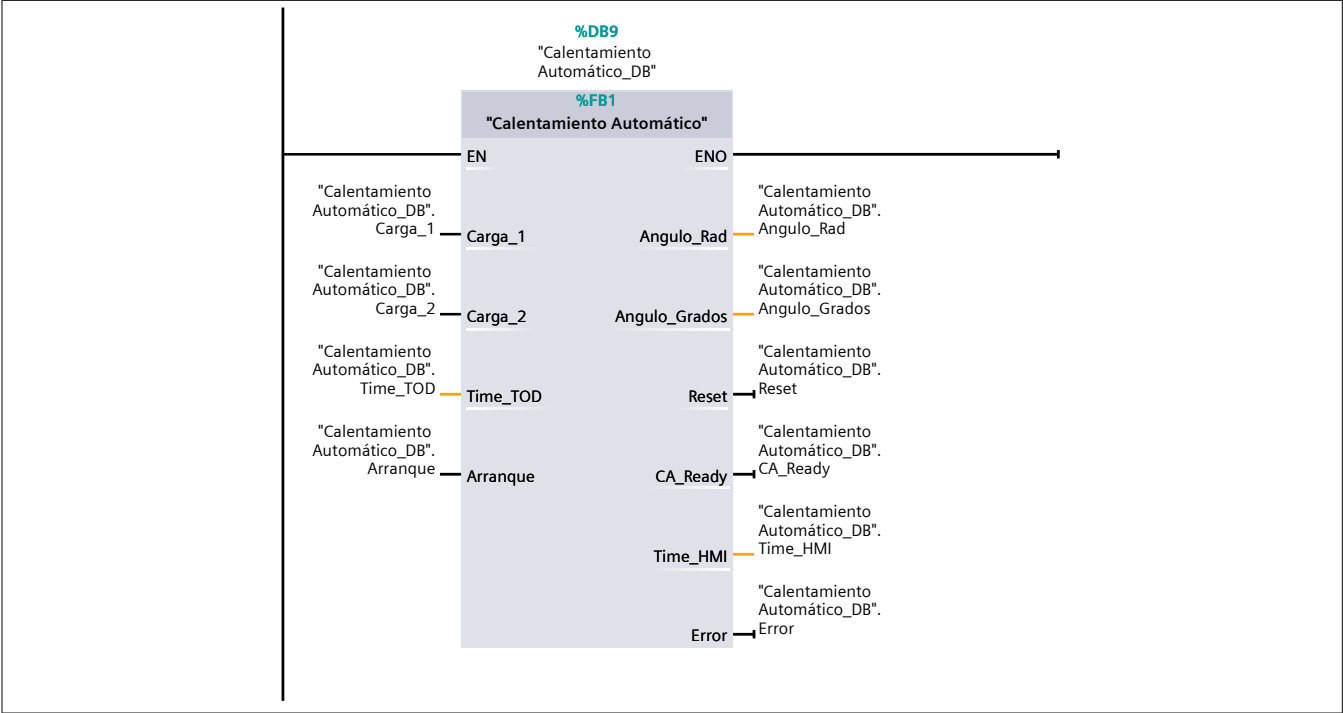
Segmento 10: ACTIVACIÓN DE LA ELECTROVÁLVULA HIDRÁULICA

Mediante la pantalla HMII se activa la basculación del horno de muestras, mientras la pulsación es activa el horno bascula, si se para de pulsar, este mantiene la posición, mediante un una pulsación el horno recupera la posición inicial poco a poco mientras libera aceite hasta que es detectado por el final de carrera que indica horno abajo.



Segmento 11: Bloque de función de calentamiento automático

En el bloque de función se recogen todas las operaciones necesarias para realizar el calentamiento automático



PLC_Horno_v2 / PLC_1 [CPU 1512C-1 PN] / Bloques de programa

Calentamiento Automático [FB1]

Calentamiento Automático Propiedades

General

Nombre	Calentamiento Automático	Número	1	Tipo	FB
Idioma	KOP	Numeración	Automático		

Información

Título	CALENTAMIENTO AUTOMÁTICO	Autor		Comentario	Este bloque de función contiene todas las instrucciones necesarias para el ajuste de la rampa de calentamiento
Familia		Versión	0.1	ID personalizado	

Calentamiento Automático

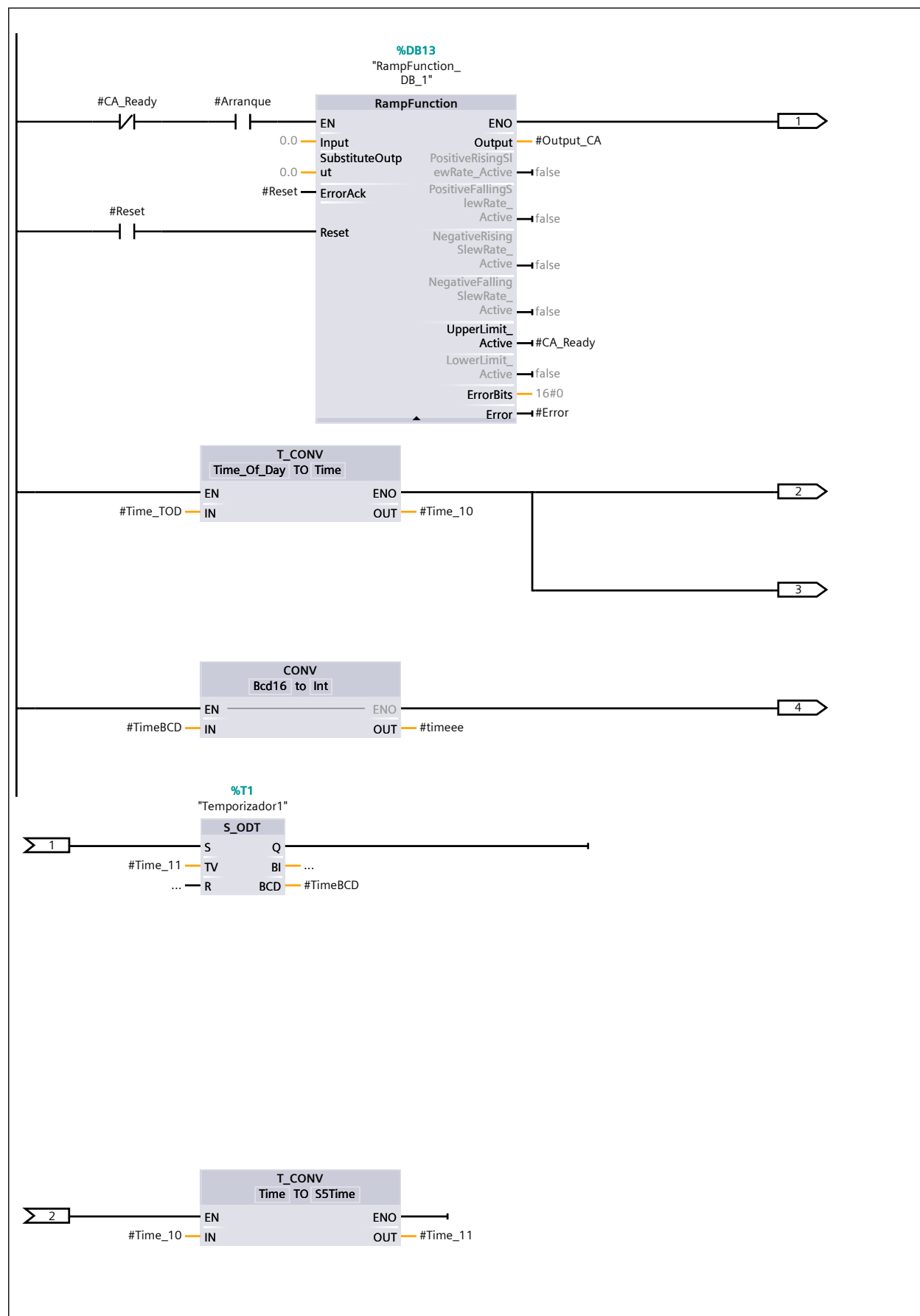
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Input									
Carga_1	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Carga_2	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
▼ Output									
Angulo_Rad	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Angulo_Grados	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Reset	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
CA_Ready	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Time_HMI	Time_Of_Day	TOD#00:00:00	No remanente	True	True	True	False		
Error	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
▼ InOut									
Time_TOD	Time_Of_Day	TOD#00:00:00	No remanente	True	True	True	False		
Arranque	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
▼ Static									
Output_CA	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Tiempo_Real	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		

Totally Integrated Automation Portal									
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
TimeBCD	Word	16#0	No remanente	True	True	True	False		
Time_10	Time	T#0ms	No remanente	True	True	True	False		
Time_11	S5Time	S5T#0ms	No remanente	True	True	True	False		
Time_12	DInt	0	No remanente	True	True	True	False		
Time_13	DInt	0	No remanente	True	True	True	False		
Time_14	Time	T#0ms	No remanente	True	True	True	False		
Todo_Visible	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
▼ Visible	Array[0..16] of Bool		No remanente	True	True	True	False		
Visible[0]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[1]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[2]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[3]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[4]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[5]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[6]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[7]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[8]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[9]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[10]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[11]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[12]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[13]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[14]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Visible[15]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		

Totally Integrated Automation Portal									
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Visible[16]	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
ResetVisible17	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
▼ StructLimite	Struct		No remanente	True	True	True	False		
Limite1	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite2	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite3	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite4	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite5	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite6	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite7	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite8	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite9	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite10	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite11	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite12	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite13	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite14	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite15	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite16	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Limite17	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Finalización	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
▼ Temp									
Time1	Time								
Time2	S5Time								
timeeee	Int								
Constant									

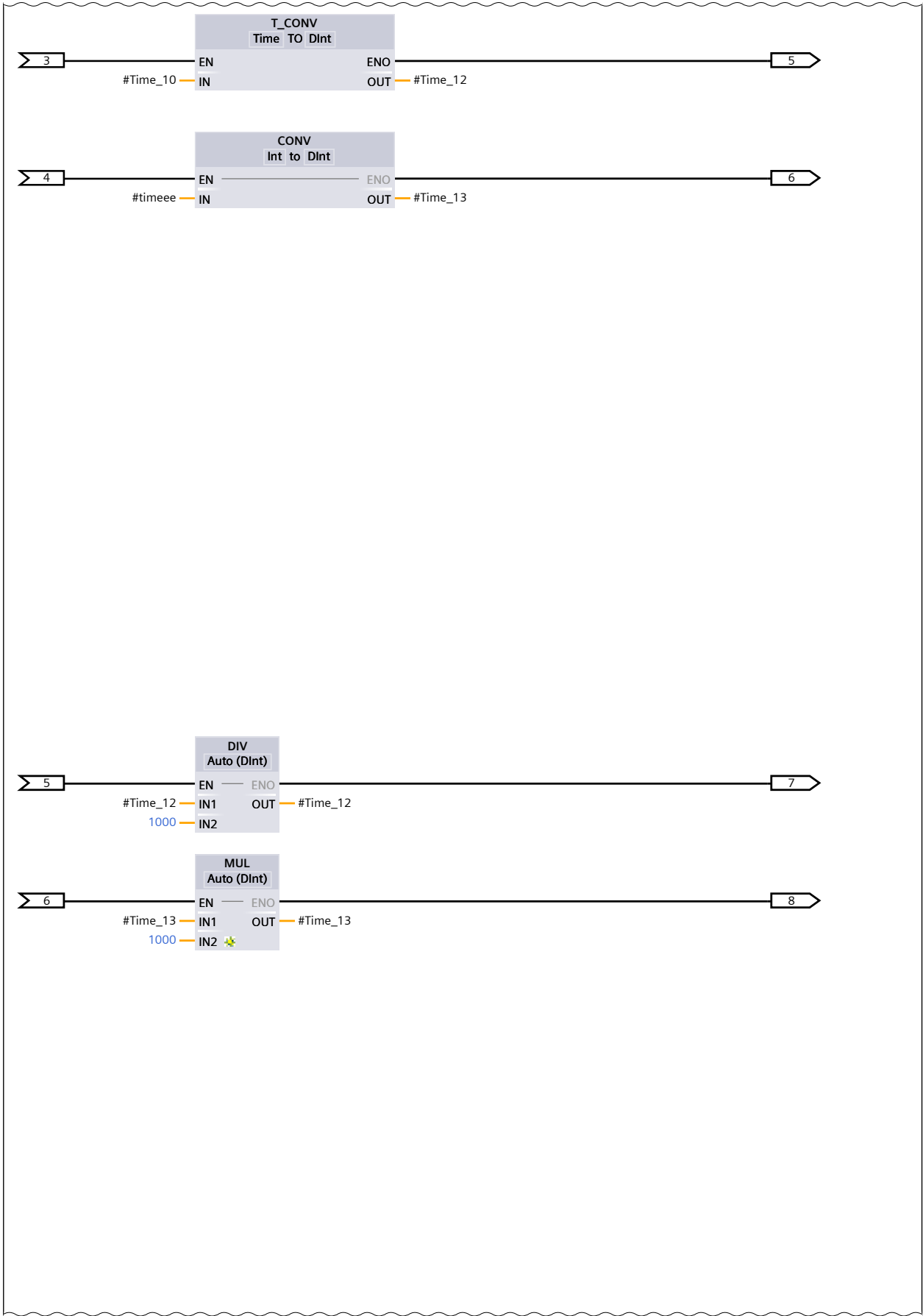
Totally Integrated Automation Portal		
Segmento 1: Función rampa y conversión de tiempos La función rampa incrementa el valor de setpoint según la pendiente de la recta establecida entre la temperatura final y el tiempo de duración. La primera conversión es necesaria para convertir la variable del tiempo de calentamiento en ToD en el temporizador y convertirlo en real para poder calcular con el la rampa necesaria, esta operación está en el segmento 2. La segunda conversión es para mostrar en pantalla el tiempo que queda para terminar el proceso, para ello hay que pasar de BCD a ToD		

Segmento 1: Función rampa y conversión de tiempos (1.1 / 3.1)



Segmento 1: Función rampa y conversión de tiempos (2.1 / 3.1)

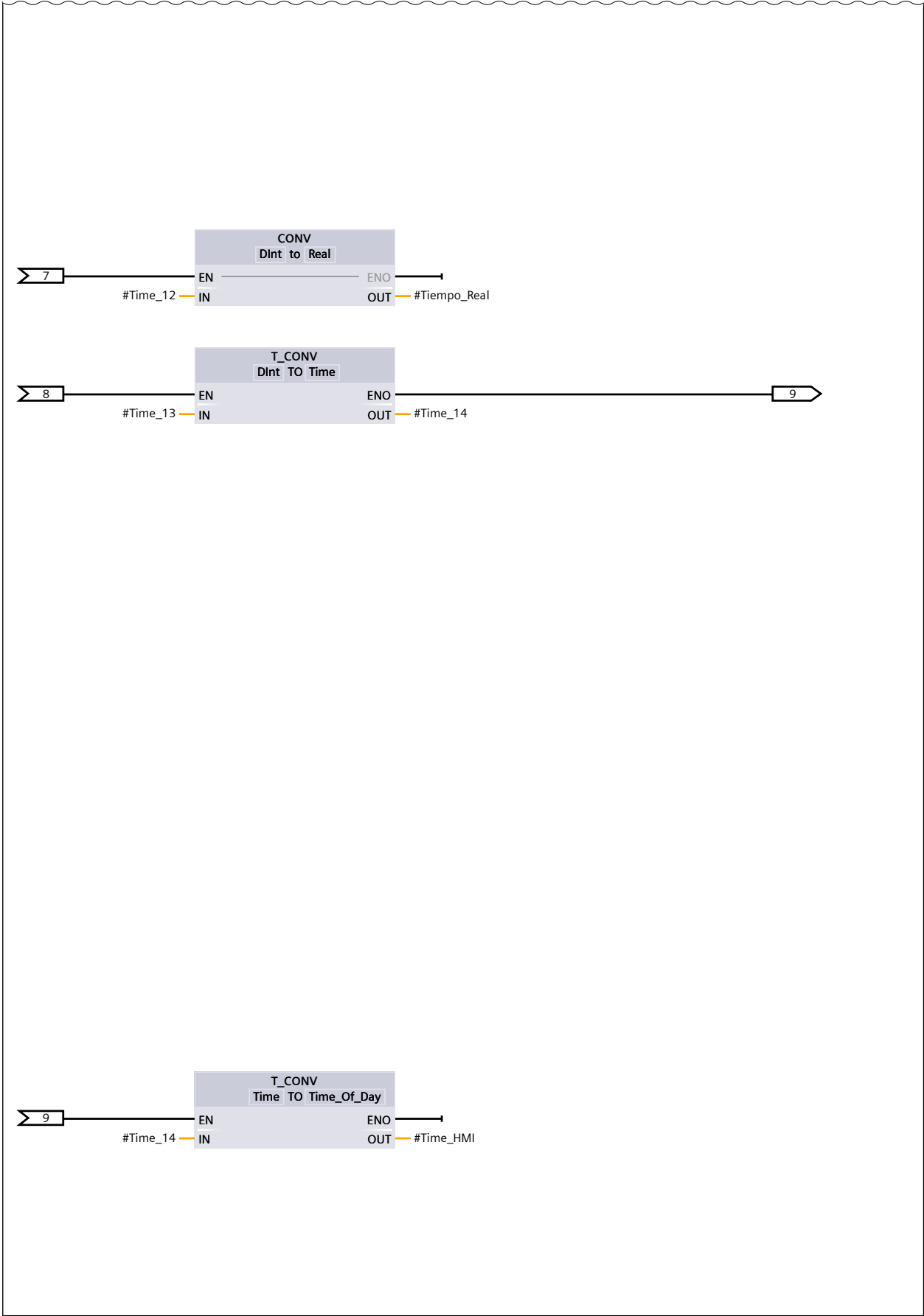
1.1 (Página1 - 5)



3.1 (Página1 - 7)

Segmento 1: Función rampa y conversión de tiempos (3.1 / 3.1)

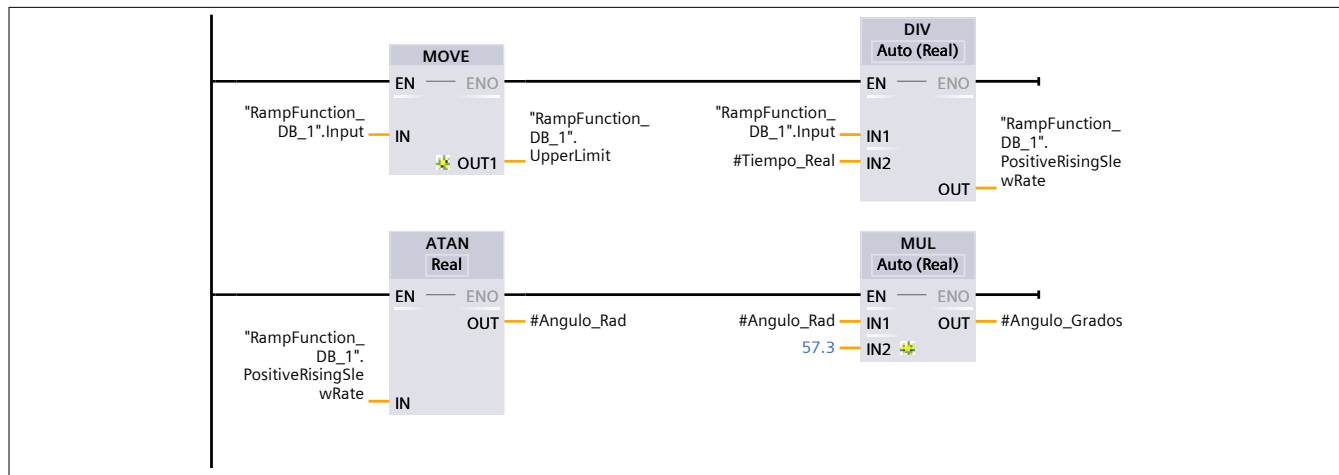
2.1 (Página1 - 6)



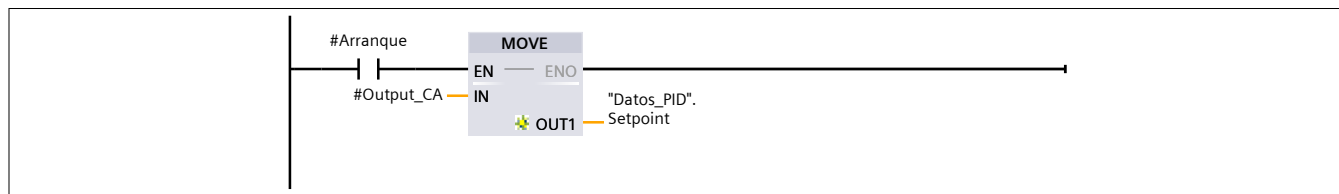
Segmento 2: CALCULO DE LA PENDIENTE

Lo primero que hace es introducir el valor final del setpoint en la variable que avisa que ha alcanzado dicha temperatura, posteriormente, divide la temperatura objetivo entre el tiempo establecido para calcular la pendiente de la rampa que ejecutará la función rampa.

Posteriormente, la pendiente es calculada en grados para mostrarse en la pantalla HMI

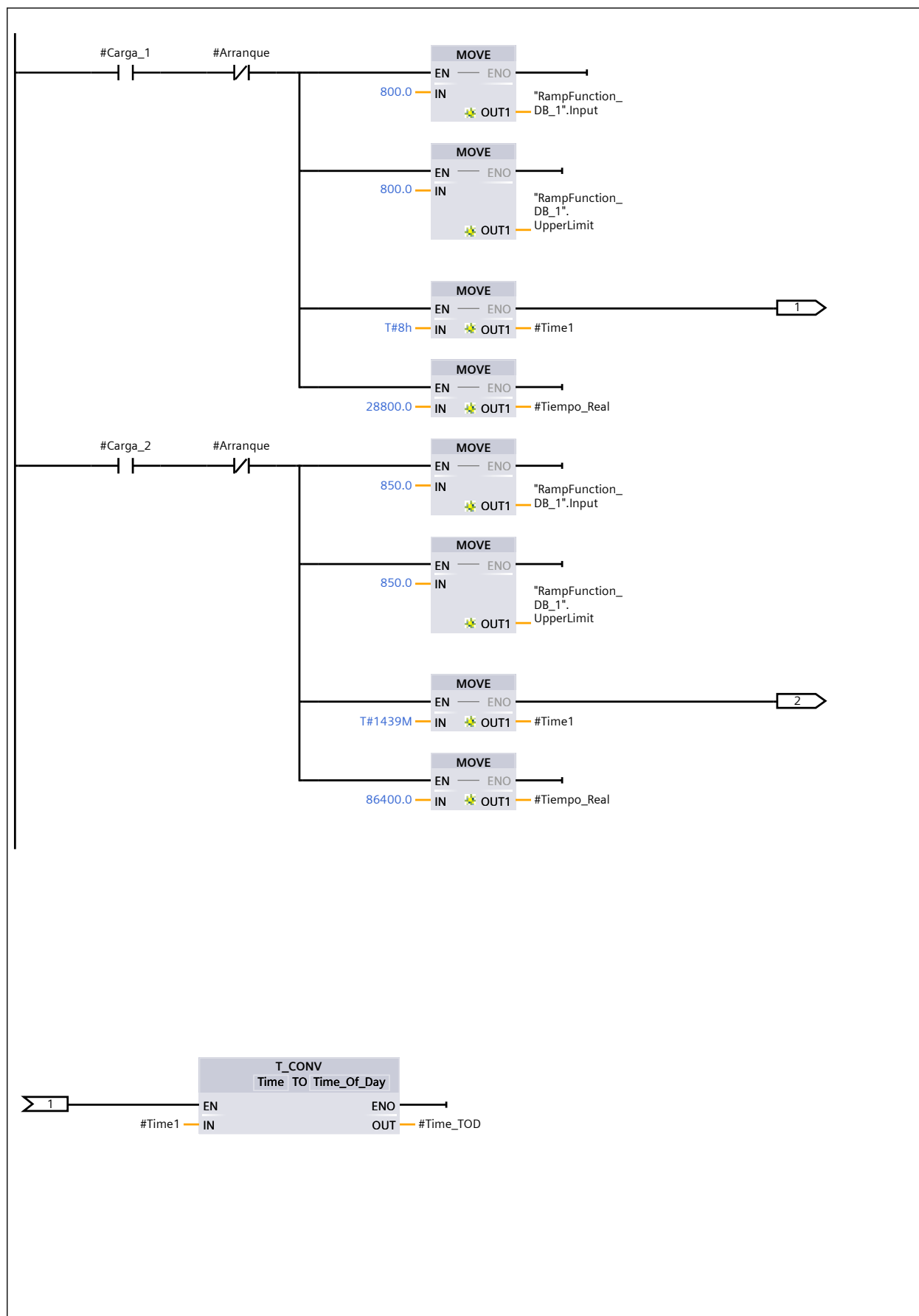
**Segmento 3: ENVÍO DE LA SALIDA DE LA FUNCIÓN AL SETPOINT DEL PID**

Cuando el arranque del calentamiento automático es activado, la salida de la rampa es introducida en el valor del setpoint del PID

**Segmento 4: VALORES DE FABRICANTE**

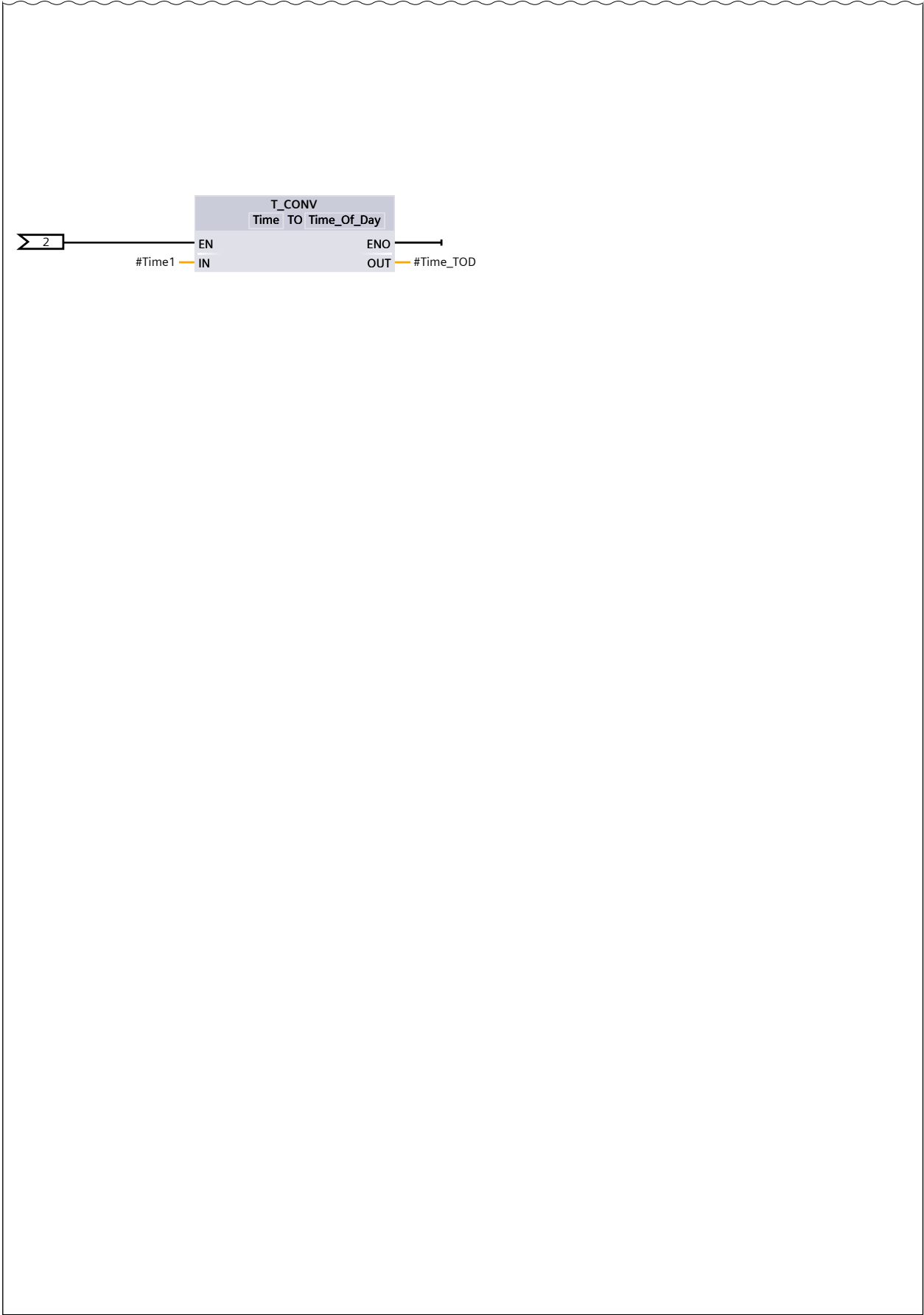
La carga de los valores tiene que ser realizada antes de arrancar el calentamiento automática, si se activa la carga 1 el setpoint alcanzará los 800 grados en 8 horas, si la carga 2 es activada el setpoint alcanzará los 850 grados en 24 horas

Segmento 4: VALORES DE FABRICANTE (1.1 / 2.1)



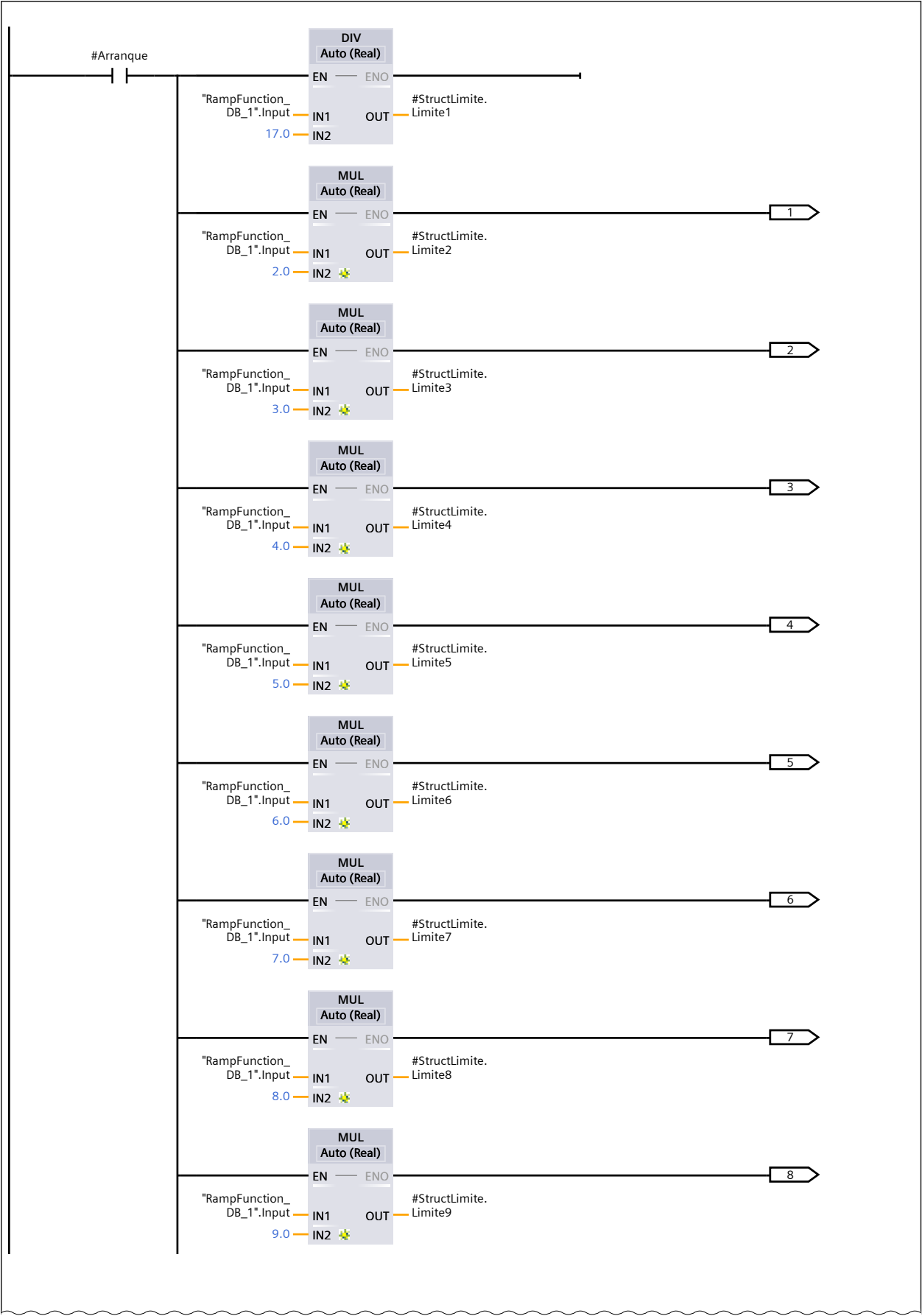
Segmento 4: VALORES DE FABRICANTE (2.1 / 2.1)

1.1 (Página1 - 9)



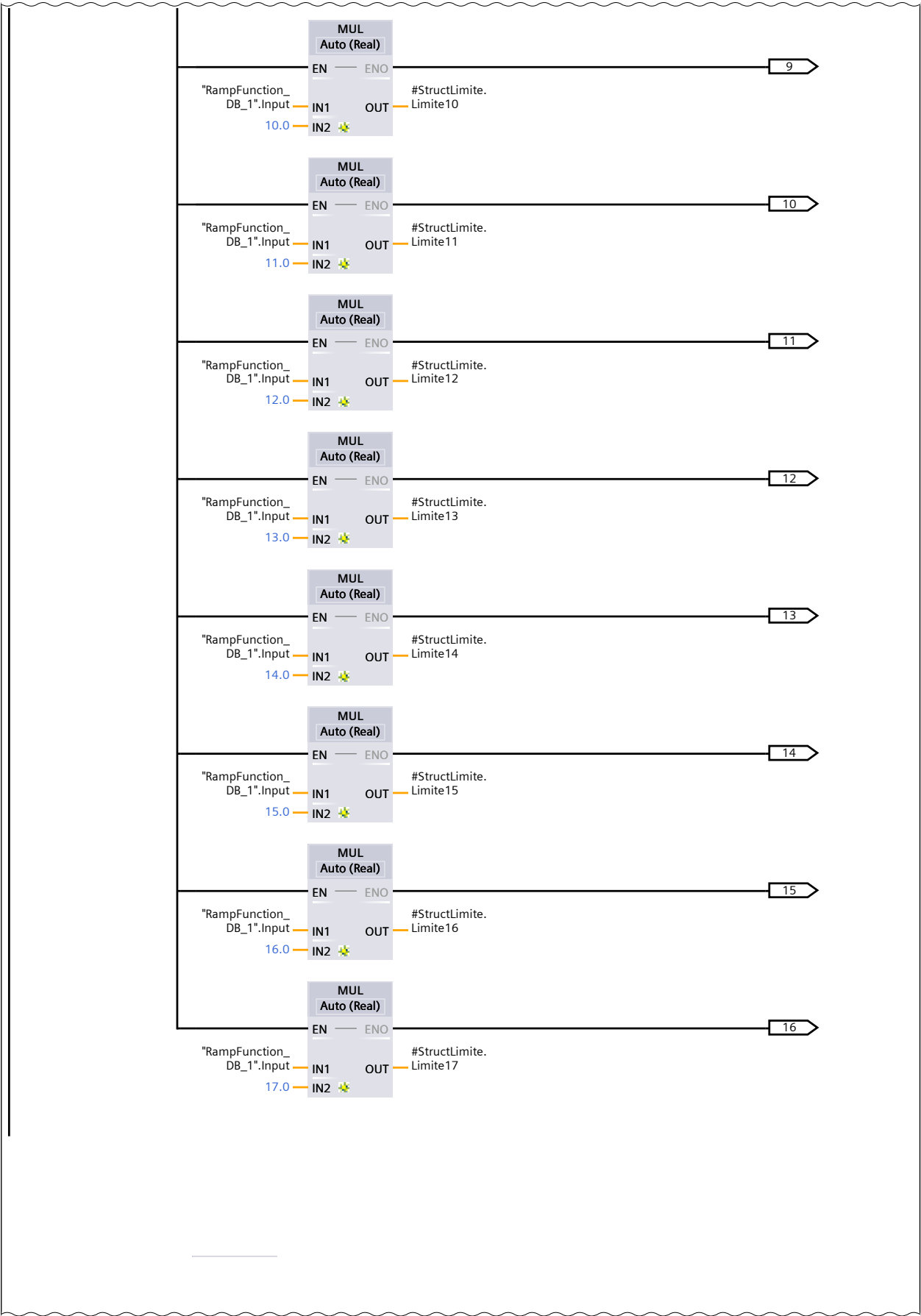
Totally Integrated Automation Portal		
Segmento 5: CÁLCULO DE LOS TRAMOS PARA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CALENTAMIENTO Sea cual sea el setpoint establecido, este se divide en 17 tramos que se irán activando en función del alcance del valor del setpoint alcanzado por el calentamiento automático. En este segmento se obtienen los valores mediante operaciones aritméticas.		

Segmento 5: CÁLCULO DE LOS TRAMOS PARA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CALENTAMIENTO (1.1 / 4.1)



Segmento 5: CÁLCULO DE LOS TRAMOS PARA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CALENTAMIENTO (2.1 / 4.1)

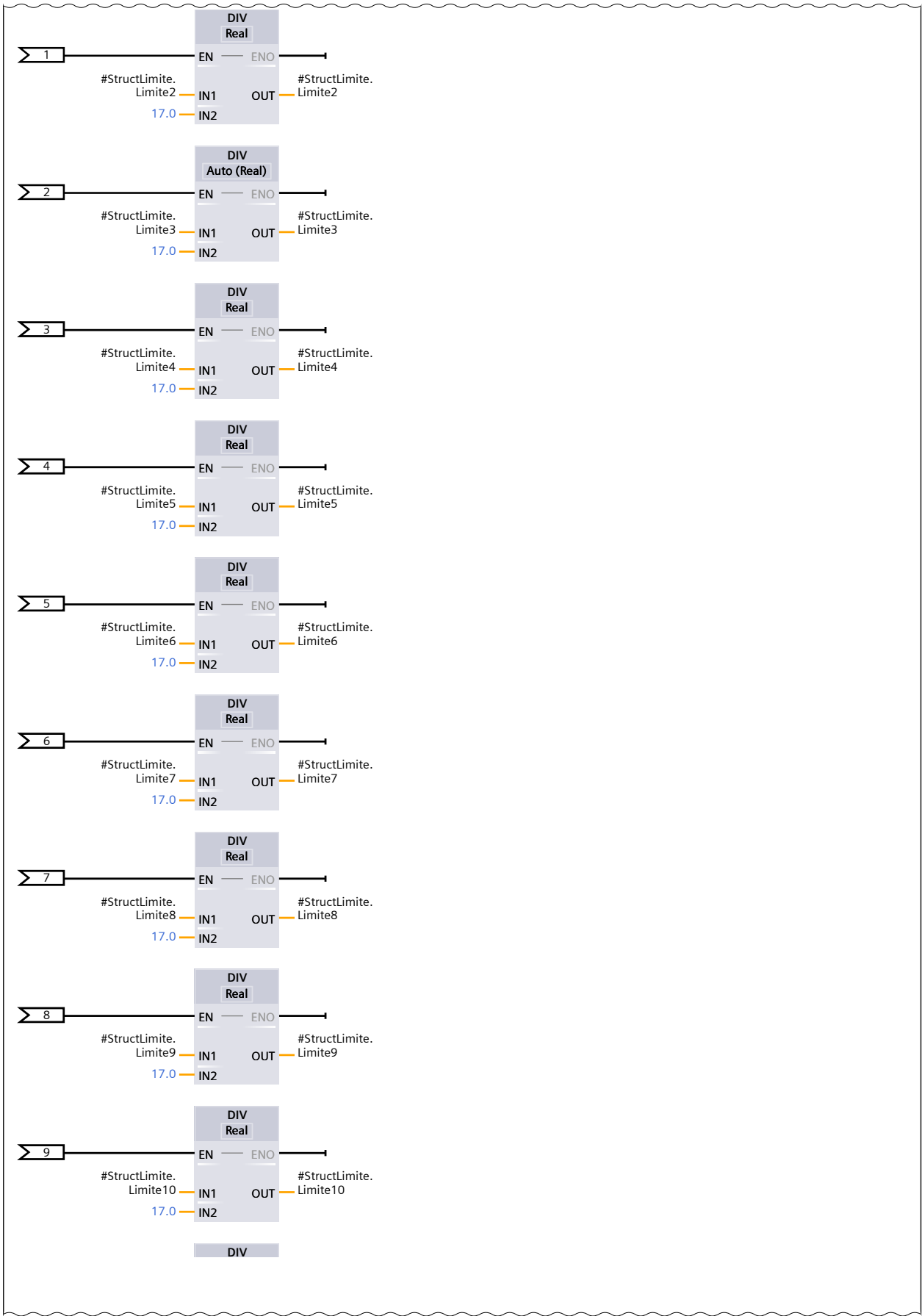
1.1 (Página1 - 12)



3.1 (Página1 - 14)

Segmento 5: CÁLCULO DE LOS TRAMOS PARA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CALENTAMIENTO (3.1 / 4.1)

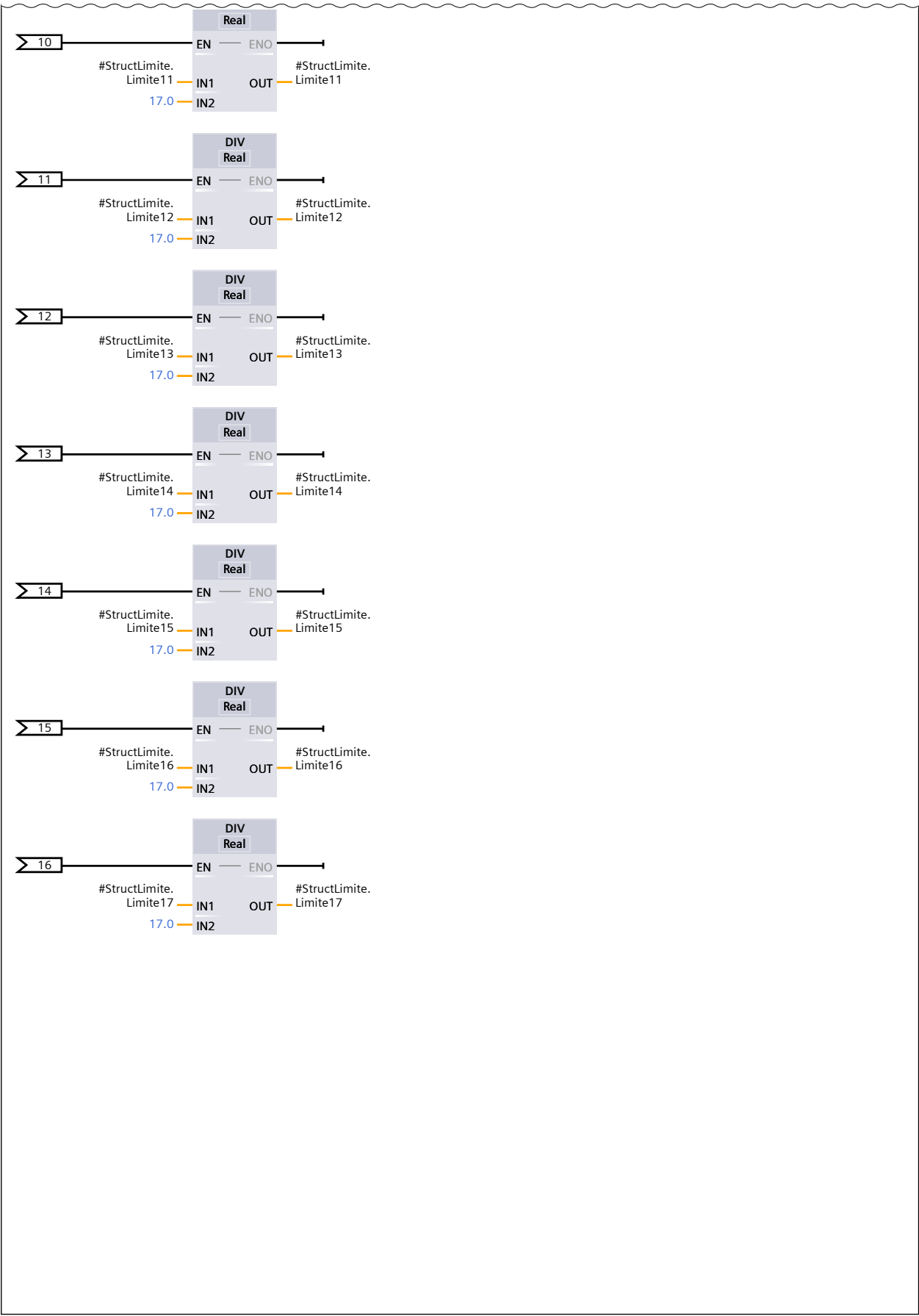
2.1 (Página1 - 13)



4.1 (Página1 - 15)

Segmento 5: CÁLCULO DE LOS TRAMOS PARA LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CALENTAMIENTO (4.1 / 4.1)

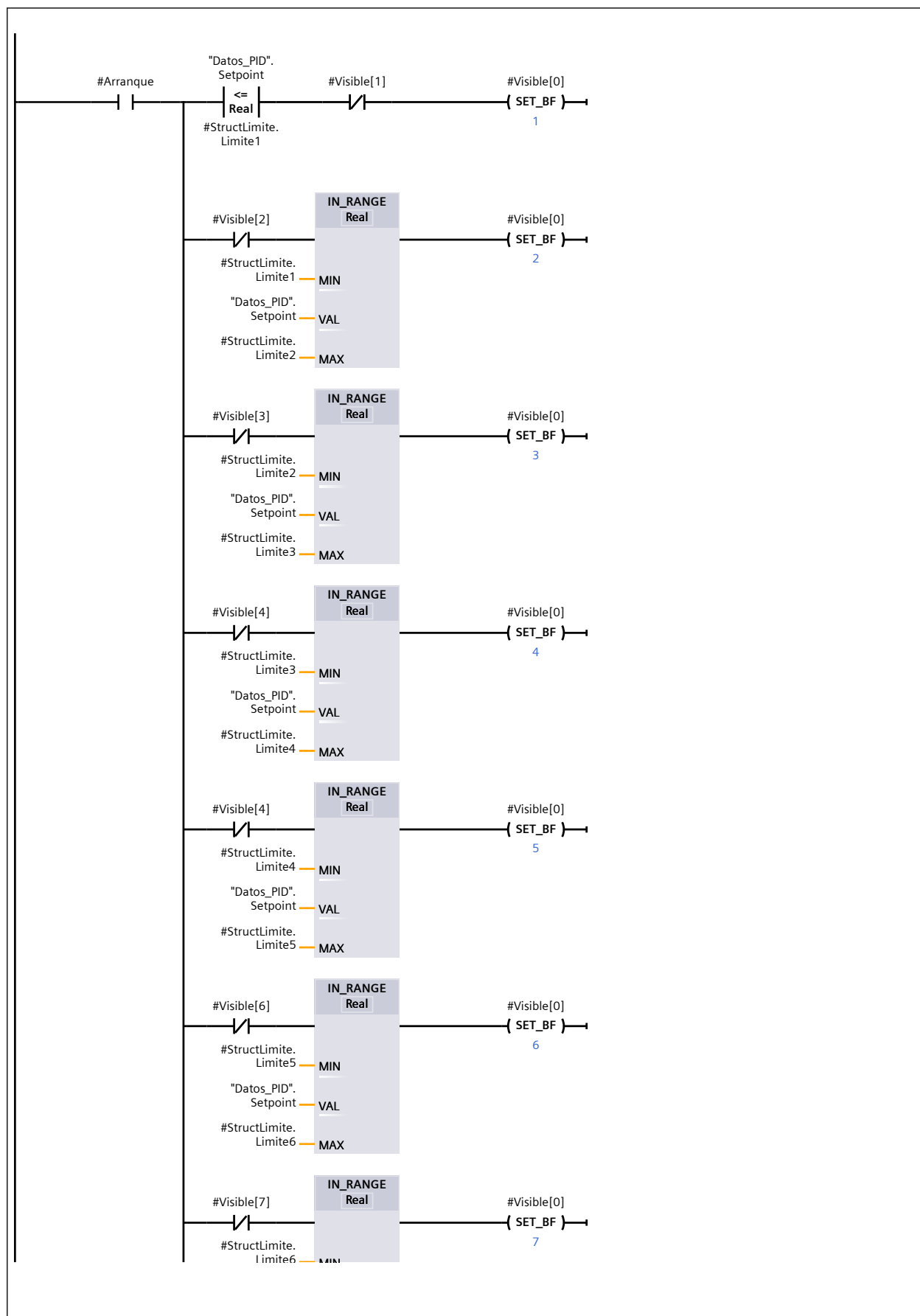
3.1 (Página1 - 14)



Segmento 6: REPRESENTACIÓN GRÁFICA

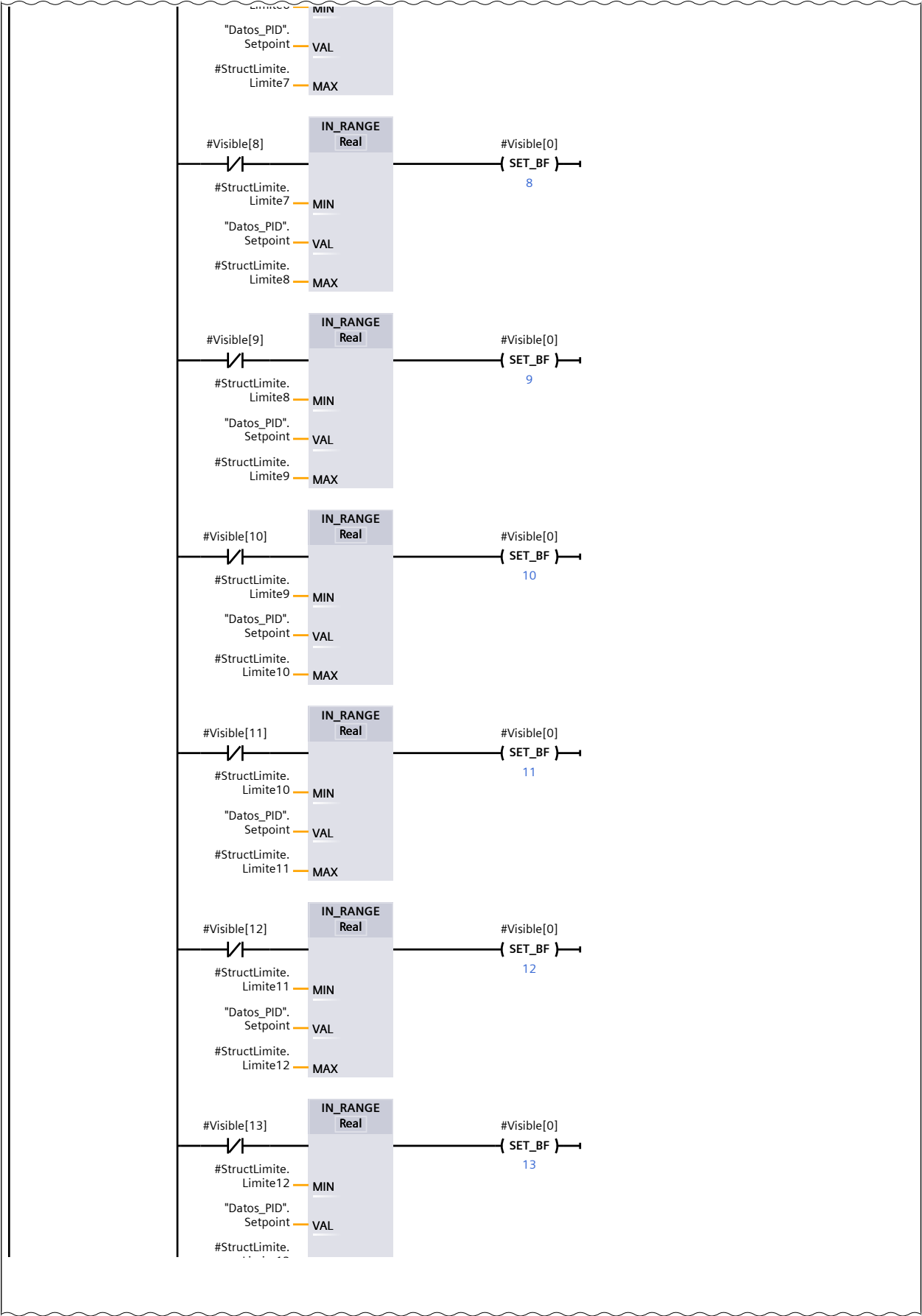
Una vez calculados los valores de cada uno de los 17 tramos se crean unas variables que se usarán en la pantalla HMI para hacer una representación visual del proceso de calentamiento automático, cuando éste acaba se resetean y apaga bloque de función rampa.

Segmento 6: REPRESENTACIÓN GRÁFICA (1.1 / 3.1)



Segmento 6: REPRESENTACIÓN GRÁFICA (2.1 / 3.1)

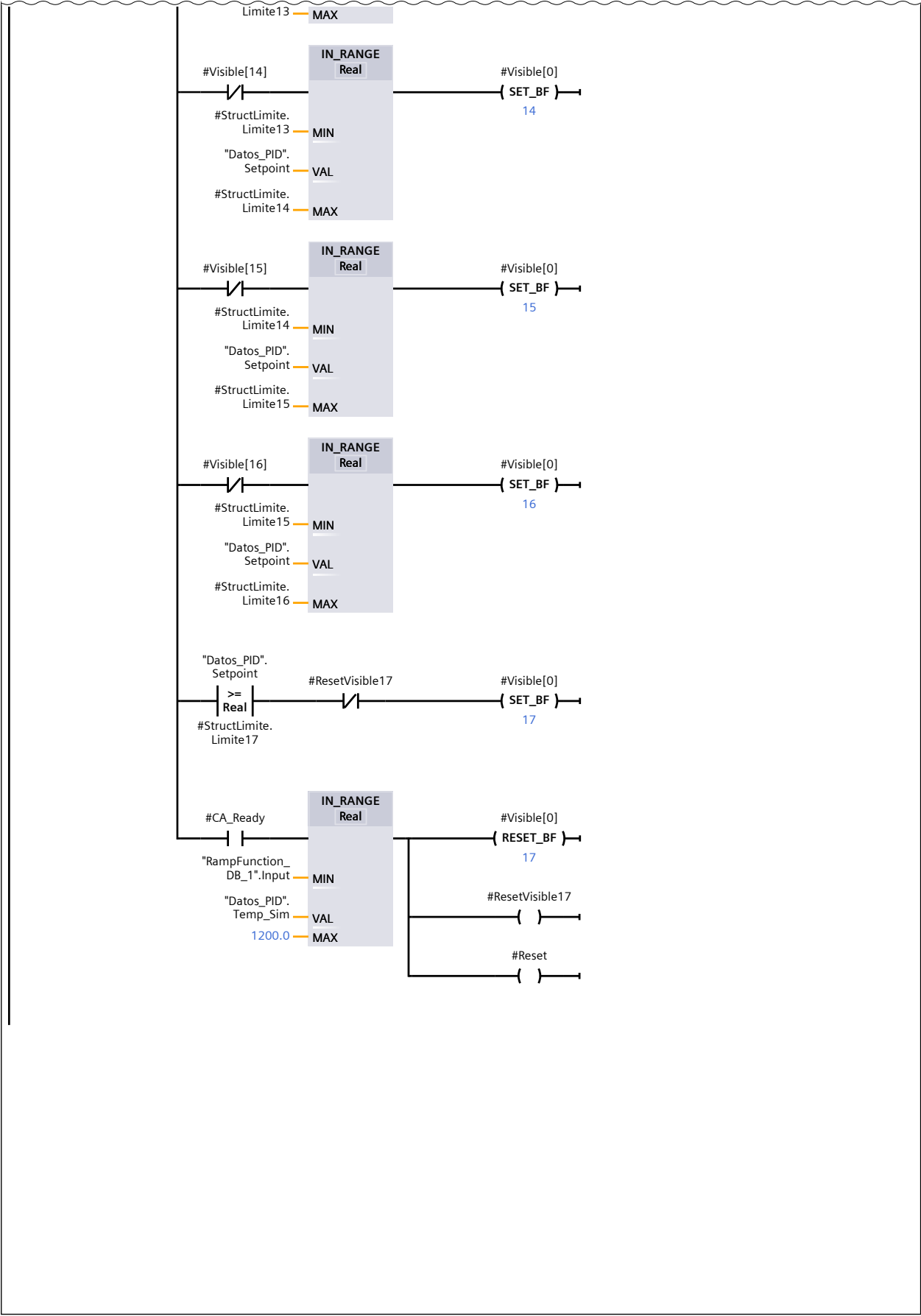
1.1 (Página1 - 17)



3.1 (Página1 - 19)

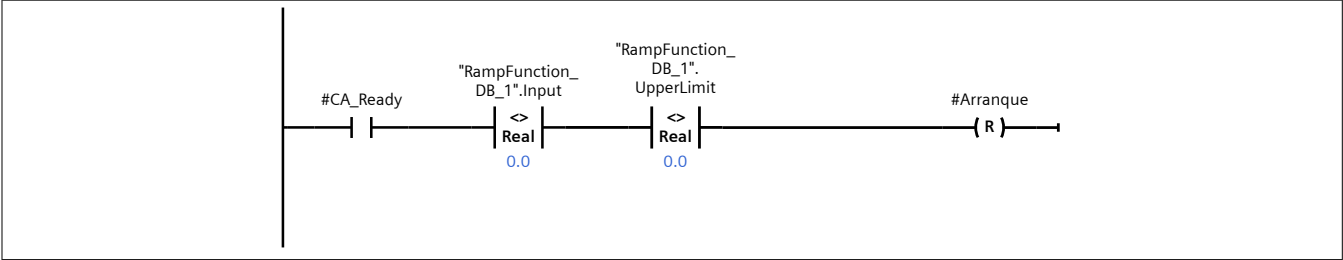
Segmento 6: REPRESENTACIÓN GRÁFICA (3.1 / 3.1)

2.1 (Página1 - 18)



Segmento 7: RESET AL ARRANQUE DE RAMPA

Cuando el calentamiento automático se activa y tanto el input, como el límite superior no está a 0, corta la alimentación del generador de rampa manteniendo la temperatura del horno de muestras.



PLC_Horno_v2 / PLC_1 [CPU 1512C-1 PN] / Bloques de programa

Sintonizado [FB2]

Sintonizado Propiedades

General

Nombre	Sintonizado	Número	2	Tipo	FB
Idioma	KOP	Numeración	Automático		

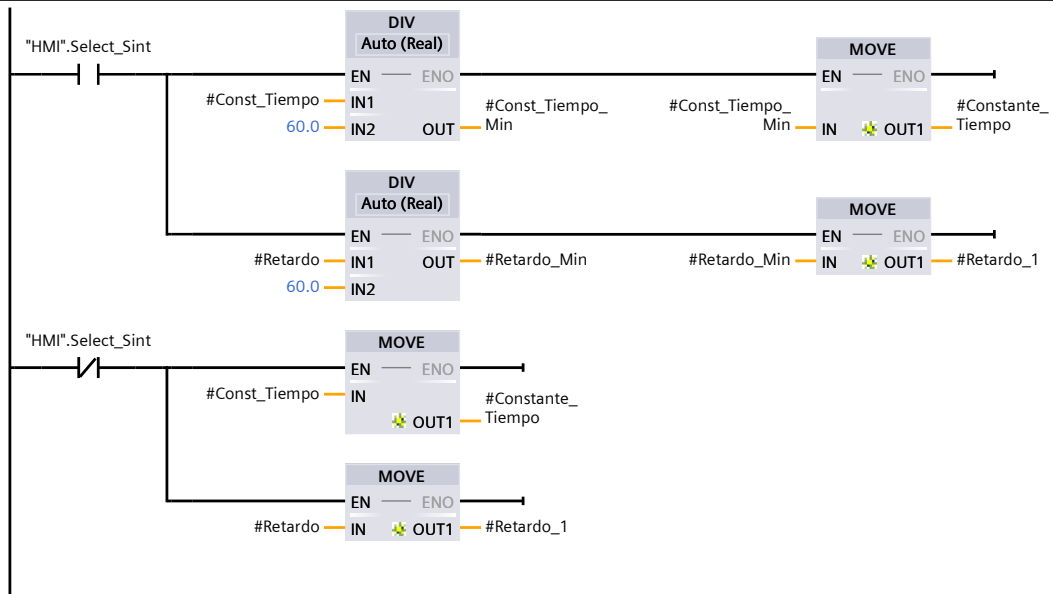
Información

Título	SINTONIZADO	Autor		Comentario	Programación para la obtención de los parámetros del PID mediante tres métodos de sintonización, con la elección si los parámetros del controlador son para realizar una simulación (tiempo en minutos) o es para el proceso real (tiempo en segundos)
Familia		Versión	0.1	ID personalizado	

Sintonizado

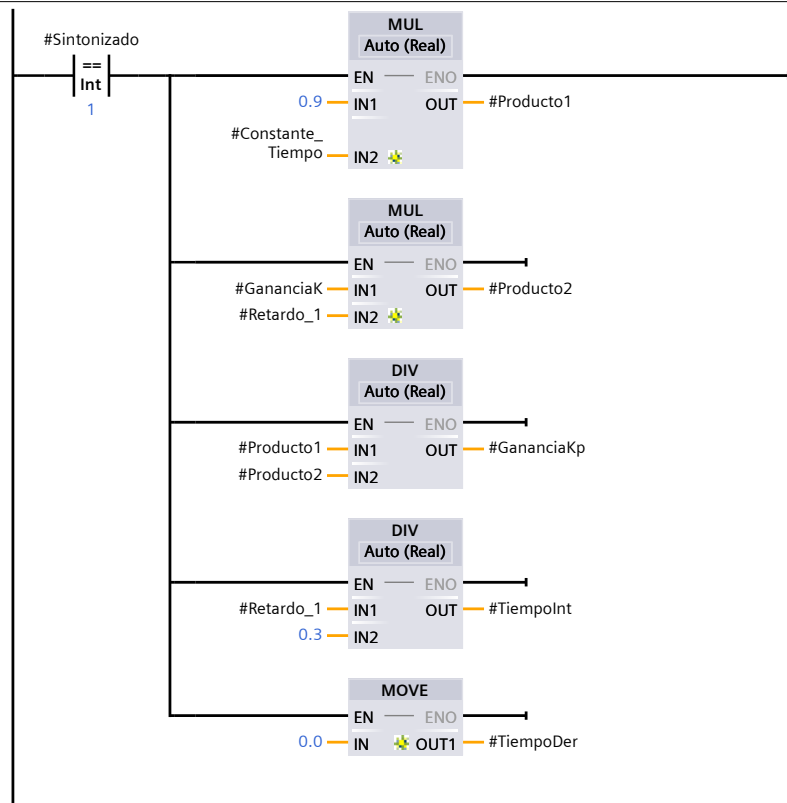
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Input									
GananciaK	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Sintonizado	Int	0	No remanente	True	True	True	False		
TRespuesta	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Copiar	Bool	false	No remanente	True	True	True	False		
Const_Tiempo	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Retardo	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
▼ Output									
GananciaKp	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
TiempoInt	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
TiempoDer	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
▼ InOut									
Const_Tiempo_Min	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		

Totally Integrated Automation Portal									
Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Web API	Escribible desde HMI/OPC UA/Web API	Visible en HMI Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
Retardo_Min	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
▼ Static									
TDBC	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Constante_Tiempo	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
Retardo_1	Real	0.0	No remanente	True	True	True	False		
▼ Temp									
Producto1	Real								
Producto2	Real								
Producto3	Real								
Producto4	Real								
Suma1	Real								
Producto5	Real								
Producto6	Real								
Producto7	Real								
Producto8	Real								
Producto9	Real								
Producto10	Real								
Suma2	Real								
Suma3	Real								
División1	Real								
Resta1	Real								
Suma4	Real								
Producto11	Real								
Suma5	Real								
Producto12	Real								
Producto13	Real								
Producto14	Real								
Constant									
Segmento 1: SELECTOR DEL MODO DEL PROCESO									
Según la elección del modo del proceso para el cual se va a realizar la sintonización, los cálculos se realizarán en segundos para el proceso real, o en minutos para el proceso simulado.									



Segmento 2: CONTROLADOR PI ZIEGLER-NICHOLS

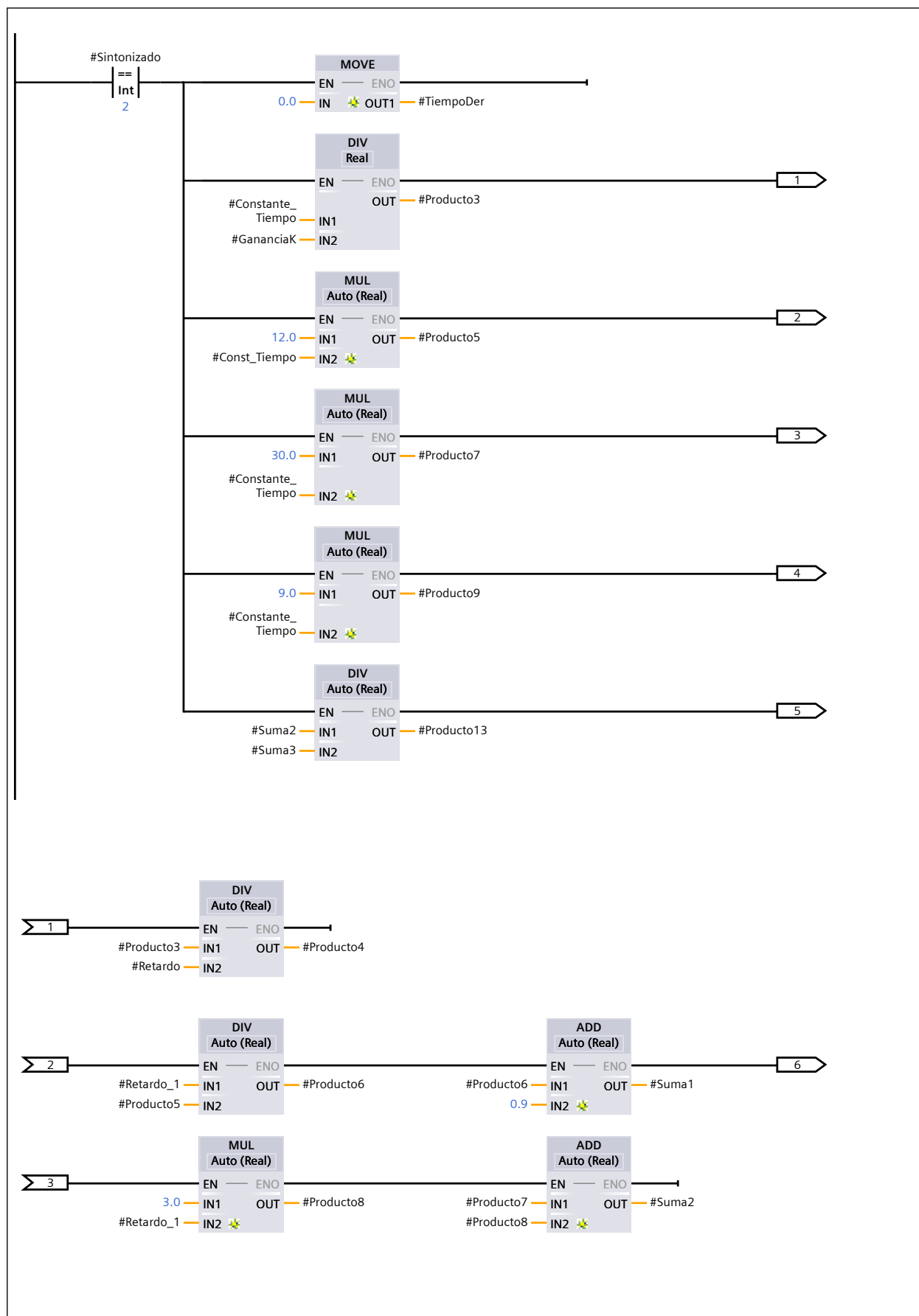
Operaciones aritméticas para el cálculo de los parámetros del controlador PI de Ziegler-Nichols



Segmento 3: CONTROLADOR PI DE COHEN-COON

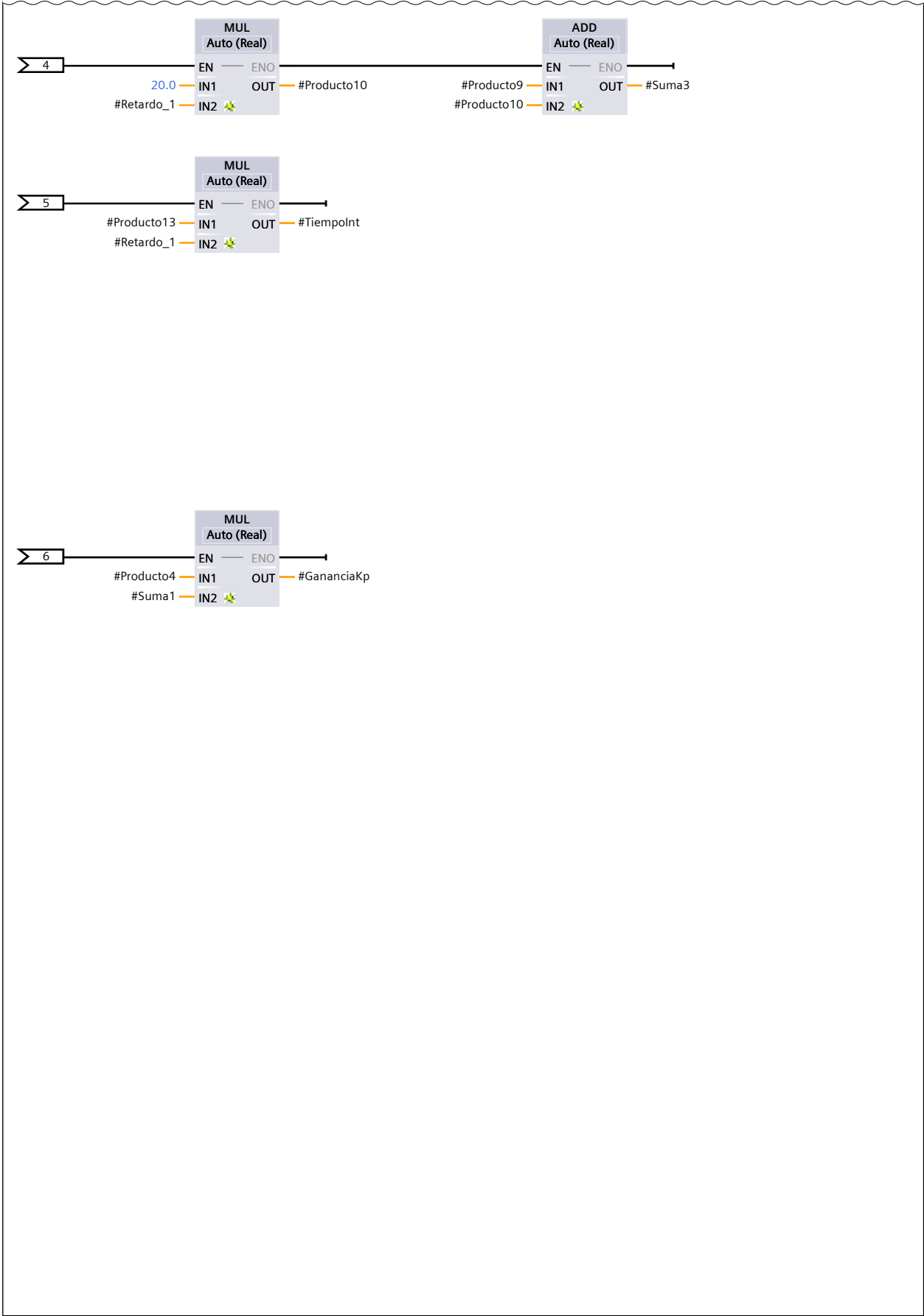
Operaciones aritméticas para el cálculo de los parámetros del controlador PI de Ziegler-Nichols

Segmento 3: CONTROLADOR PI DE COHEN-COON (1.1 / 2.1)



Segmento 3: CONTROLADOR PI DE COHEN-COON (2.1 / 2.1)

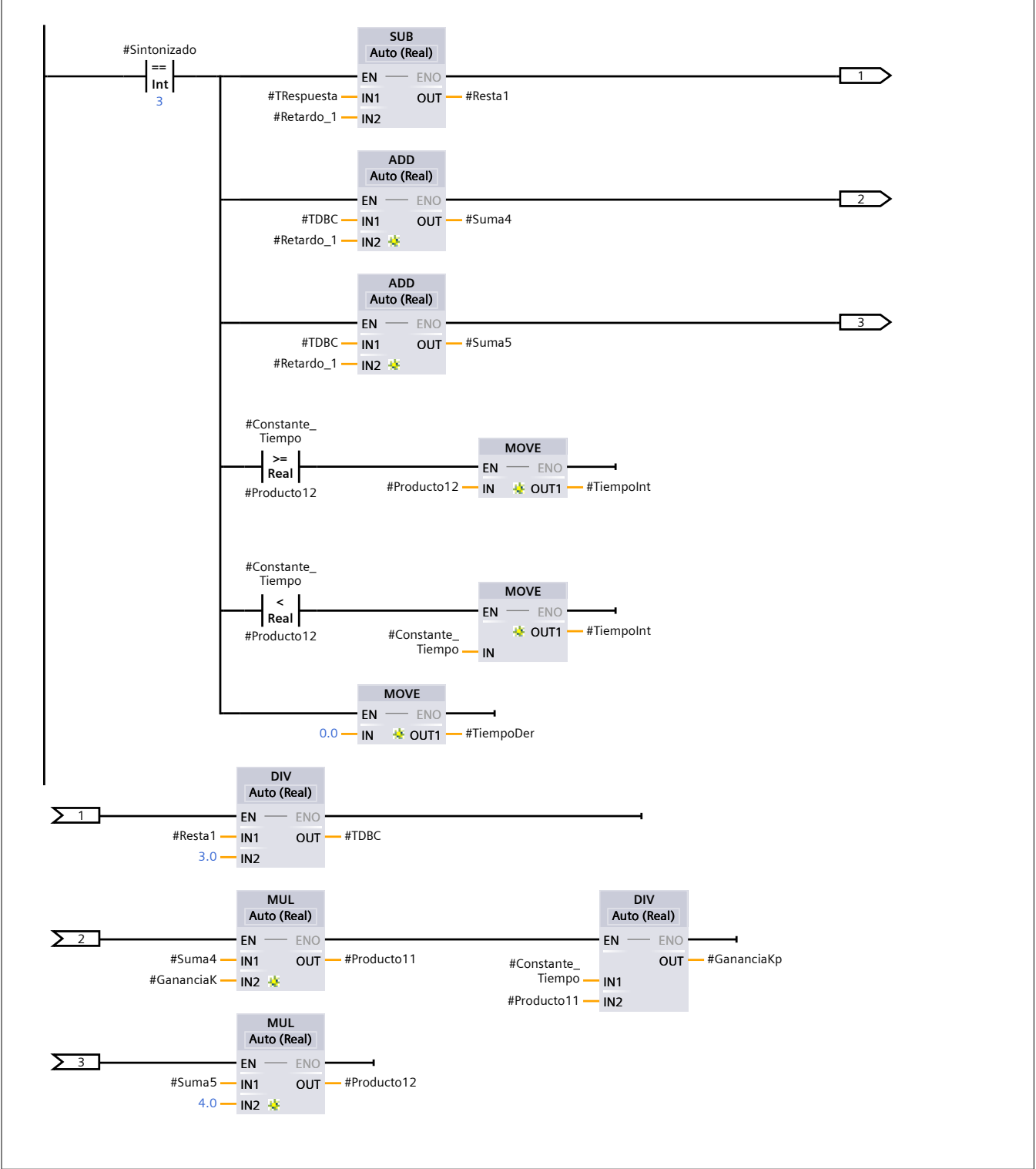
1.1 (Página1 - 4)



Segmento 4: CONTROLADOR PI DE SIMC

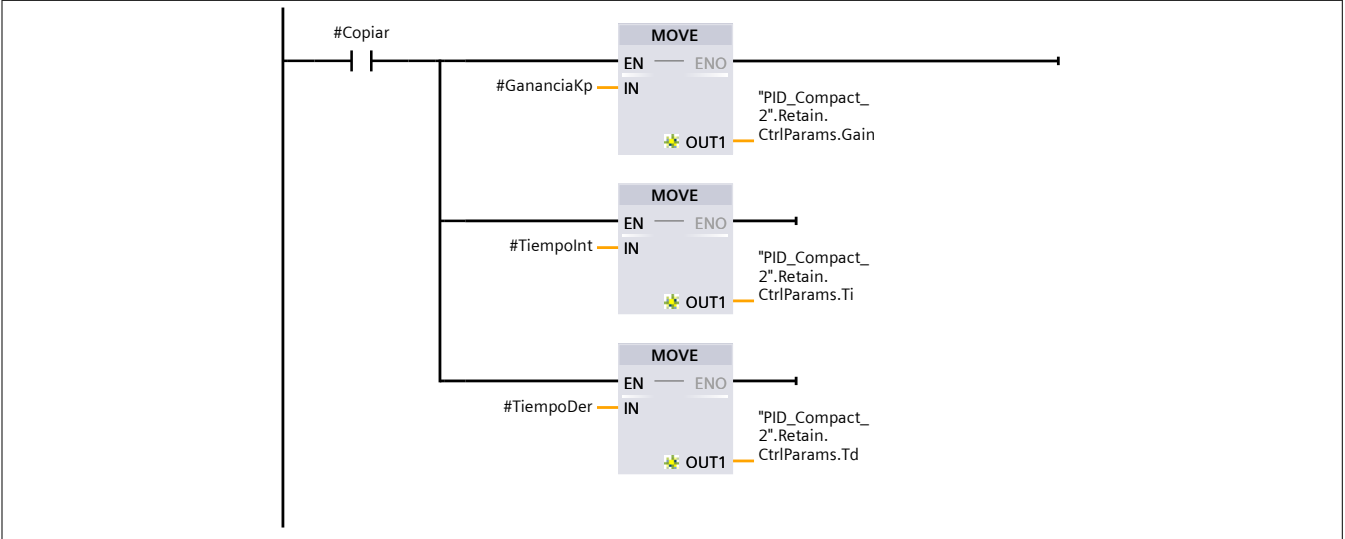
Operaciones aritméticas para el cálculo de los parámetros del controlador PI de Skogestad

Segmento 4: CONTROLADOR PI DE SIMC



Segmento 5: ENVÍA LOS DATOS CALCULADOS AL CONTROLADOR

Pulsando el botón copiar, envía los datos calculados según el método seleccionado al controlador PID para realizar pruebas.



Totally Integrated Automation Portal

PLC_Horno_v2 / PLC_1 [CPU 1512C-1 PN] / Bloques de programa

Alarmas [DB10]

Alarmas Propiedades

General

Nombre	Alarmas	Número	10	Tipo	DB
Idioma	DB	Numeración	Automático		

Información

Título		Autor		Comentario	
Familia		Versión	0.1	ID personalizado	

Alarmas

Nombre	Tipo de datos	Offset	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/OPC UA/Modbus API	Escritable desde HMI/OPC UA/Modbus API	Visible en HMI/Engineering	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static										
Paro de Emergencia	Bool	0.0	false	False	True	True	True	False		Es activada cuando se pulsa la seta de emergencia
Temperatura alta	Bool	0.1	false	False	True	True	True	False		Es activada cuando la temperatura del horno supera los 1200 °C
Fallo en controlador PID	Bool	0.2	false	False	True	True	True	False		Es activada cuando aparece un error en el controlador PID
Fallo proceso calentamiento automático	Bool	0.3	false	False	True	True	True	False		Es activada cuando aparece un fallo en el bloque generador de rampa
Setpoint fuera del rango establecido	Bool	0.4	false	False	True	True	True	False		Es activada cuando el setpoint está fuera del rango establecido

PLC_Horno_v2 / PLC_1 [CPU 1512C-1 PN] / Bloques de programa

Datos_PID [DB2]

Datos_PID Propiedades

General					
Nombre	Datos_PID	Número	2	Tipo	DB
Idioma	DB	Numeración	Automático		
Información					
Título		Autor		Comentario	
Familia		Versión	0.1	ID personali- zado	

Datos_PID

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Rema- nencia	Accesi- ble desde HMI/O PC UA/We b API	Es- cribible Engi- neer- ing de HM I/O PC UA/ We b API	Visible en HMI	Valor de ajuste	Super- visión	Comentario
▼ Static									
Setpoint	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Reset	Bool	false	False	True	True	True	False		
Output_Value	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Temp_Sim	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Mode	Int	0	False	True	True	True	False		
State	Int	0	False	True	True	True	False		
Activate Mode	Bool	false	False	True	True	True	False		
Manual Mode	Bool	false	False	True	True	True	False		
Output	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Error	Bool	false	False	True	True	True	False		
Temp_Select	Real	0.0	False	True	True	True	False		

Totally Integrated Automation Portal

PLC_Horno_v2 / PLC_1 [CPU 1512C-1 PN] / Bloques de programa

Datos_Sim [DB4]

Datos_Sim Propiedades

General

Nombre	Datos_Sim	Número	4	Tipo	DB
Idioma	DB	Numeración	Automático		

Información

Título		Autor		Comentario	
Familia		Versión	0.1	ID personalizado	

Datos_Sim

Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/O PC UA/Web API	Escriben HMI de Ingeniería	Visible en HMI	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario
▼ Static									
1Orden_Output	Real	0.0	False	True	True	True	False		
Lag_Output	Real	0.0	False	True	True	True	False		

Totally Integrated Automation Portal											
PLC_Horno_v2 / PLC_1 [CPU 1512C-1 PN] / Bloques de programa											
HMI [DB6]											
HMI Propiedades											
General											
Nombre		HMI		Número		6		Tipo		DB	
Idioma		DB		Numeración		Automático					
Información											
Título				Autor				Comentario			
Familia				Versión		0.1		ID personalizado			
HMI											
Nombre		Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible desde HMI/O PC UA/Web API	Escriben HMI/Engeniería	Visible en HMI	Valor de ajuste	Supervisión	Comentario	
▼ Static											
Rearme		Bool	false	False	True	True	True	False			
Paro_Aspiración		Bool	false	False	True	True	True	False			
Aspiración		Bool	false	False	True	True	True	False			
Start		Bool	false	False	True	True	True	False			
Stop		Bool	false	False	True	True	True	False			
Auto		Bool	false	False	True	True	True	False			
Tuning_Fine		Bool	false	False	True	True	True	False			
Pretuning		Bool	false	False	True	True	True	False			
Manual		Bool	false	False	True	True	True	False			
Basculación		Bool	false	False	True	True	True	False			
Bajar_Horno		Bool	false	False	True	True	True	False			
Copiar_Backup		Bool	false	False	True	True	True	False			
Select_Temp		Bool	false	False	True	True	True	False			
Select_Sint		Bool	false	False	True	True	True	False			