

# CONTROL DE TEMPERATURA

ISA, PROYECTO 8 - JOEL SANZ MARTÍ, 2º CFGS

## TABLE OF CONTENTS

1. Enunciado .....	2
2. Documentación .....	3
2.1. Diagrama de Bloques.....	3
2.2. Medida de Temperatura.....	4
2.3. Esquema Eléctrico .....	4
2.4. Cambio de Sensor de Temperatura a un Termopar .....	16
2.5. Programa PLC .....	18
2.6. SCADA.....	26
2.7. Explicación Función PID en TIA Portal .....	29
2.8. Configuración del PID .....	31
2.9. Primer Control Proporcional.....	33
2.10. Segundo Control Proporcional .....	33
2.11. Primer control PI.....	34
2.12. Segundo y Tercer Control PI .....	34
2.13. autotuning .....	36
2.14. Control PID .....	37
2.15. Explicación PID con Salida PWM.....	37
2.16. Control PID con Salida PWM .....	38
2.17. Datalogging.....	38
2.18. Conclusiones y Valoración Final .....	39

## 1. ENUNCIADO

Se pretende realizar un sistema de control de temperatura mediante el cual se consiga mantener la temperatura de un recinto en un valor constante, y de forma seleccionable. El procedimiento de control será en bucle cerrado y se realizará una monitorización de forma continua en el PC. Las especificaciones del sistema a realizar son:

**a) Magnitud a medir y controlar:** Temperatura.

**b) Márgenes de variación:** Entre 0°C y 100°C seleccionable.

**c) Tipo de control:** El proceso podrá trabajar de forma MANUAL (bucle abierto) o AUTOMÁTICA (bucle cerrado). En AUTOMÁTICO el tipo de control será un PID con acciones analógicas y PWM, indistintamente.

**d) Gráficos de tendencia:** Para visualizar en tiempo real la variable de proceso.

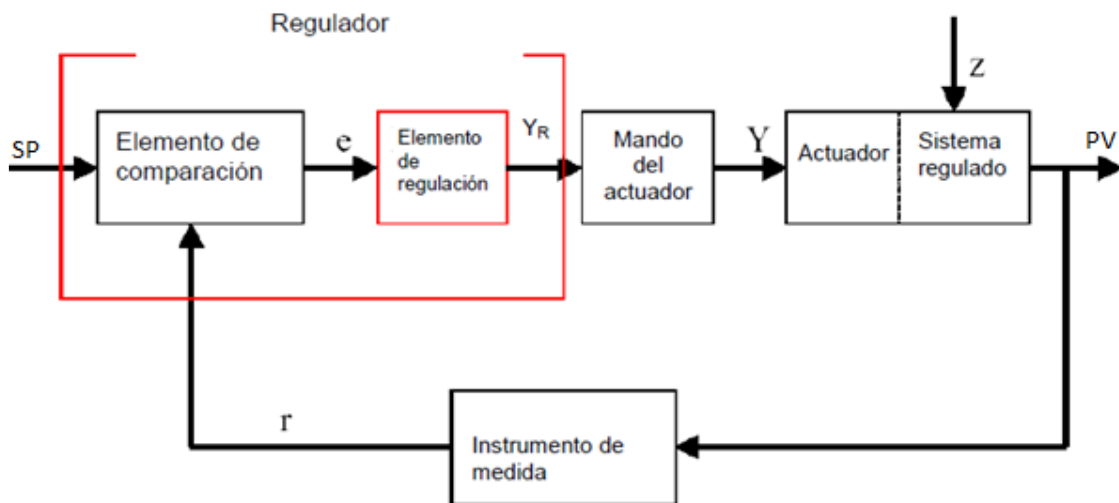
**e) Registro de variables en fichero:** Que cree registros de las variables más significativas (temperatura, alarmas, estado de la planta, etc.) con capacidad de generación de archivos portables a entornos Microsoft Excel.

## HMI

La interfaz consistirá en un programa desarrollado con WinCC sobre un Runtime, con el que podremos controlar el funcionamiento del conjunto.

## 2. DOCUMENTACIÓN

### 2.1. DIAGRAMA DE BLOQUES



**Magnitud regulada (PV):** Magnitud física que se quiere controlar. En nuestro caso será la temperatura del recinto.

**Consigna (SP):** Valor deseado del PV. En nuestro caso será una temperatura seleccionable en el rango [0..100]°C.

**Instrumento de medida:** Proporciona la señal de realimentación enviada al regulador (PLC). En nuestro caso será una señal [0..10]V proveniente del acondicionador de la Pt100 para un rango de [0..100]°C.

**Elemento de comparación:** Forma la señal de error comparando PV con SP. En nuestro caso será el PID dentro del PLC.

**Elemento de regulación:** A partir de la señal de error, proporciona una variable correctora que actúa sobre el elemento final de control. En nuestro caso será el PID dentro del PLC.

**Mando del actuador:** Comunica al actuador cómo debe modificarse la magnitud regulada. En nuestro caso serán el SSR y los relés que controlan la resistencia calefactora, que a su vez serán controlados por las salidas analógica y PWM del PID.

**Actuador o elemento final de control:** Circuito de regulación que modifica la magnitud regulada en función de la magnitud manipulada.

**Sistema regulado:** Sistema donde se encuentra la magnitud que se quiere regular. En nuestro caso será el recinto con el horno.

**Perturbaciones:** Es la magnitud que influye de manera no deseada en la magnitud regulada y la aleja de la consigna actual. En nuestro caso será el viento que generará un ventilador.

## 2.2. MEDIDA DE TEMPERATURA

La medida de temperatura se realizó con una Pt100 conectada a un acondicionador para conseguir una señal de [0..10]V.

El acondicionador que usamos (INOR APAQ 3LPT100) tiene una serie de jumpers que se deben soldar según la configuración. Primero ajustamos el punto “Zero” a 0°C soldando las pistas 2 y 3 del jumper 9. A continuación, ajustamos el punto “Span” a 100°C soldando los jumpers del 2 al 8 de esta forma:



Por último, soldamos las dos últimas pistas del pin 1 para desactivar la detección de resistencia quemada (detectar a valores de tensión >11V o <0V).

Para ajustar el sistema, usamos resistencias patrón que simularan la resistencia de la Pt100 a 0°C y a 100°C. Para conseguir estas resistencias usamos la siguiente fórmula:

$$R_f = R_0 * [1 + \alpha * (t_f - t_0)],$$

Siendo  $R_f$  la resistencia a la temperatura  $t_f$ ,  $R_0$  la resistencia a la temperatura  $t_0$  y  $\alpha$  el coeficiente de temperatura.

El nombre Pt100 indica que es una RTD de platino (Pt), y por tanto tiene un coeficiente de temperatura de  $0,00385^{\circ}\text{C}^{-1}$ , y que tiene una resistencia de 100Ω a 0°C (100). Por tanto:

$$R_{0^{\circ}\text{C}} = 100\Omega * [1 + 0,00385^{\circ}\text{C}^{-1} * (0^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})] = 100\Omega$$

$$R_{100^{\circ}\text{C}} = 100\Omega * [1 + 0,00385^{\circ}\text{C}^{-1} * (100^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})] = 138,5\Omega$$

Para ajustar el convertidor, primero pondremos la resistencia de 100Ω. Mediremos la salida del convertidor con un voltímetro y ajustaremos el potenciómetro “Zero” hasta que midamos 0V a la salida. A continuación, cambiaremos la resistencia por la de 138,5Ω y ajustaremos el potenciómetro “Span” hasta que midamos 10V a la salida. Cuando ajustemos un extremo del rango, el otro se habrá desajustado, por lo que repetiremos el proceso completo hasta que al poner la resistencia de 100Ω midamos 0V y al poner la resistencia de 138,5Ω midamos 10V.

## 2.3. ESQUEMA ELÉCTRICO






























## 2.4. CAMBIO DE SENSOR DE TEMPERATURA A UN TERMOPAR

Necesitamos sustituir la Pt100 por un termopar junto con su circuito de acondicionamiento que cumplan con las características del sistema de medición de temperatura actual. Por tanto, el termopar debe tener un rango mínimo de [0..100]°C, y el circuito de acondicionamiento debe alimentarse a 24Vdc y que su salida sea del rango [0..10]V.

El termopar elegido para sustituir a la Pt100 es el modelo E52-ETJS1-B de OMRON ([Datasheet](#)).

Gama	Tipo de forma <sup>1</sup>	Tipo			Rango de temperatura		Tubo de detección			Conexión			Código de pedido
		Serie	Tecnología	Subtipo	Mín [°C]	Máx [°C]	Diámetro [mm]	Longitud [mm]	Material	Tipo	Fijación	Longitud [m]	
		terminales cubiertos, montaje G1/2" g	Termopar	K	0	1150	6	200	INCONEL 600	2 hilos			E52-ETK6-200-T2-CG1/2G-B
				J		720	6	200					E52-ETJ6-200-T2-CG1/2G-B
						500	6	200					E52-EP6-200-T2-CG1/2G-B
		terminales cubiertos; montaje de abrazadera 1,5"	PT100	Clase B	-50	200	6	100	SUS 316	3 hilos	terminales de tornillos cubiertos	-	E52-EP6-100-T2-CC1.5-B
		terminales cubiertos; montaje de abrazadera 2"					6						E52-EP6-100-T2-CC2-B
		Temperatura de la superficie	Termopar	J	0	250	10	Orificio de tornillo 4 mm diám.	Cu (con baño de estaño)	2 hilos	Precableado con extremos de cable abiertos	2	E52-ETJS1-B
		Temperatura ambiente	PT100	Clase B	-40	80	-	-	Aluminio	3 hilos	terminales de tornillos cubiertos	-	E52-EPE1-B
		Sin contacto	Sensor infrarrojo	hasta Sn = 60 mm	10	260	M18	44,5	ABS	4 hilos	Precableado con extremos de cable abiertos	3	ES1B
				hasta Sn = 1 m	0	400	M18	120	SUS 304	5 hilos		2	ES1C-A40

Este termopar estará conectado al conversor MINI MCR-TC-UI-NC de Phoenix Contact ([Datasheet](#)).

### Input

Configurable/programmable	Yes
Sensor type	B, E, J, K, N, R, S, T, L, U, A-1, A-2, A-3, M, L
Temperature measuring range	-250 °C ... 2500 °C (Range depends on sensor type, range can be set freely via software or in increments from -150°C to 1350°C via DIP switches)
Measuring range span	min. 50 K
Number of inputs	1

### Output

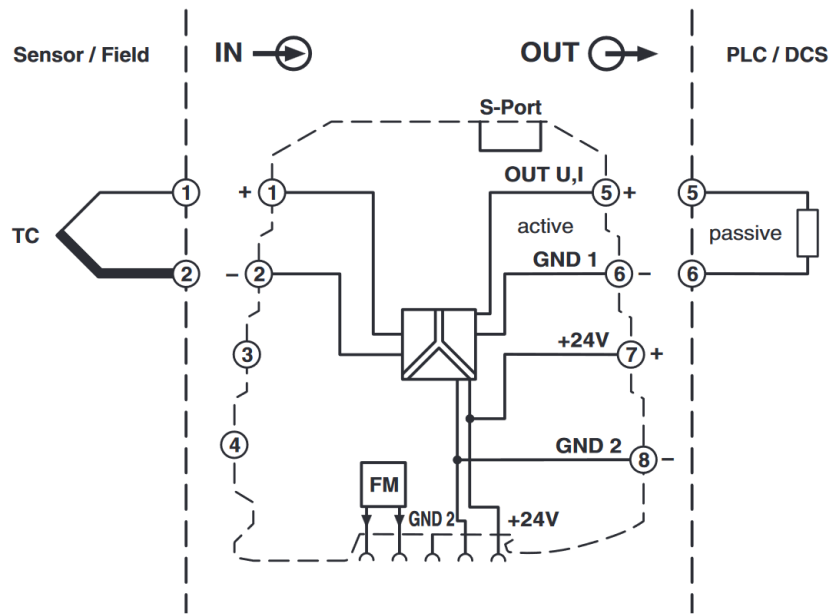
Number of outputs	1
Voltage output signal	0 V ... 10 V 10 V ... 0 V 0 V ... 5 V 1 V ... 5 V
Max. voltage output signal	approx. 12.3 V

### Supply

Supply voltage range	9.6 V DC ... 30 V DC (The DIN rail bus connector (ME 6,2 TBUS-2 1,5/5-ST-3,81 GN, Order No. 2869728) can be used to bridge the supply voltage. It can be snapped onto a 35 mm DIN rail according to EN 60715))
Typical current consumption	< 27 mA (at 24 V DC)
Max. current consumption	72 mA
Power consumption	≤ 700 mW (at I <sub>OUT</sub> = 20 mA, 9.6 V DC, load 500 Ω)



En el datasheet del acondicionador hay un esquema que muestra el conexionado de este mismo:



Según muestra la anterior figura, el termopar va conectado a los bornes 1 y 2, mientras que la entrada analógica del PLC va conectada a los bornes 5 y 6, respetando la polaridad tanto del termopar como de la entrada del PLC (Indicada en la figura).

Este acondicionador tiene dos series de switches para realizar los ajustes de la medida.

La primera serie de switches sirve para configurar el tipo de termopar, la compensación fría, el rango de la señal de salida y el rango inferior de la temperatura.

		• ≡ ON DIP S1							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Sensor type	J (IEC 584)								
	K (IEC 584)	•							
Cold junction compensation	OFF								
	ON	•							
Analog output signal	0...20 mA								
	20...0 mA		•						
	4...20 mA			•					
	20...4 mA		•	•					
	0...10 V					•			
	10...0 V		•		•				
	0...5 V			•	•				
	1...5 V		•	•	•				
Start temperature	0°C ≡ 32°F								
	-10°C ≡ 14°F					•			
	-20°C ≡ -4°F						•		
	-30°C ≡ -22°F					•	•		
	-40°C ≡ -40°F							•	
	-50°C ≡ -58°F					•		•	
	-100 °C ≡ -148°F						•	•	
	-150 °C ≡ -238°F						•	•	

En nuestro caso, activaremos los switches 1 (Termopar tipo J), 2 (Activar compensación fría) y 5 (Salida [0..10]V). No activando los switches 6, 7 y 8 seleccionamos el rango inferior de la temperatura a 0°C.

La segunda serie de switches configura el rango superior de la señal de entrada.

Measuring range final value							• $\hat{=}$ ON										
							DIP S2										
							1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	
0°C $\hat{=}$ 32°F																	
10°C $\hat{=}$ 50°F	•																
20°C $\hat{=}$ 68°F		•															
30°C $\hat{=}$ 86°F	•	•															
40°C $\hat{=}$ 104°F			•														
50°C $\hat{=}$ 122°F	•		•														
60°C $\hat{=}$ 140°F		•	•														
70°C $\hat{=}$ 158°F	•	•	•														
80°C $\hat{=}$ 176°F				•													
90°C $\hat{=}$ 194°F	•			•													
100°C $\hat{=}$ 212°F		•		•													
110°C $\hat{=}$ 230°F	•	•		•													
120°C $\hat{=}$ 248°F			•	•													
130°C $\hat{=}$ 266°F	•		•	•													
140°C $\hat{=}$ 284°F		•	•	•													
150°C $\hat{=}$ 302°F	•	•	•	•													
160°C $\hat{=}$ 320°F					•												
170°C $\hat{=}$ 338°F	•				•												
180°C $\hat{=}$ 356°F		•			•												
190°C $\hat{=}$ 374°F	•	•			•												
200°C $\hat{=}$ 392°F			•		•												
210°C $\hat{=}$ 410°F	•		•		•												
220°C $\hat{=}$ 428°F		•	•		•												
230°C $\hat{=}$ 446°F	•	•	•		•												
240°C $\hat{=}$ 464°F				•	•												
250°C $\hat{=}$ 482°F	•			•	•												
260°C $\hat{=}$ 500°F		•		•	•												
270°C $\hat{=}$ 518°F	•	•		•	•												
280°C $\hat{=}$ 536°F			•	•	•												
290°C $\hat{=}$ 554°F	•		•	•	•												
300°C $\hat{=}$ 572°F		•	•	•	•												
320°C $\hat{=}$ 608°F	•	•	•	•	•												
340°C $\hat{=}$ 644°F												•					
360°C $\hat{=}$ 680°F	•											•					
380°C $\hat{=}$ 716°F		•										•					
400°C $\hat{=}$ 752°F	•	•										•					
420°C $\hat{=}$ 788°F			•									•					
440°C $\hat{=}$ 824°F	•		•									•					
460°C $\hat{=}$ 860°F		•	•									•					
480°C $\hat{=}$ 896°F	•	•	•									•					
500°C $\hat{=}$ 932°F				•								•					
520°C $\hat{=}$ 968°F	•			•								•					
540°C $\hat{=}$ 1004°F		•		•								•					
560°C $\hat{=}$ 1040°F	•	•		•								•					
580°C $\hat{=}$ 1076°F			•	•								•					
600°C $\hat{=}$ 1112°F	•		•	•								•					
620°C $\hat{=}$ 1148°F		•	•	•								•					
640°C $\hat{=}$ 1184°F	•	•	•	•								•					
660°C $\hat{=}$ 1220°F					•							•					
680°C $\hat{=}$ 1256°F	•				•							•					
700°C $\hat{=}$ 1292°F		•			•							•					
750°C $\hat{=}$ 1382°F	•	•			•							•					
800°C $\hat{=}$ 1472°F			•		•							•					
850°C $\hat{=}$ 1562°F	•		•		•							•					
900°C $\hat{=}$ 1652°F		•	•		•							•					
950°C $\hat{=}$ 1742°F	•	•	•		•							•					
1000°C $\hat{=}$ 1832°F				•	•							•					
1050°C $\hat{=}$ 1922°F	•			•	•							•					
1100°C $\hat{=}$ 2012°F		•		•	•							•					
1150°C $\hat{=}$ 2102°F	•	•		•	•							•					
1200°C $\hat{=}$ 2192°F			•	•	•							•					
1250°C $\hat{=}$ 2282°F	•		•	•	•							•					
1300°C $\hat{=}$ 2372°F		•	•	•	•							•					
1350°C $\hat{=}$ 2462°F	•	•	•	•	•							•					

En nuestro caso, activaremos los switches 2 y 4 para seleccionar un rango superior de 100°C.

## 2.5. PROGRAMA PLC

















## PANTALLA 1: CONTROL PID

Desde esta pestaña se controlan todas las variables relacionadas con el PID.

El pulsador “Ventilador” está asociado a la variable “Ventilador\_SCADA” y controla la activación y desactivación del ventilador. Actúa como telerruptor.

Los pulsadores “inicio file” y “paro file” inician y terminan la grabación del SP, PV y OUT en un documento de texto.

El campo de entrada numérico “Setpoint” está asociado a la variable “Setpoint\_PID” y desde este se introduce el punto en el que queremos que se establezca la temperatura.

El visor numérico “Input” está asociado a la variable “Temperatura\_Pt100” y muestra la temperatura que está midiendo la sonda de temperatura en °C.

El campo de entrada numérico “ManualValue” está asociado a la variable “Manual\_Value\_PID” y sirve para introducir el porcentaje de activación de la salida del PID cuando este está funcionando en modo manual.

El pulsador “Stop” está asociado a la variable “Reset\_PID” y sirve para poner el PID en estado inactivo (modo de funcionamiento 0).

El pulsador “Activate” está asociado a la variable “Mode\_Activate\_PID” y sirve para introducir en el PID el modo de funcionamiento seleccionado desde “Mode”.

El campo de entradas “Mode” está asociado a la variable “Modo\_PID” y muestra el contenido de la lista de textos “Modos\_PID”. Sirve para introducir el modo de funcionamiento en que queremos que funcione el PID.

El visor numérico “Output” está asociado a la variable “Salida\_PID” y muestra el porcentaje de activación de la salida del PID.

El visor numérico “State” está asociado a la variable “State\_PID” y muestra el estado en el que se encuentra actualmente el PID.

El piloto “Error” está asociado a la variable “Error\_PID” e indica si el PID se encuentra en error.

El visor numérico “ErrorBits” está asociado a la variable “ErrorBits\_PID” y muestra el código de error (en hexadecimal) en el que se encuentra el PID.

Los campos de entrada numéricos “K”, “Ti” y “Td” están asociados a las variables “PID.Retain.CtrlParams.Gain”, “PID.Retain.CtrlParams.Ti” y “PID.Retain.CtrlParams.Td” respectivamente, y sirven para ver e introducir la ganancia, tiempo integral y tiempo derivativo del PID.

El interruptor “Salida PWM” está asociado a la variable “Activar\_PWM\_SCADA” y sirve para conmutar entre salida analógica (OFF) y salida PWM (ON).

El campo de entrada numérico “Tiempo Algoritmo” está asociado a la variable “PID.Retain.CtrlParams.Cycle” y sirve para introducir el tiempo que dura un ciclo de la salida PWM, que es la suma del tiempo que se mantiene la salida encendida y el que se mantiene apagada.

Los campos de entrada numéricos “T\_On” y “T\_Off” están asociados a las variables “PID.Config.MinimumOnTime” y “PID.Config.MinimumOffTime” respectivamente, y sirven para introducir el mínimo tiempo que la salida PWM debe estar activa e inactiva cada ciclo.

El pulsador “Gráficos” sirve para cambiar a la pantalla “Gráficos”.

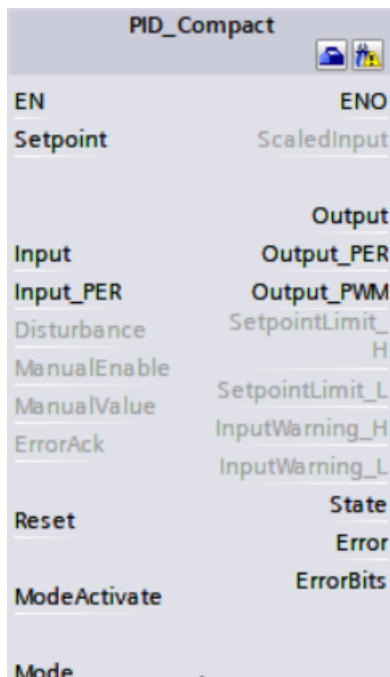
PANTALLA 2: GRÁFICOS



Desde esta pantalla se puede observar una gráfica que muestra la evolución de la temperatura medida, el punto de consigna y las salidas analógica y PWM en el tiempo. Además, pulsar el botón “Control” cambia a la pantalla “Control”.

## 2.7. EXPLICACIÓN FUNCIÓN PID EN TIA PORTAL

Esta es la función PID\_Compact en TIA Portal:



### PARÁMETROS DE ENTRADA

**Setpoint:** Valor en el que queremos que se estabilice la magnitud que vamos a controlar, introducida en la unidad de la magnitud.

**Input:** Entrada de la variable de proceso. Esta entrada recibe una variable interna previamente escalada (si es necesario).

**Input\_PER:** Entrada de la variable de proceso. Esta entrada recibe la señal de una entrada analógica física y realiza el escalado internamente.

**ManualEnable:** El PID se mantiene activo en modo manual mientras esta entrada esté en TRUE.

**ManualValue:** Porcentaje de activación de la salida cuando el PID trabaja en modo manual.

**Reset:** Renicia el PID y lo mantiene inactivo mientras esta entrada esté en TRUE.

**ModeActivate:** En el flanco de subida, cambia el modo de funcionamiento del PID al introducido en el parámetro de entrada "Mode".

**Mode:** Modo del PID deseado (no se introduce hasta el flanco de subida en la variable "ModeActivate"). Los modos pueden ser Inactivo (0), Optimización Inicial (1), Optimización fina manual (2), automático (3), manual (4) y valor de salida sustitutivo con vigilancia de errores (5).

---

## PARÁMETROS DE SALIDA

**ScaledInput:** Valor de proceso escalado en función del escalado interno del PID cuando estamos utilizando Input\_PER.

**Output:** Salida porcentual del PID de [0..100]% (desde la configuración se puede configurar el rango).

**Output\_PER:** Salida de bits del PID. Recibe una salida analógica física y actúa según el escalado interno del PID.

**Output\_PWM:** Salida PWM del PID. PWM (Pulse Width Modulation) es un tipo de señal digital que simula ser una analógica variando la amplitud de los pulsos de una señal digital pulsativa.

**State:** Modo de funcionamiento actual del PID.

**Error:** Indica si el PID está en error o no.

**ErrorBits:** Indica el identificador del error del PID en hexadecimal.

---

## COMO CAMBIAR EL MODO DE TRABAJO

Para cambiar el modo de trabajo, primero tenemos que introducirlo en el parámetro "Mode". Esto no pondrá el PID en el modo que seleccionemos. A continuación, tendremos que activar el parámetro "ModeActivate". En el flanco de subida, este parámetro introducirá en el PID. Para comprobar que el modo se ha introducido correctamente, podemos comprobar que en el parámetro de salida "State" esté el modo de funcionamiento deseado.

---

## INTRODUCCIÓN DE TI, TD Y K

En el árbol de proyecto, podremos encontrar la instancia del PID en la ruta "Bloques de programa -> Bloques de sistema -> Recursos de programa". Si accedemos a ella, veremos todas las variables del PID. Los parámetros Ti, Td y k tienen cada uno su propia variable:

k -> Static.Retain.CtrlParams.Gain

Ti -> Static.Retain.CtrlParams.Ti

Td -> Static.Retain.CtrlParams.Td

En nuestro caso, modificamos las variables mediante campos de entrada numéricos desde SCADA. Estas variables son de entrada y salida, y pueden ser escritas tanto por el usuario como por el propio PID (por ejemplo, al realizar un autotuning). Por tanto, los campos de entrada numéricos a los que estén asociados deben ser del tipo "Entrada/Salida".

## 2.8. CONFIGURACIÓN DEL PID

### AJUSTES BÁSICOS

En “Tipo de regulación” indicamos que la regulación será de temperatura en °C y en “Parámetros de entrada/salida” indicamos que vamos a trabajar con los parámetros “Input” y “Output”, que son los que reciben variables internas.

The 'Ajustes básicos' window is divided into two main sections. The top section, 'Tipo de regulación', contains a dropdown menu set to 'Temperatura', a unit dropdown set to '°C', an unchecked checkbox for 'Invertir sentido de regulación', a checked checkbox for 'Activar Mode tras rearrancar la CPU', and a 'Poner Mode a:' dropdown set to 'Modo manual'. The bottom section, 'Parámetros de entrada/salida', shows a 'Setpoint' input field with a graph icon, an 'Input' dropdown set to 'Input' with a graph icon, and an 'Output' dropdown set to 'Output' with a graph icon. A central graph icon connects the input and output fields.

### AJUSTES DEL VALOR REAL

En “Límites del valor real” dentro indicaremos el rango de la variable de entrada al PID. En “Escala del valor real” indicaríamos el escalado interno si usáramos los parámetros “Input\_PER” y “Output\_PER”, que no es el caso.

The 'Ajustes del valor real' window has two sections. The top section, 'Límites del valor real', shows 'Límite superior del valor real' set to 100.0 °C and 'Límite inferior del valor real' set to 0.0 °C. To the right is a graph of a blue S-shaped curve on a coordinate system with temperature (°C) on the y-axis and time (t) on the x-axis. The bottom section, 'Escala del valor real', shows 'Input\_PER' set to 'Desactivado'. It also shows 'Valor real superior escalado' set to 100.0 °C and 'Valor real inferior escalado' set to 0.0 °C. To the right is a graph of a blue straight line on a coordinate system with temperature (°C) on the y-axis and 'Input\_PER' on the x-axis. The x-axis has labels '0.0' (Abajo) and '27648.0' (Arriba). At the bottom is an 'Ajuste automático' button.

## AJUSTES AVANZADOS

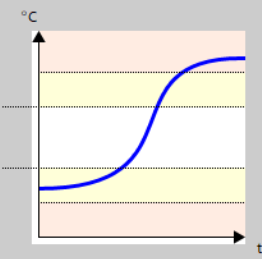
En “Limitaciones PWM” están los parámetros T\_On y T\_Off que modificamos desde SCADA y que controlan el mínimo tiempo de ON y OFF de la salida de PWM por cada ciclo. En “Límites del valor de salida” se puede limitar porcentualmente el rango de la salida (útil cuando se trabaja con Input\_PER y Output\_PER). En “Parámetros PID” están k, Ti, Td y el tiempo de muestreo (entre otros), que son variables que controlamos desde SCADA.

**Ajustes avanzados**

**Monitorización del valor real**

Lím. sup. advertencia: 3.402822E+38 °C

Lím. inf. advertencia: -3.402822E+38 °C



**Limitaciones PWM**

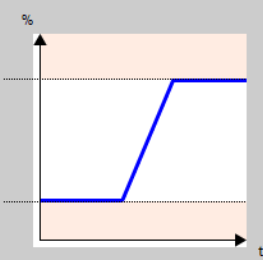
Tiempo conexión mín: 0.0 s

Tiempo desconex. mín: 0.0 s

**Límites del valor de salida**

Lím. sup. valor de salida: 100.0 %

Lím. inf. valor de salida: 0.0 %



**Comportamiento en caso de error**

Poner Output a: Valor de salida sustitutivo mientras dure el error

Valor de salida sustitutivo: 0.0 %

**Parámetros PID**

☒ Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 1.0

Tiempo de integración: 20.0 s

Tiempo derivativo: 0.0 s

Coefficiente retardo derivativo: 0.2

Ponderación de la acción P: 1.0

Ponderación de la acción D: 1.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 2.0 s

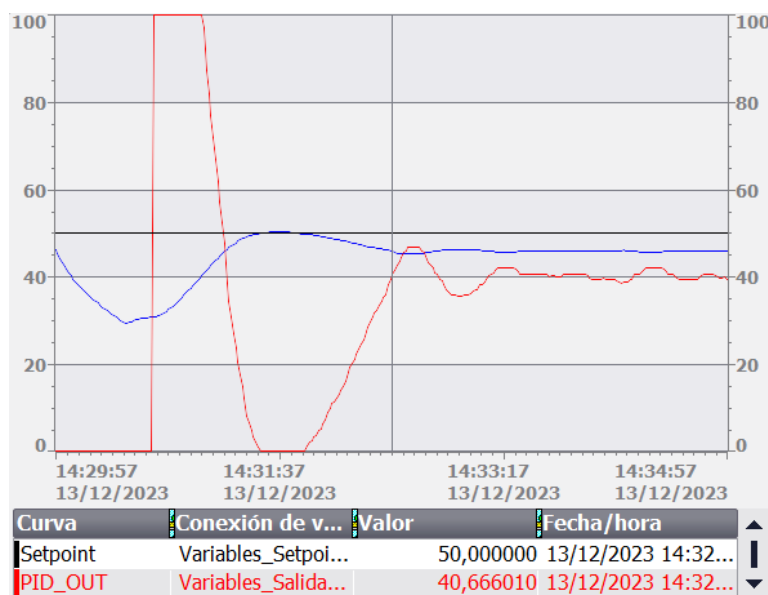
**Regla para la optimización**

Estructura del regulador: PID



## 2.9. PRIMER CONTROL PROPORCIONAL

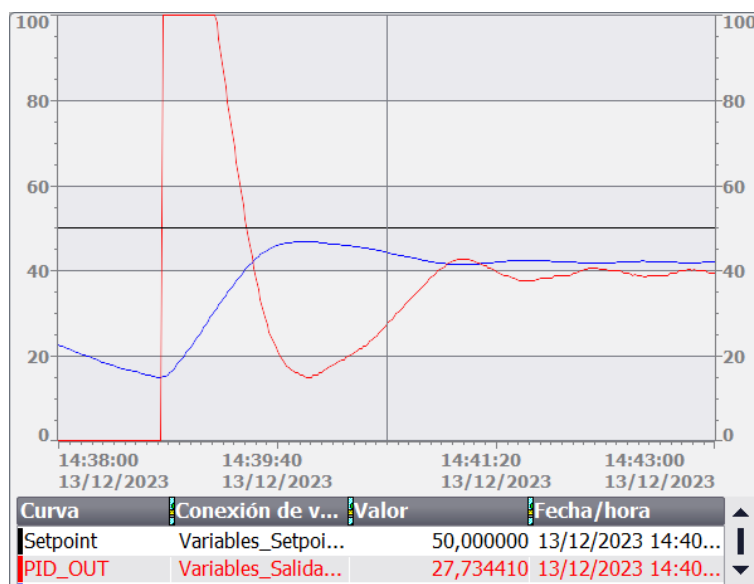
Esta es la gráfica de la evolución de un control proporcional con  $k = 10$  y  $SP = 50$ .



Se puede observar que la temperatura se estabiliza en un punto inferior a SP, aproximadamente a 46°C.

## 2.10. SEGUNDO CONTROL PROPORCIONAL

Esta es la gráfica de la evolución de un control proporcional con  $k = 5$  y  $SP = 50$ .

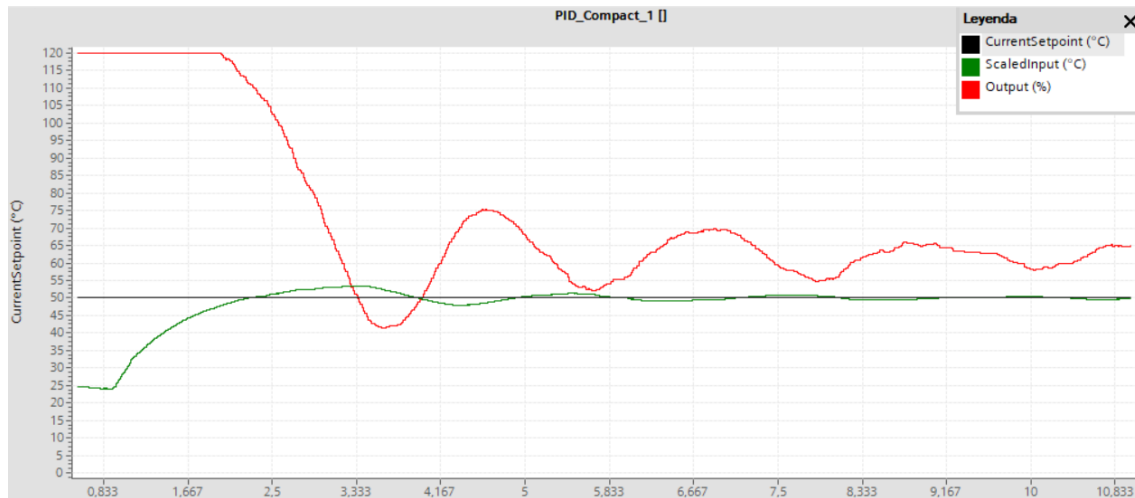


Se puede observar que el sistema tarda más en estabilizarse y además hay menos oscilaciones. Esto es debido a que, al disminuir  $k$  a la mitad, la banda proporcional aumenta el doble, por lo que la salida de control empieza a bajar del 100% en un punto más alejado de SP.

También se puede observar que la temperatura se estabiliza en un punto más alejado de SP respecto a la anterior gráfica. Esto es porque, en un control proporcional, la temperatura se estabiliza en un punto dentro de la banda proporcional e inferior a SP. Si la banda proporcional es mayor, el punto donde empieza está más alejado de SP.

### 2.11. PRIMER CONTROL PI

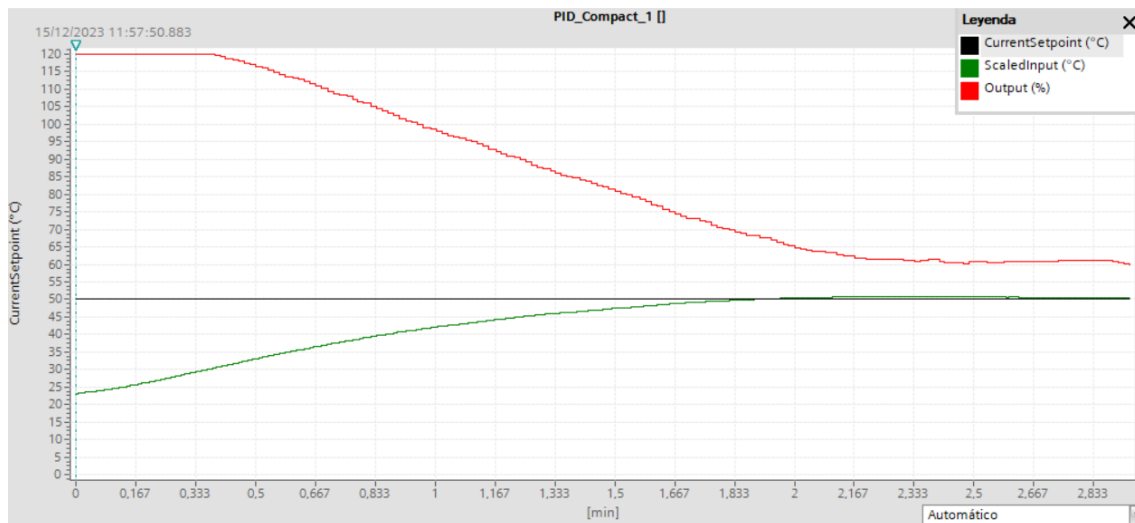
Esta es la gráfica de la evolución de un control PI con  $k = 5$ ,  $T_i = 20$  y  $SP = 50$ .



Se puede observar que la temperatura ahora se estabiliza en el SP, a diferencia de con el control P.

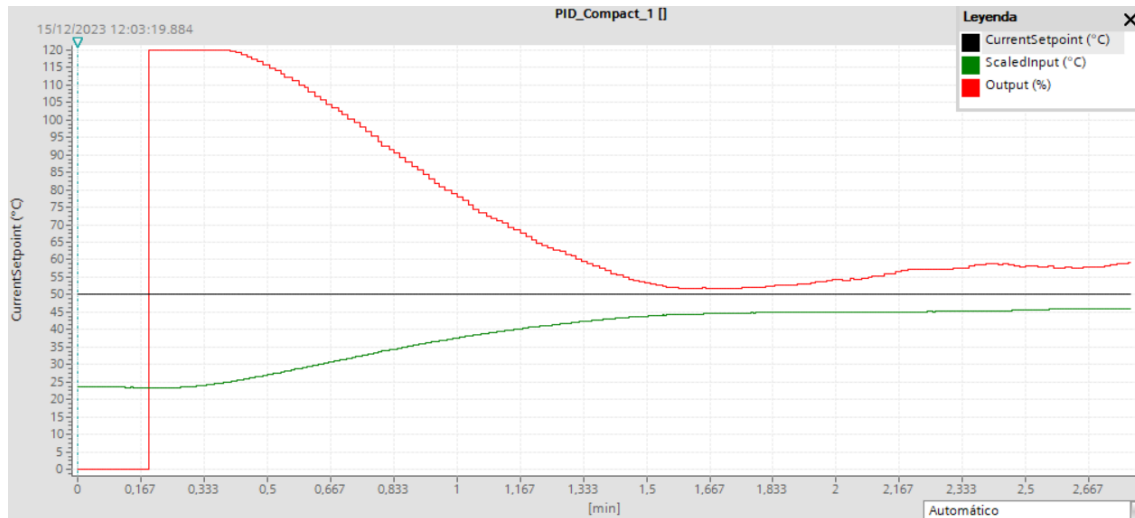
### 2.12. SEGUNDO Y TERCER CONTROL PI

Esta es la gráfica de la evolución de un control PI con  $k = 5$ ,  $T_i = 60$  y  $SP = 50$ .



Se puede observar que la temperatura tarda mucho más en estabilizarse respecto a la anterior gráfica, pero no hay oscilaciones. Esto es debido a una acción integral poco pronunciada.

Esta es la gráfica de la evolución de un control PI con  $k = 5$ ,  $T_i = 120$  y  $SP = 50$ .



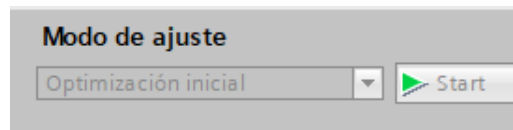
Se puede observar que siguen sin haber oscilaciones, pero la temperatura ya no se estabiliza en SP. Esto es debido a una acción integral muy poco pronunciada, provocando que el sistema sea casi como un control proporcional.

De estas gráficas se puede sacar la conclusión de que la acción proporcional tiene más efecto sobre el sistema cuanto menor es el tiempo integral  $T_i$ . Una acción integral demasiado pronunciada provocará un sistema con oscilaciones constantes (error estacionario), mientras que una acción integral demasiado pronunciada provocará un sistema lento, casi siendo un control P en casos extremos.

Por tanto, un buen control PI es aquel en que la temperatura se estabiliza rápido (aunque se pueda generar un error transitorio) sin llegar a generar un error transitorio.

### 2.13. AUTOTUNING

Para activar el autotuning del PID, lo haremos desde la pestaña de “Puesta en servicio”. Desde aquí, en “Modo de ajuste” seleccionaremos “Optimización inicial” y pulsaremos “Start”.



Al pulsar “Start” solo empezará el autotuning si cumplimos los siguientes requisitos:

La instrucción “PID\_Compact” se llama en un OB de alarma cíclica.

ManualEnable = FALSE y Reset = FALSE.

PID está en modo manual, automático o inactivo.

La consigna y el real se encuentran dentro de los límites configurados (apartado 2.8).

SP – Valor\_Real > 30% del fondo de escala de entrada.

SP – Valor\_Real > 50% de SP.

Si al pulsar “Start” se cumplen los requisitos, empezará el autotuning. Es importante evitar perturbaciones durante el proceso. Cuando el proceso termine, el PID escribirá en las variables de k, Ti y Td (apartado 2.7) los valores obtenidos.

Realizamos un autotuning y obtuvimos estos resultados:

k -> 22,78

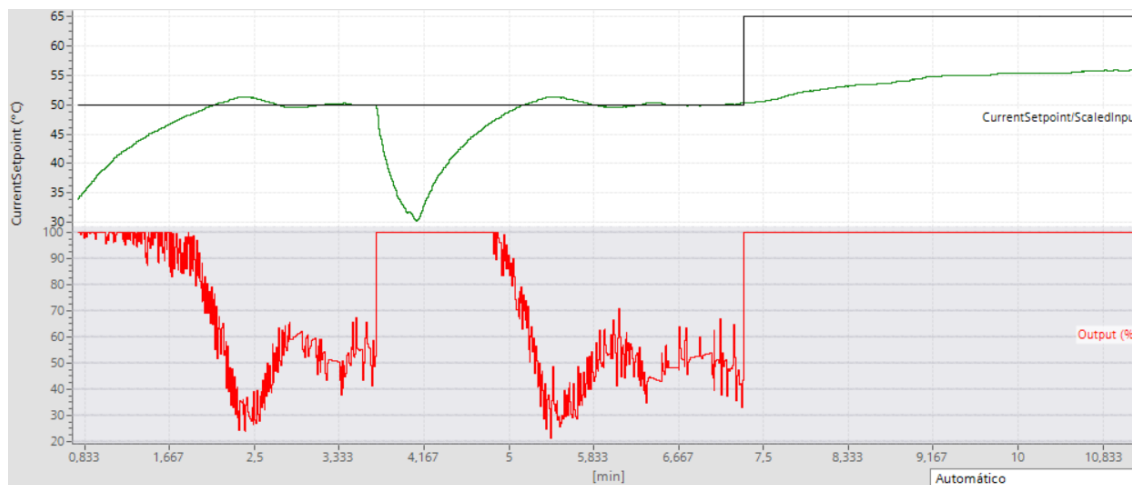
Ti -> 20,64

Td -> 3,61

## 2.14. CONTROL PID

Esta es la gráfica de la evolución de un control PID con los valores obtenidos en el apartado 2.14 y con  $SP = 50$ .

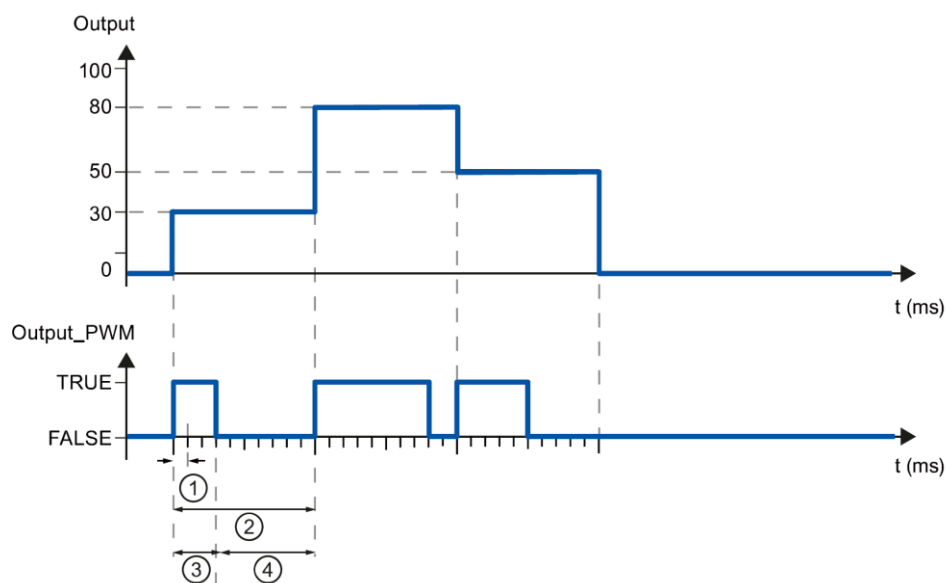
Durante este proceso, primero dejamos que la temperatura se estabilizara en  $50^{\circ}\text{C}$ , luego activamos el ventilador para generar una perturbación y dejamos que se volviera a estabilizar a  $50^{\circ}\text{C}$ . A continuación, cambiamos el SP a  $65^{\circ}\text{C}$ .



Se puede observar que el sistema se estabiliza en un tiempo mínimo y con un error transitorio mínimo. También se puede observar que la resistencia calefactora no consiguió calentar el horno hasta  $65^{\circ}\text{C}$ .

## 2.15. EXPLICACIÓN PID CON SALIDA PWM

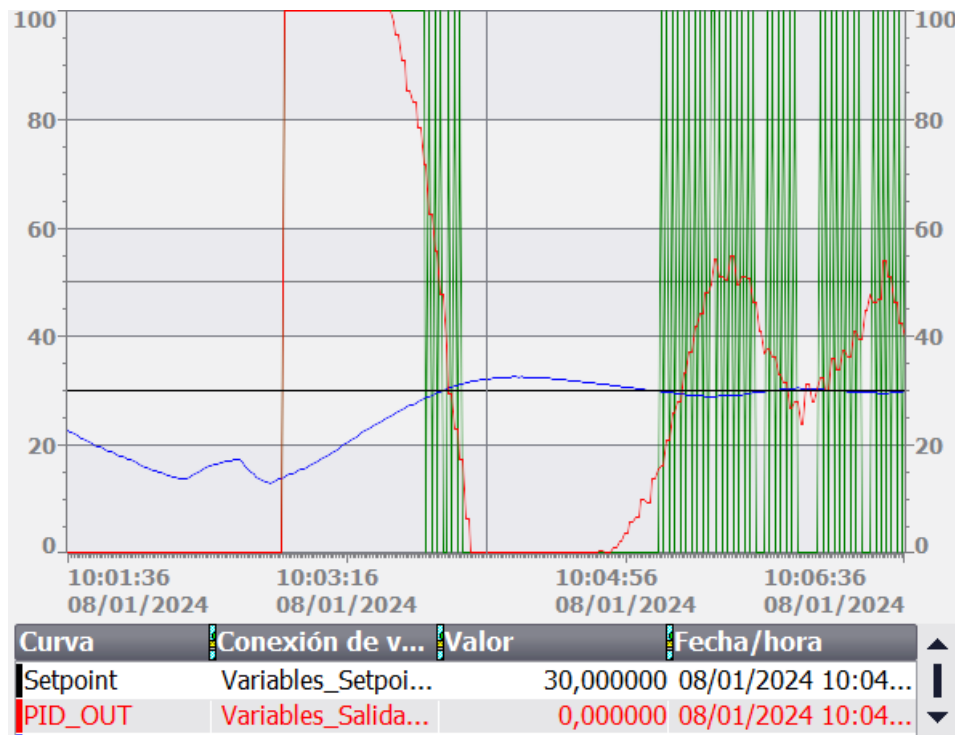
Una salida PWM (Pulse Width Modulation) permite modular de 0% a 100% la salida del PID con una salida digital formando tiempos de conexión y desconexión variables. La suma de estos dos tiempos es el tiempo de ciclo o periodo de control.



(2) es el tiempo de ciclo, que es la suma del tiempo de conexión (3) y el tiempo de desconexión (4).

## 2.16. CONTROL PID CON SALIDA PWM

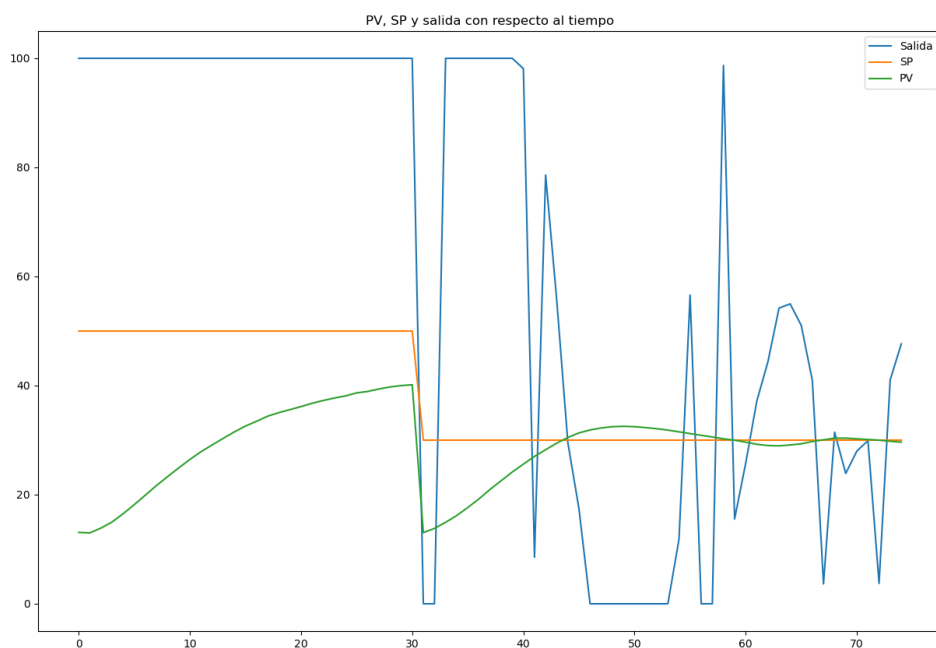
Esta es la gráfica de la evolución de un control PID con salida PWM con los valores obtenidos en el apartado 2.14 y con SP = 50.



En verde se muestra la salida PWM, en rojo la salida analógica, en negro el SP y en azul la temperatura.

## 2.17. DATALOGGING

Esta es una gráfica realizada con Jupyter Notebooks a partir de los datos de un archivo generado por el programa.



## 2.18. CONCLUSIONES Y VALORACIÓN FINAL

Hemos podido observar la importancia de tener un sistema bien calibrado, que se estabilice rápido (aunque se genere un error transitorio) sin generar un error estacionario. Un sistema mal calibrado también puede estabilizar la magnitud a controlar en el valor deseado, pero lo hará de forma más lenta y generando errores estacionarios.

También hemos observado diferentes soluciones para controlar al actuador, que son la salida analógica (tanto la porcentual como la Output\_PER) o por PWM. Mediante estas opciones, hemos podido obtener el mismo resultado actuando sobre elementos digitales y analógicos.