SESIÓN 8

CONTROL AUTOMÁTICO DE SISTEMAS CONTINUOS

INDICE DE CONCEPTOS TEÓRICOS

- Control de sistemas continuos vs control de sistemas de eventos discretos.
- Control en bucle abierto vs control en bucle cerrado.
- Concepto de sistema y variables involucradas: entrada de control, salida, entrada de perturbación.
- Conversión analógica-digital (entrada analógica) y digital-analógica (salida analógica).
- Respuesta en bucle abierto: entrada escalón.
- Conceptos de control en bucle cerrado: referencia, acción de control, perturbación, error.
- Control en bucle cerrado con relé (todo/nada). Tipos de control todo/nada.
- Control en bucle cerrado con PID. Parámetros que definen un PID.
- Comportamiento de un sistema controlado por un PID: rapidez, robustez y amplificación del ruido.
- Técnicas de ajuste experimental de PID basadas en la respuesta ante escalón.
- Técnicas de ajuste experimental de PID basadas en la respuesta en bucle cerrado con relé.
- Implementación del PID en dispositivo programable: periodo de muestreo.

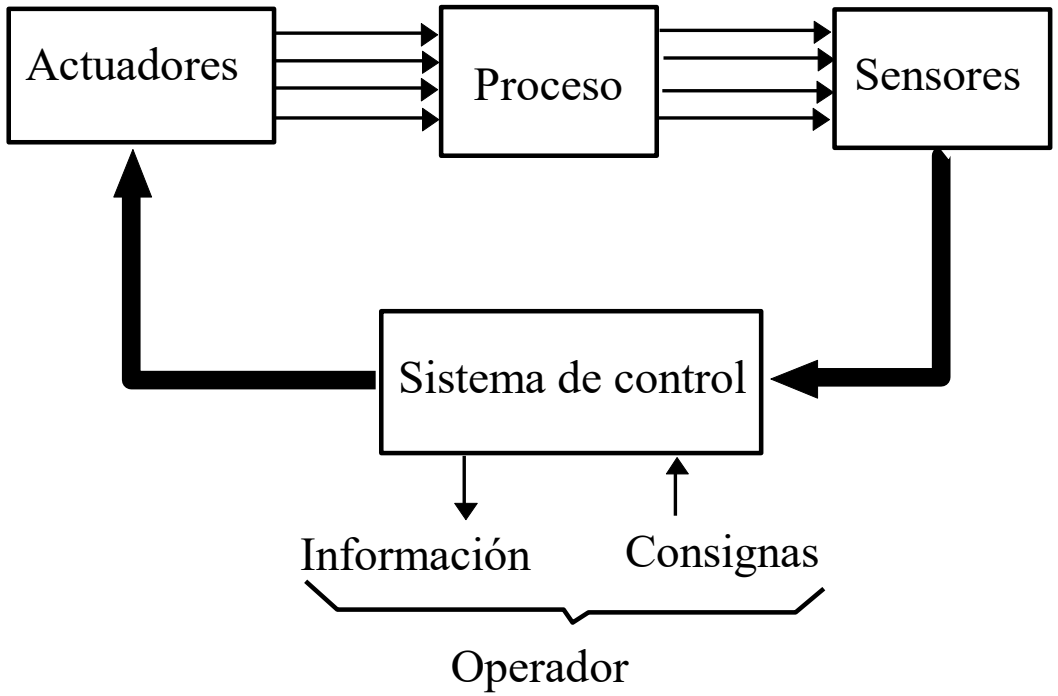
INDICE DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

- Conexión eléctrica de todos los elementos.
- Configuración y programación del PLC para realizar un experimento en bucle abierto, en el que se cambiará la entrada en forma de escalón.
- Configuración y programación del PLC para realizar un control todo/nada tipo relé con histéresis de la temperatura.
- Ajuste experimental de controladores PID a partir de los datos de los experimentos obtenidos.
- Configuración y programación del PLC para realizar un control de la temperatura mediante un controlador PID.
- Prueba de los distintos controladores PID ajustados, verificando la respuesta ante cambios en la referencia y ante una perturbación.

Definición de sistema automatizado

Estructura típica de un sistema automatizado

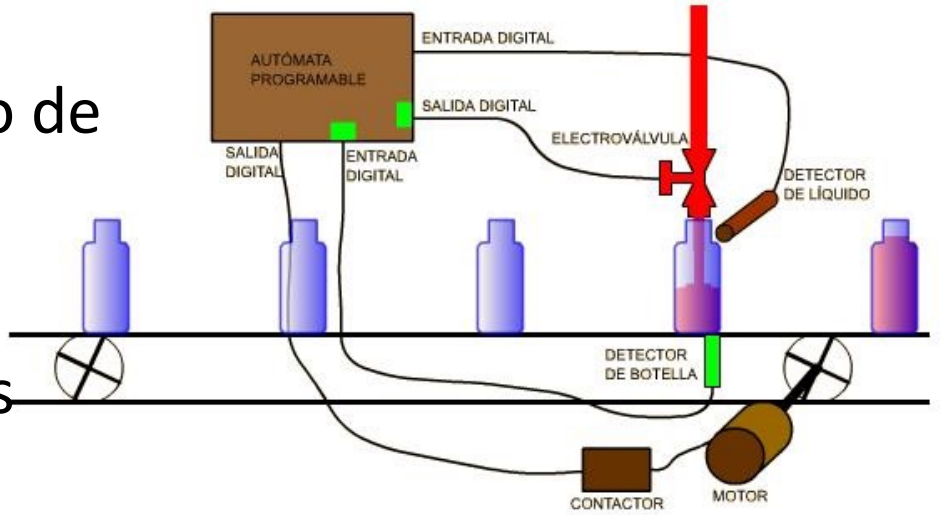
Sistema en bucle cerrado



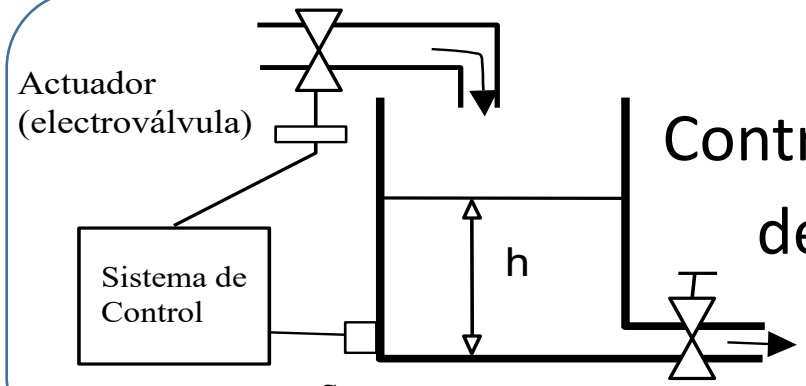
Definición de sistema automatizado

Ejemplos de sistemas automatizados

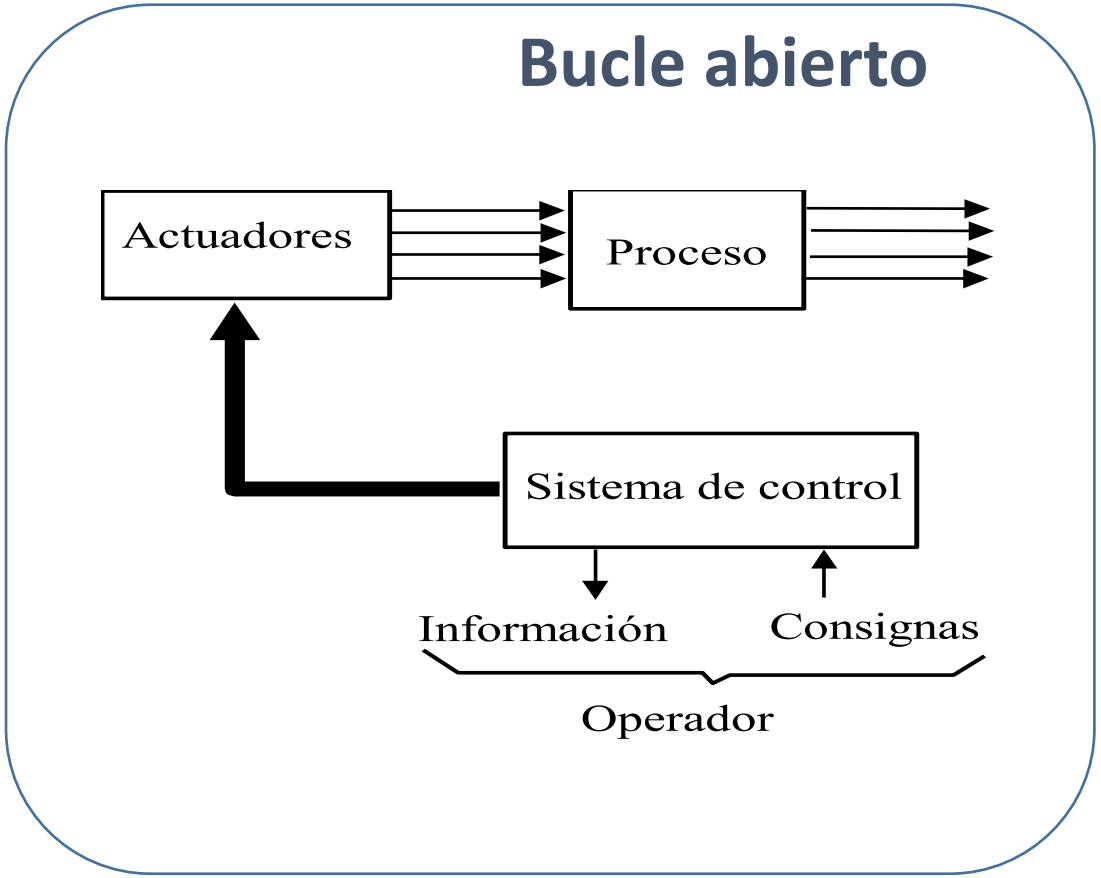
Proceso de llenado de botellas

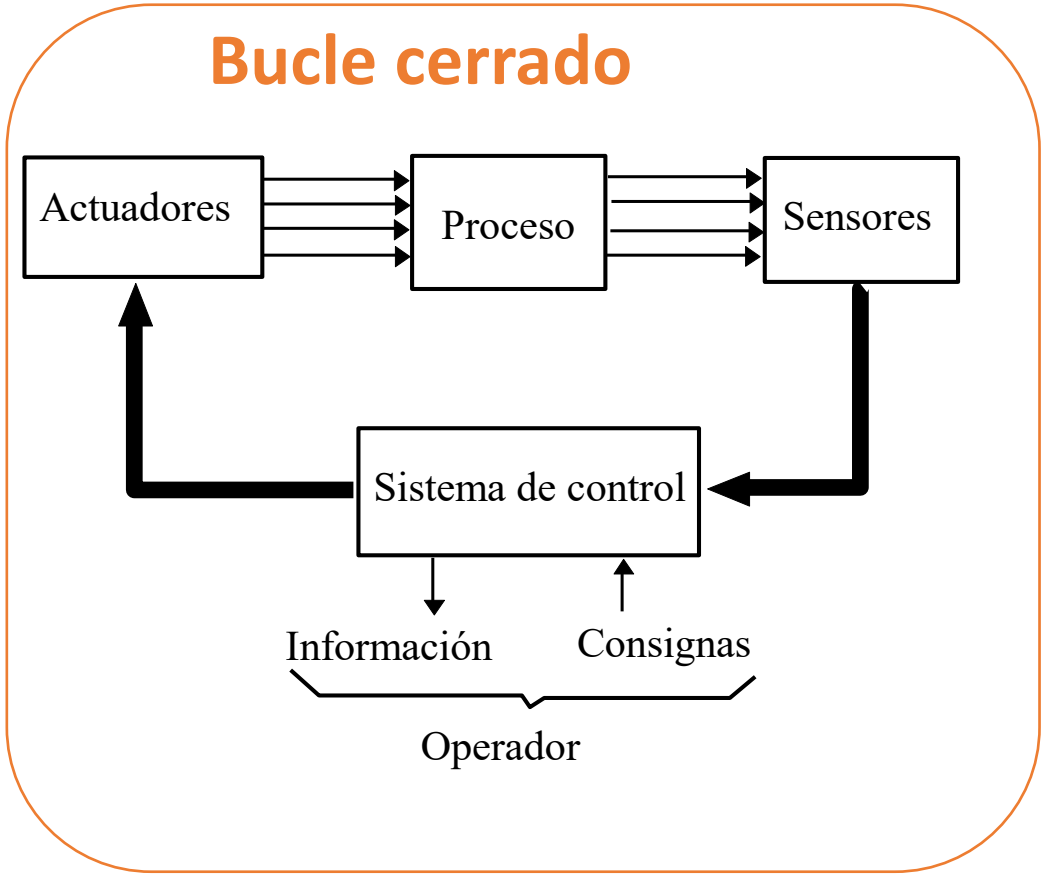


Control de nivel de un tanque



Control en bucle abierto y en bucle cerrado.



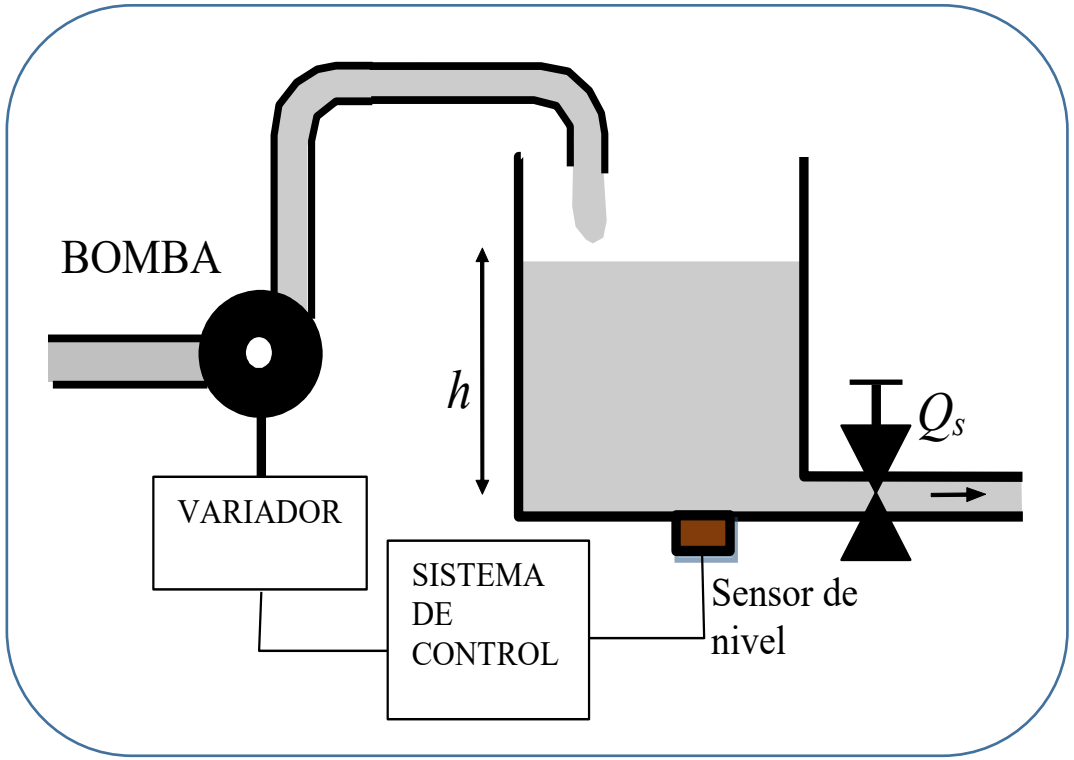


Control continuo - control de eventos discretos

Control de nivel de un depósito

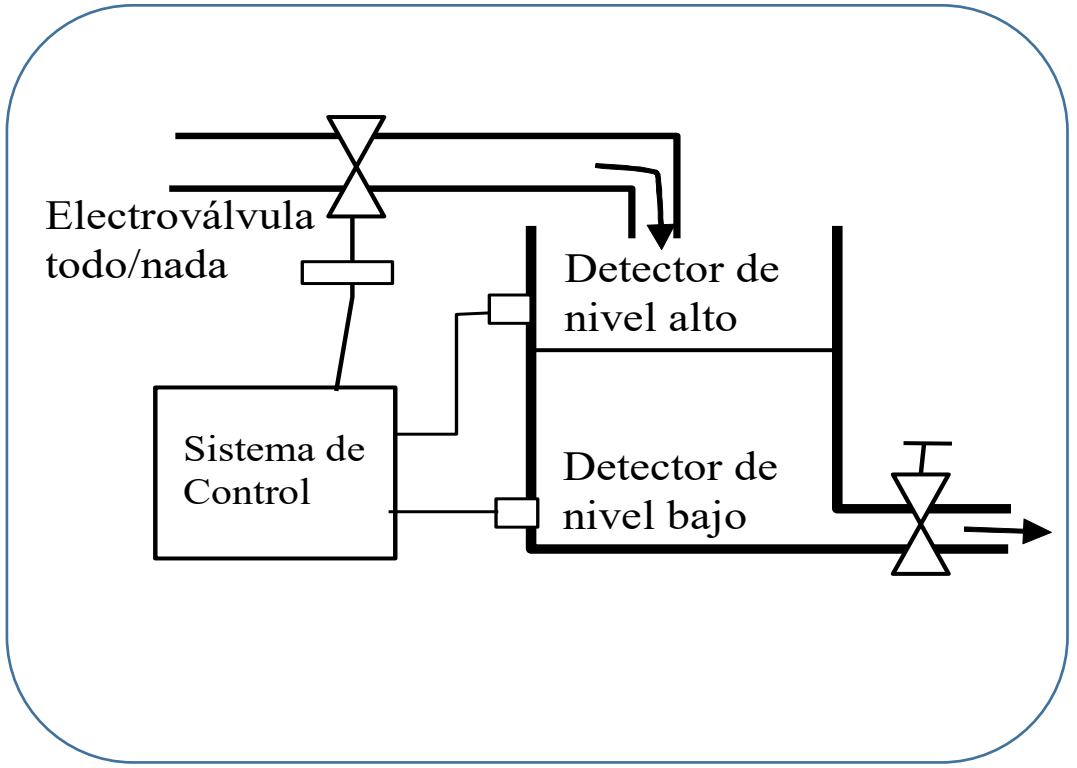
Control continuo:

sensor y actuador continuos



Control de eventos discretos

sensor y actuador binarios (0 ó 1)

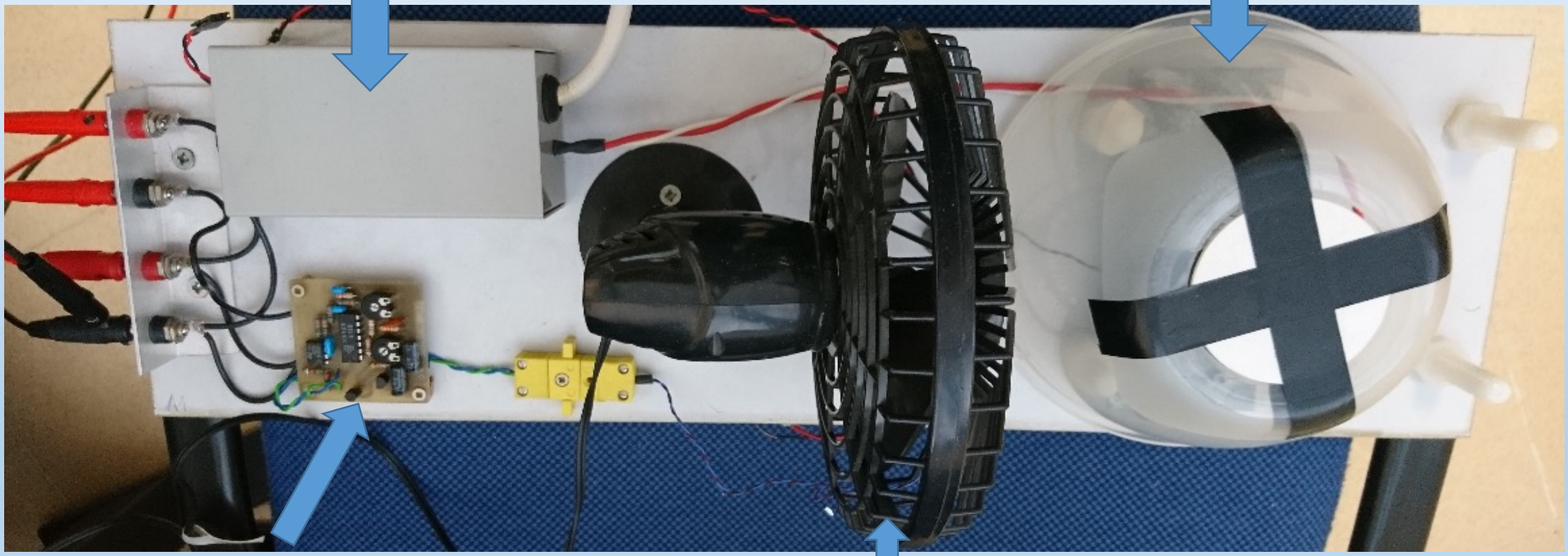


ESQUEMA DE CONEXIONES

Control de temperatura de maqueta de horno:

Amplificador de potencia

Horno con resistencia calefactora



Amplificador de termopar

Ventilador

ESQUEMA DE CONEXIONES

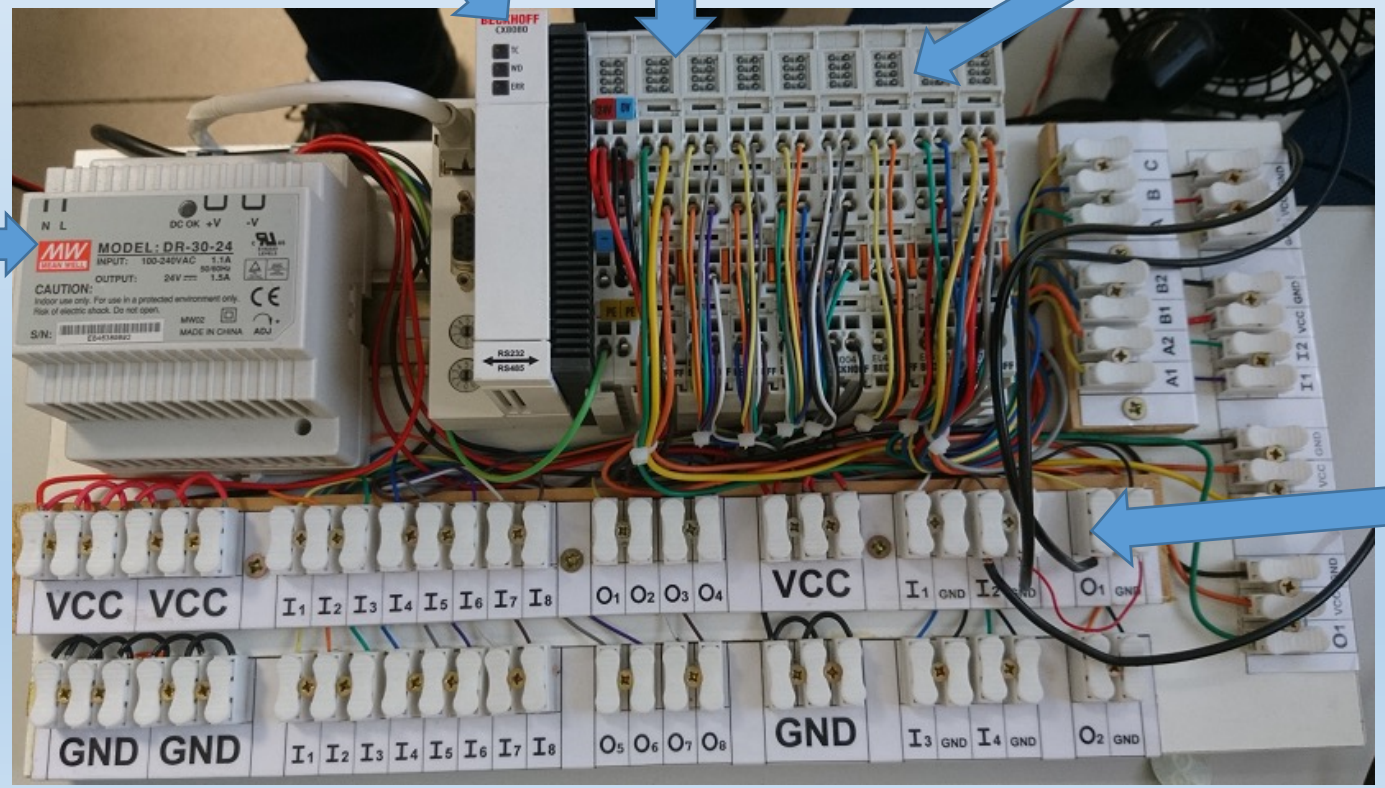
Control de temperatura de maqueta de horno:

CPU

Módulos de entradas y salidas digitales

Módulos de entradas y salidas analógicas

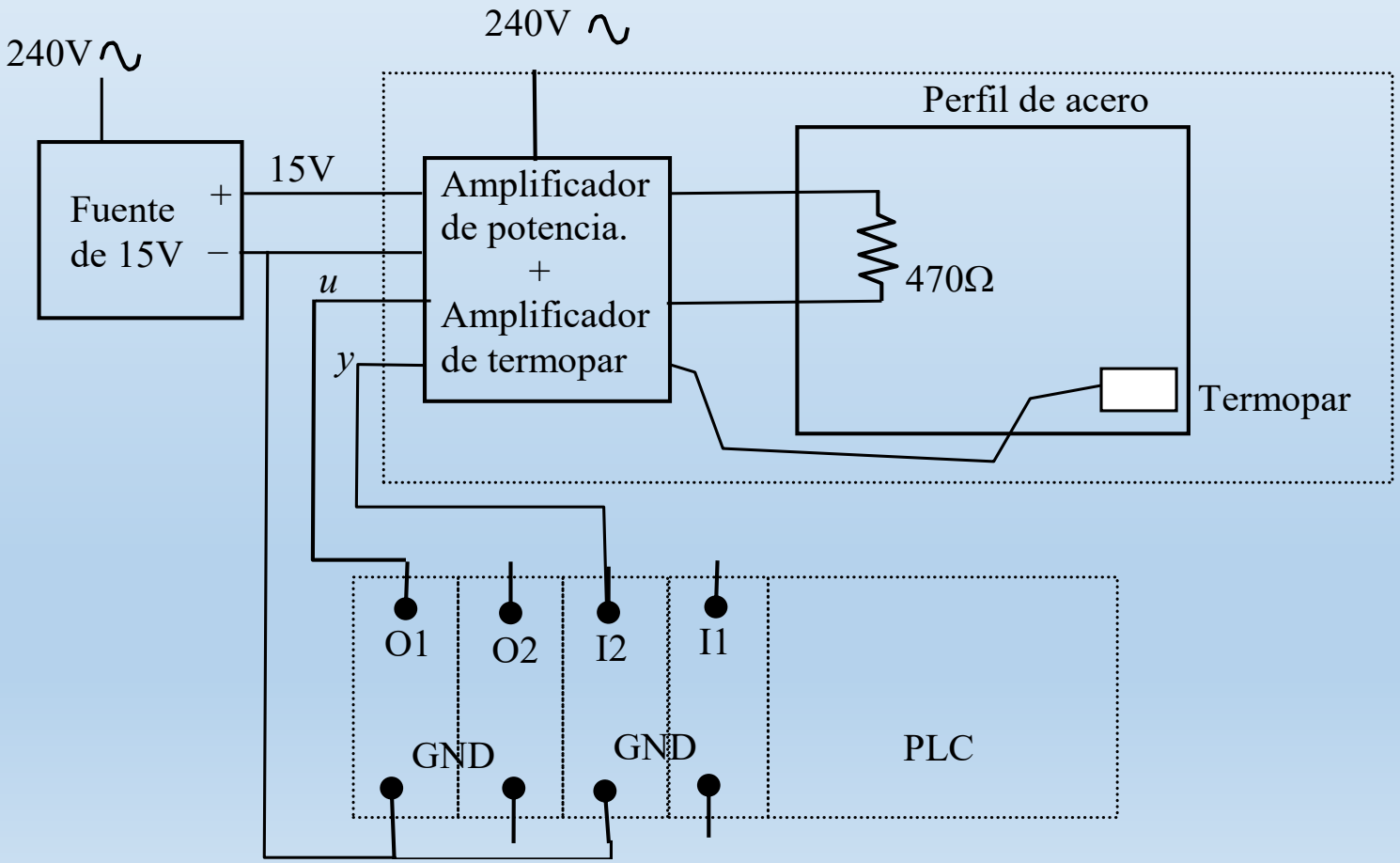
Fuente de alimentación



Borneros de conexión

ESQUEMA DE CONEXIONES

Control de temperatura de maqueta de horno:



PROGRAMACIÓN DEL PLC

En TWINCAT PLC CONTROL:

- Crear un nuevo proyecto (File/new), eligiendo en “Choose target system type”, “CX(ARM)”.
- En New POU, dejar nombre por defecto (MAIN) y elegir lenguaje ST (Texto estructurado).
- Guardar el proyecto con nombre **bucle_abierto.pro.**
- En la sección de arriba del programa se definen las variables:

```
PROGRAM Main
VAR_INPUT
	yent   AT  %I* : INT;
END_VAR
VAR_OUTPUT
	uent AT %Q* : INT;
END_VAR
VAR
	y: LREAL;
	u: LREAL:=3;
	umas : LREAL :=6;
	umenos : LREAL :=3;
END_VAR
```

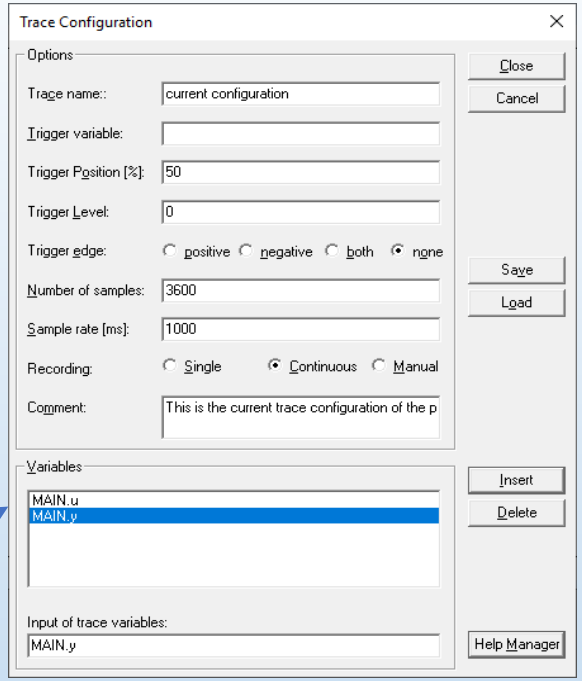
PROGRAMACIÓN DEL PLC

En TWINCAT PLC CONTROL:

- En la sección de abajo se introduce el programa:

  y:=INT_TO_REAL(yent)*100/32767;

  uent:=REAL_TO_INT(u*32767/10);



- En *Resources* (4ª pestaña de abajo a la izqda.), doble click en Sampling Trace. En *Extras/Trace configuration* se configuran las señales que se quieren mostrar: Trigger edge: none, Number of samples: 3600, Samplig rate (ms): 1000, Recording: continuous, Variables: Main.u, Main.y (se buscan con el Help manager).
- En la ventana de Sampling trace se elige para mostrar en la Var 0, Main.u, y en Var1, Main.y.
- Se guarda el proyecto y se compila (Project/Rebuild all).

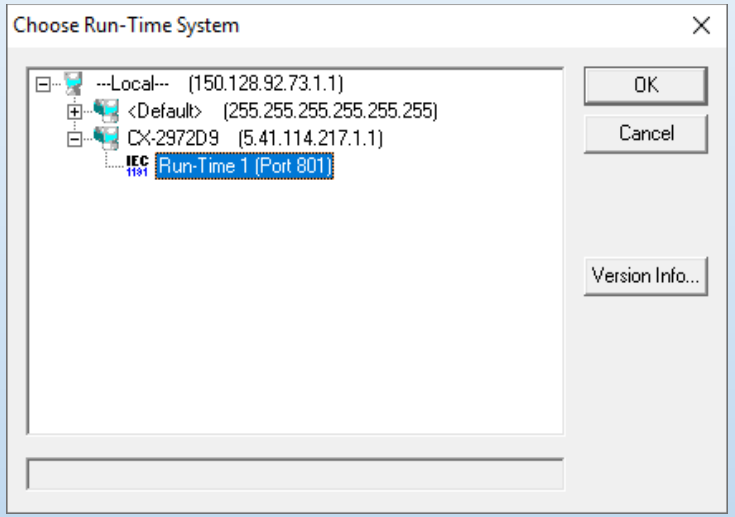
PROGRAMACIÓN DEL PLC

En TWINCAT SYSTEM MANAGER:

- Crear un Nuevo Proyecto (*File/new*). En *System Configuration*: en la pestaña *General*, pulsar el botón *Choose target*, y elegir el PLC (CX-…).
- En *Actions/Set reset Twincat to Configuration mode*.
- En el árbol I/O Devices, con el botón derecho Scan devices para buscar los módulos del PLC.
- En *PLC configuration* con el botón derecho se elige *Append PLC Project*, y se elige el fichero del proyecto guardado antes (bucle_abierto.tpy).
- En el árbol *PLC configuration*, desplegar ramas hasta encontrar *Inputs* y *Outputs*. En *Inputs*, doble click en la variable yent, y se asocia al Value de la entrada analógica 2 del módulo EL3004.
- En *Outputs*, doble click en la variable uent, y se asocia a la salida analógica 1 del módulo EL4002 .
- Se guarda con nombre **bucle_abierto.tsm.**
- En "*Actions/Set reset Twincat to Run mode*".
- Pulsar el botón "Activa la configuración".

PROGRAMACIÓN DEL PLC

<u>En TWINCAT PLC CONTROL:</u>



- En *Online/Choose run time system*. Elegir el PLC:

- En *Online/Login*
- En *Online/Run*
- En la ventana *Sampling trace*, botón derecho del ratón, marcar *Start trace* y después *Auto Read trace*.

- Ahora hay que esperar hasta que la salida se estabilice con la entrada constante u=3 que se ha fijado (unos 20 minutos).

Control de sistemas continuos.

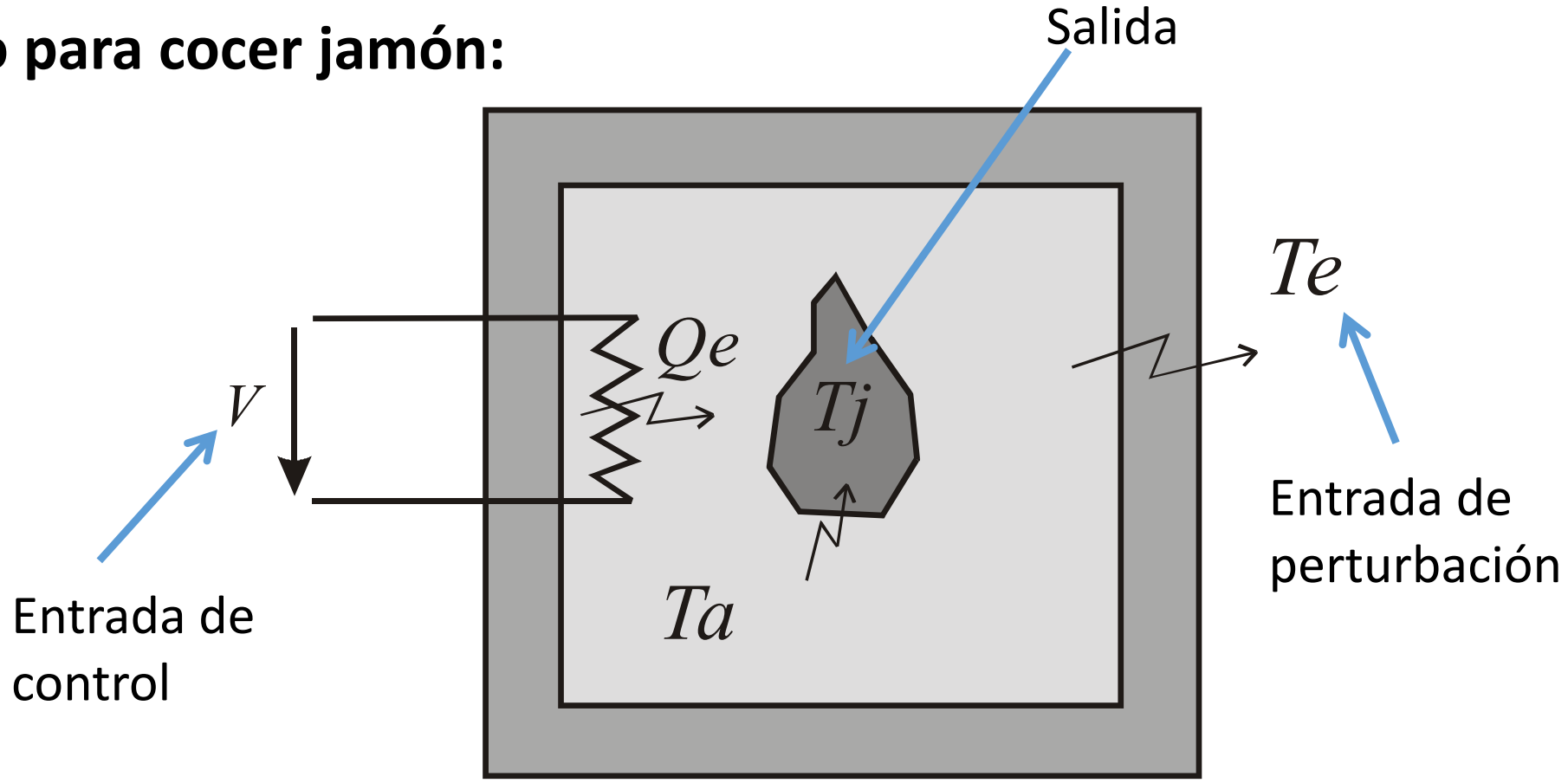
Sistema continuo: Las variables son continuas: toman valores cualesquiera dentro de un rango.

Tipos de variables:

- **Entradas**
  - Variables de control (manipulables)
  - Perturbaciones (no manipulables)
- **Salidas** (variables a controlar)

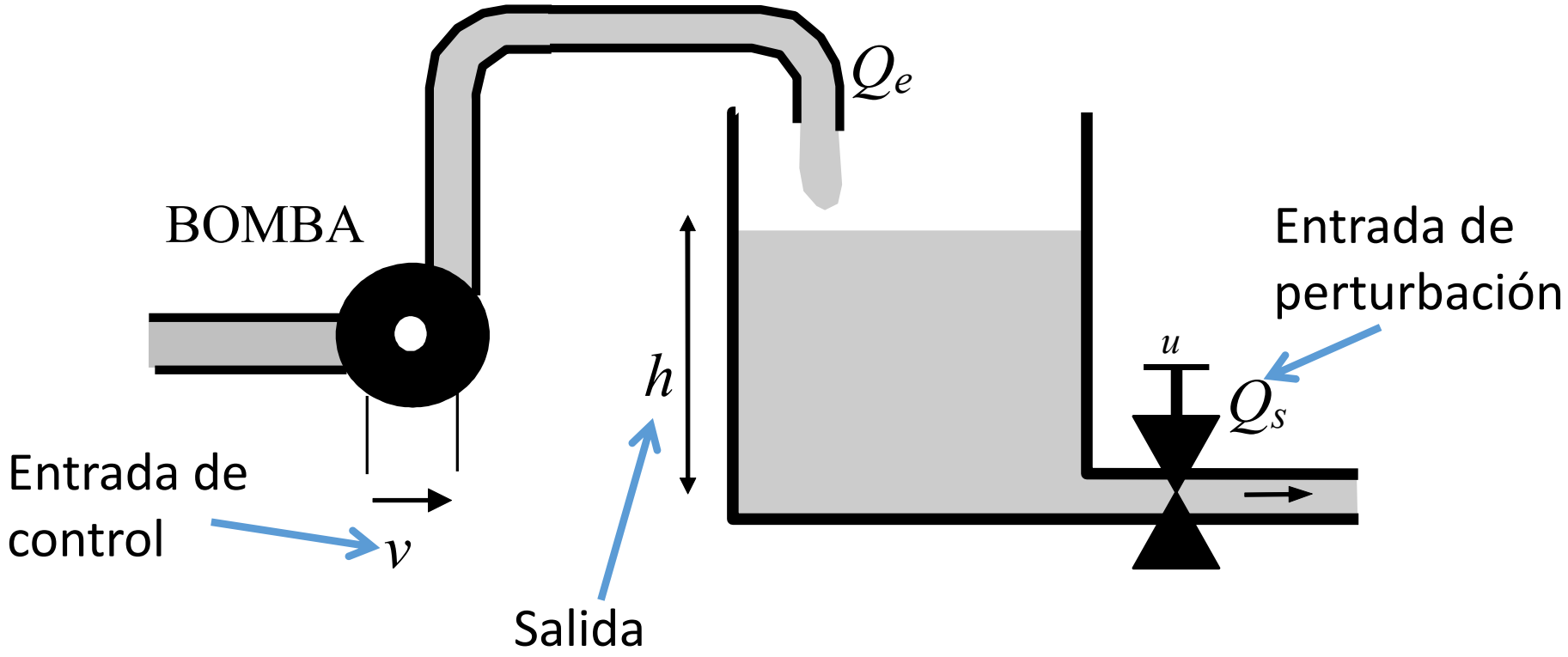
Control de sistemas continuos.

Horno para cocer jamón:



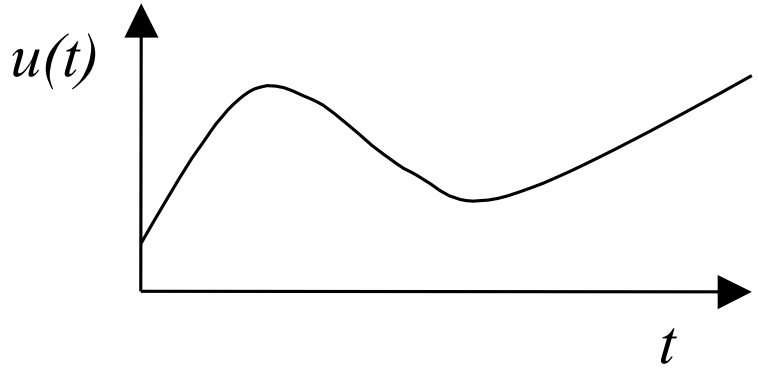
Control de sistemas continuos.

Depósito con bomba de llenado y válvula de vaciado:

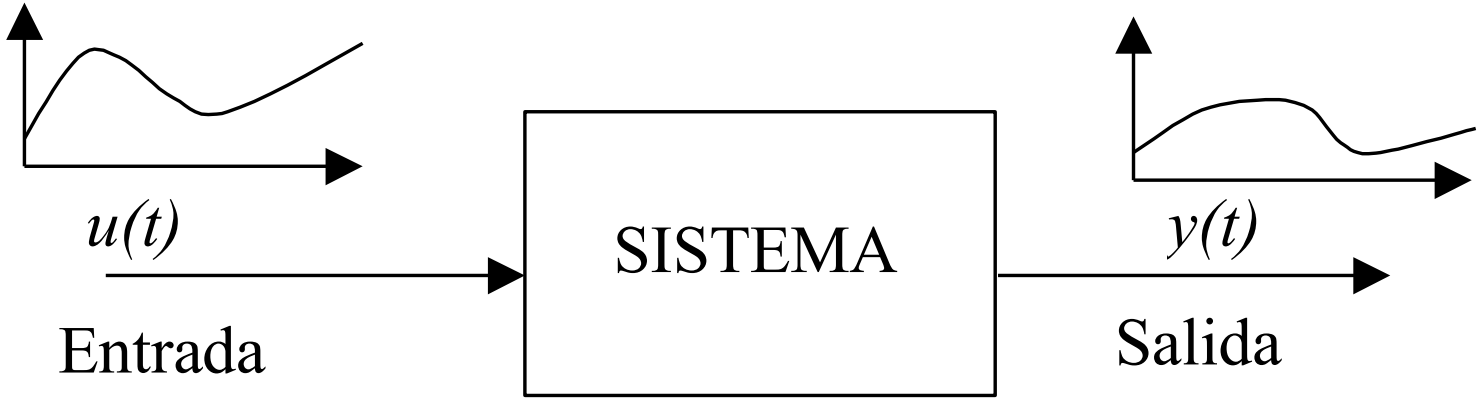


Control de sistemas continuos.

Señal continua: variable que cambia con el tiempo



Sistema como procesador de señales:



Control de sistemas continuos.

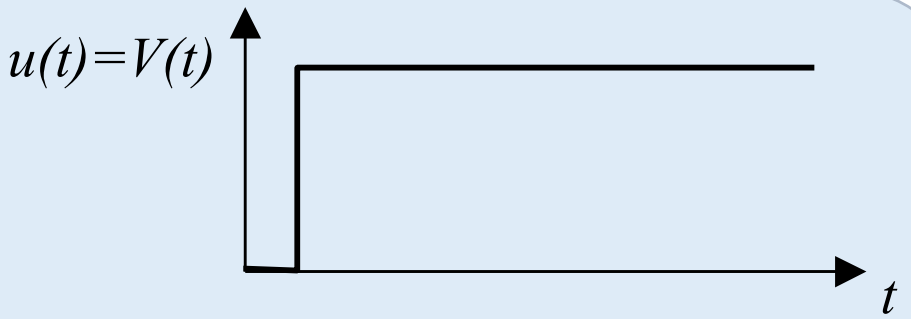
Sistema estático: la salida actual solo depende del valor actual de la señal de entrada.

$$y(t) = f\left(u(t)\right)$$

Sistema dinámico: la salida actual depende de la historia pasada de la señal de entrada.

$$y(t) \neq f\left(u(t)\right)$$

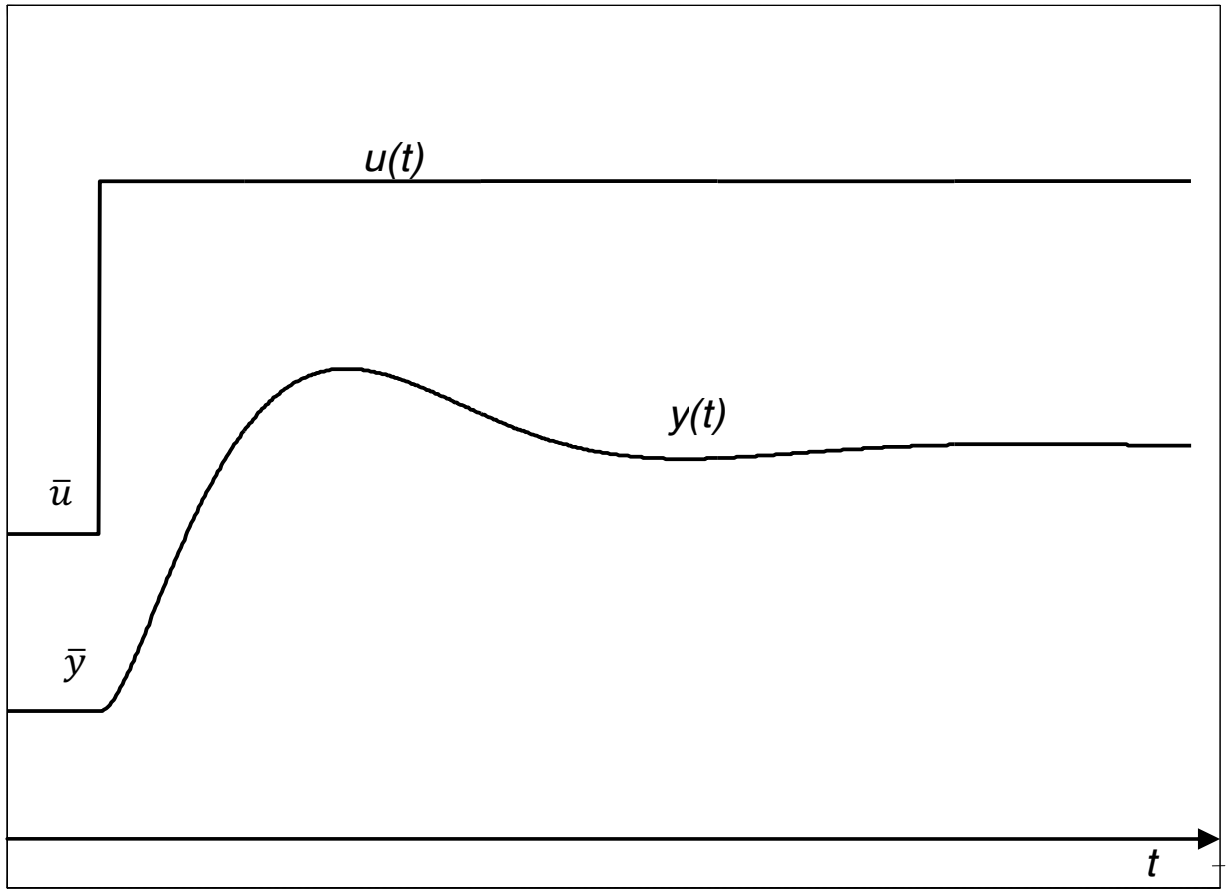
Horno para cocer jamón



Respuesta ante escalón en bucle abierto

Se pone una entrada constante, $\bar{u}$, y se espera hasta que se estabiliza en $\bar{y}$.

A partir del equilibrio $\bar{u}, \bar{y}$, se cambia la entrada:



PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

<u>Experimento de entrada escalón</u>:

- Esperar hasta que la salida se estabilice con la entrada inicial (u=3 V) (unos 20 minutos).
- **Cambiar el valor de u a 6:**
  - Pinchar en el valor de u, cambiarlo a u=6, y pulsar F7.
  - Esperar de nuevo a que se estabilice (otros 20 minutos).

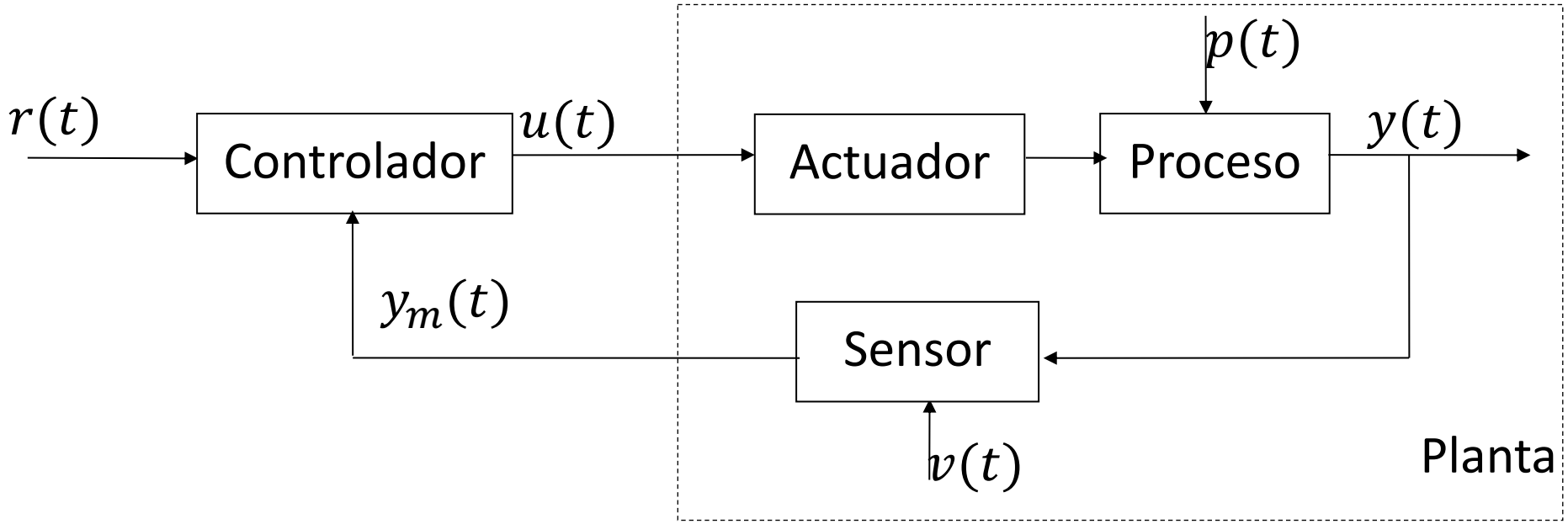
Control de sistemas continuos.

Sistema de control automático:

- Define el valor de la entrada $u(t)$ en cada instante de tiempo
- Trata de conseguir que la salida $y(t)$ tenga la evolución deseada

Sistema de control realimentado

Sistema realimentado:



$r(t)$: Referencia (SP)

$y_m(t)$: Salida medida (PV)

y(t): Salida del proceso

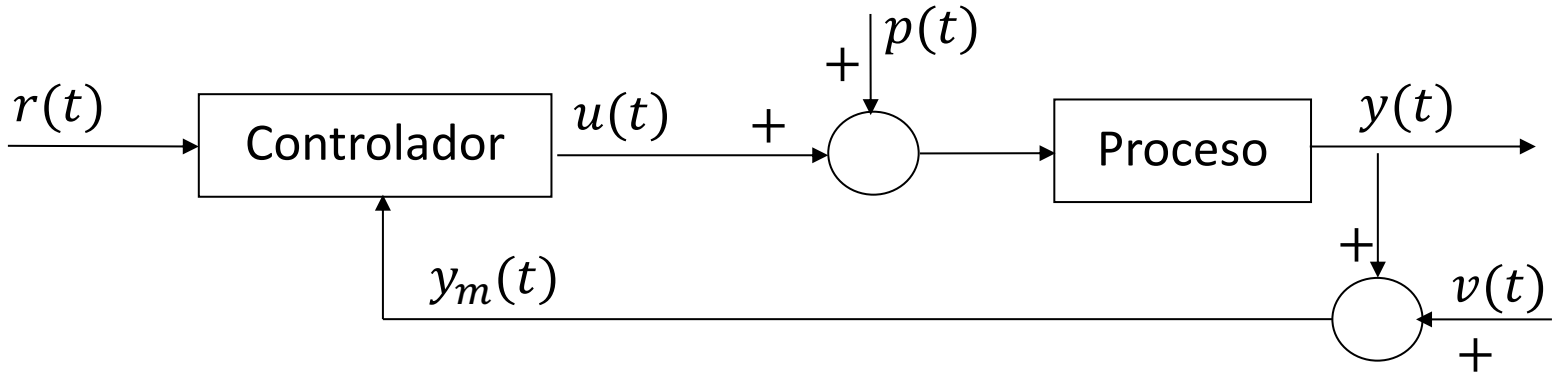
u(t): Acción de control (CO)

$p(t)$: Perturbación

$v(t)$:Ruido de medida

Sistema de control realimentado

Requerimientos de sistema de control:

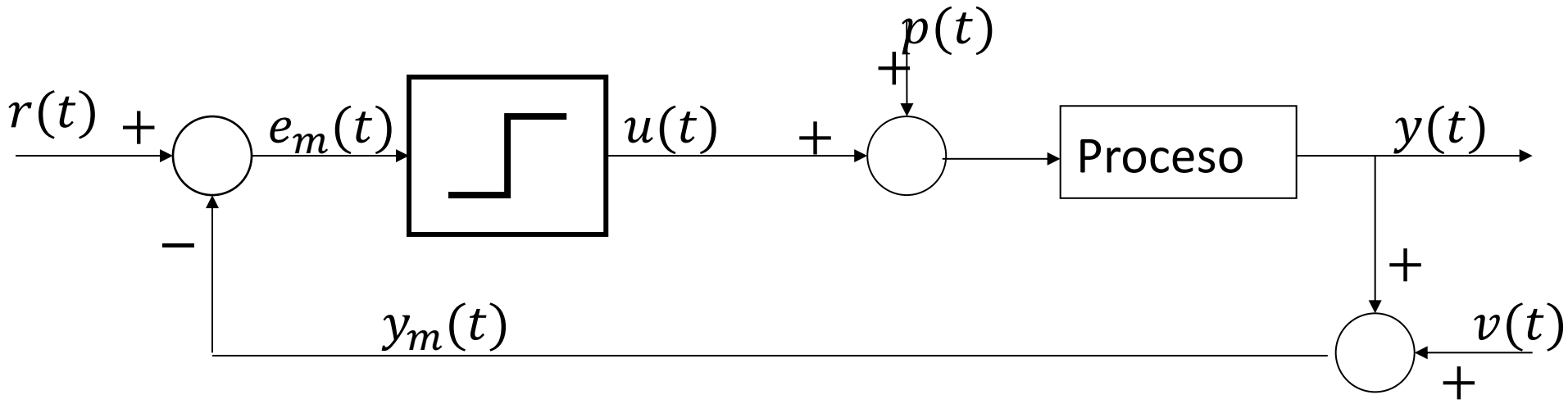


- **Velocidad de respuesta**.
  - ✓ Seguimiento de referencias.
  - ✓ Rechazo de perturbaciones.

- **Atenuación del ruido de medida**.

- **Robustez**.

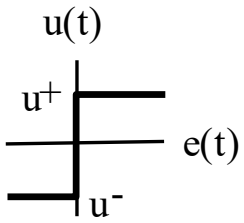
Control todo-nada.

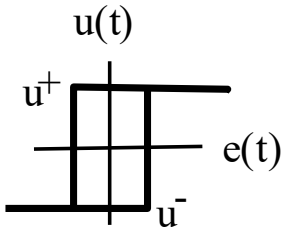


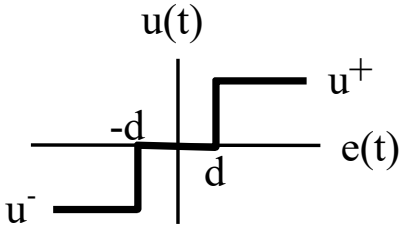
Actuador todo-nada (encendido-apagado)

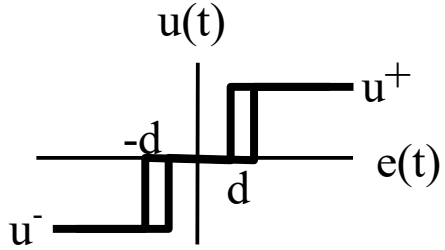
Tipos de relé:

Simple. Con histéresis. Con banda muerta. Con banda muerta e histéresis



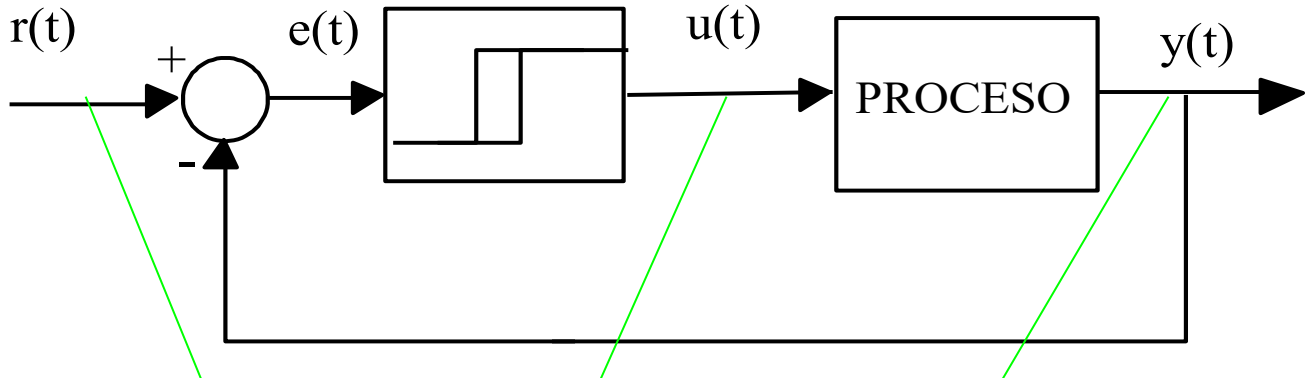


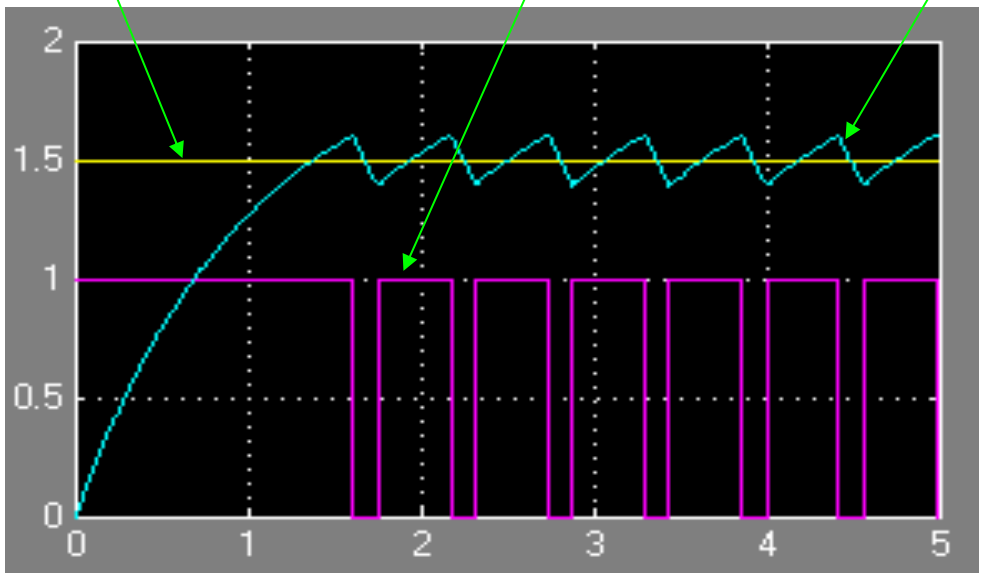




Control todo-nada.

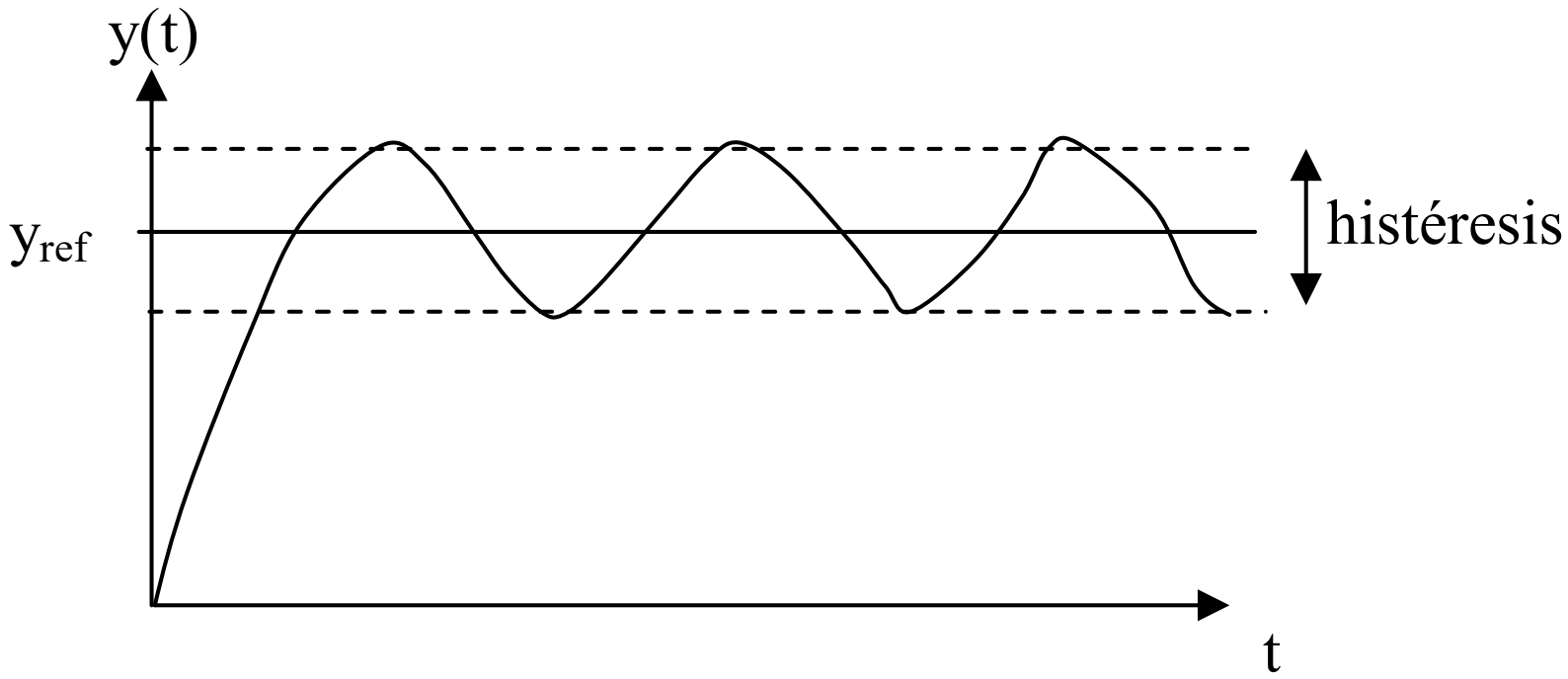
Respuesta típica:





Control todo-nada.

Respuesta típica oscilatoria



PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

Experimento de entrada escalón:

- Esperar hasta que la salida se estabilice con la entrada inicial (u=3 V) (unos 20 minutos).
- Cambiar el valor de u a 6: pinchar en el valor de u, cambiarlo a u=6, y pulsar F7. Esperar de nuevo a que se estabilice (otros 20 minutos).
- **Guardar los datos en un fichero ascii (botón derecho, *Save traces values/Values in ascii file*) de nombre *datosescalon.txt*.**

PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

En TWINCAT PLC CONTROL:

- Se guarda el proyecto con otro nombre: **rele.pro**.
- Se añaden las variables (solo las que están en negrita):

```
PROGRAM Main
VAR
    ref: LREAL :=56;
    hist : LREAL :=0.5;
END_VAR
```

- En el programa se incluye el código para el control tipo relé con histéresis:

```
y:=INT_TO_REAL(yent)*100/32767;
IF ((y>ref+hist) AND (u=umas)) THEN u:=umenos; END_IF;
IF ((y<ref-hist) AND (u=umenos)) THEN u:=umas; END_IF;
uent:=REAL_TO_INT(u*32767/10);
```

- Se guarda y se compila (Rebuild all).

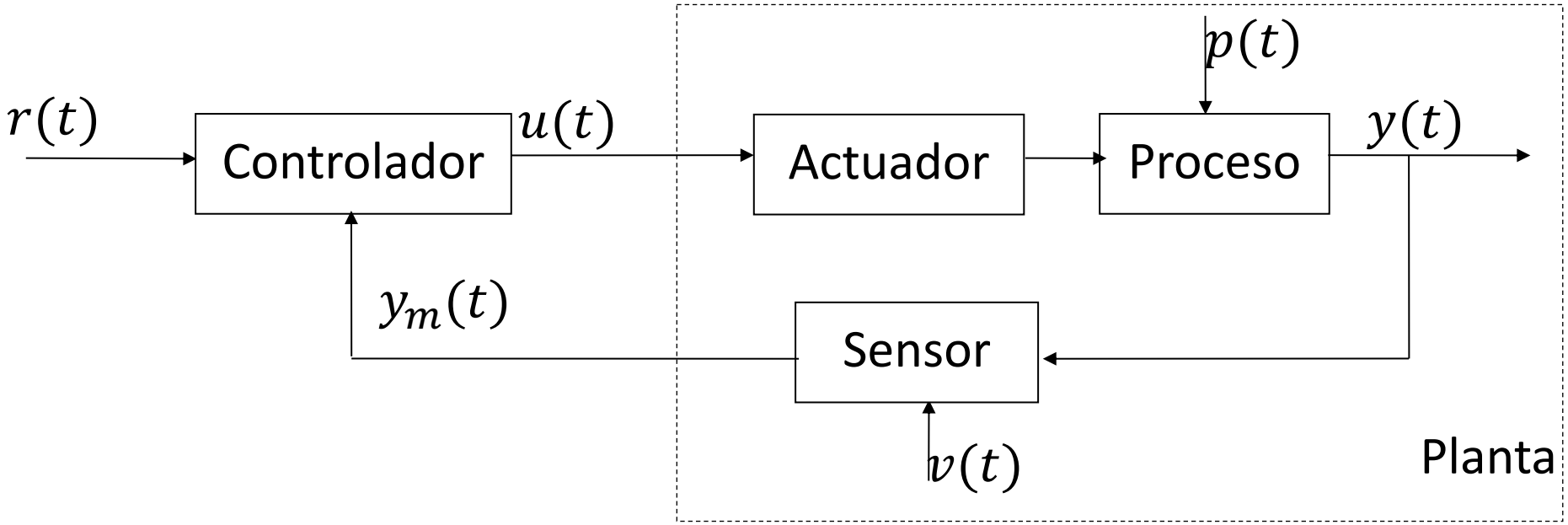
PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

<u>En TWINCAT PLC CONTROL</u>:

- En *Online/Login*.
- En *Online/Run*.
- En la ventana *Sampling trace*, botón derecho del ratón, marcar *Start trace* y después *Auto Read trace*.
- **Se espera hasta que la salida oscile y haya dos oscilaciones similares (unos 15 minutos más o menos).**

Control continuo: PID

Sistema realimentado:



$$u(t) = K_p \left(e_m(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e_m(\tau) d\tau + T_d \frac{de_m(t)}{dt} \right)$$

Control continuo: PID

Ecuación del controlador PID:

$$u(t) = K_p\left(e_m(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e_m(\tau)d\tau + T_d\frac{de_m(t)}{dt}\right)$$

Derivada

Proporcional

Integral

donde

$e_m(t) = r(t) - y_m(t)$

- 3 parámetros que lo definen: $\boldsymbol{K_p, T_i, T_d}$,

Control continuo: PID

Acción proporcional. Controlador proporcional:

$$\boldsymbol{u(t)} = K_p\big(r(t) - y_m(t)\big) = \boldsymbol{K_p e_m(t)}$$

- Parámetro que lo define: **ganancia proporcional**, K_p
- Banda proporcional: $BP = \dfrac{100}{K_p}$

Al aumentar *Kp*:

✓ Se hace el sistema más rápido.

✓ Se reduce el error.

Pero,

❖ Se hace más oscilatorio.

❖ Se amplifica el ruido.

Control continuo: PID

Acción integral.

$$u(t) = \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau$$

- Parámetro que lo define: ***tiempo integral, T_i***
- Acción retardada respecto al error (depende de error pasado).

Controlador PI:

$$u(t) = K_p\left(e_m(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e_m(\tau)d\tau\right)$$

Ganancia integral: $K_i = \frac{K_p}{T_i}$

- ¡¡Hace que el error sea cero en régimen permanente !!

Al reducir *Ti*:

✓ El error se anula antes (sistema más rápido).

Pero,

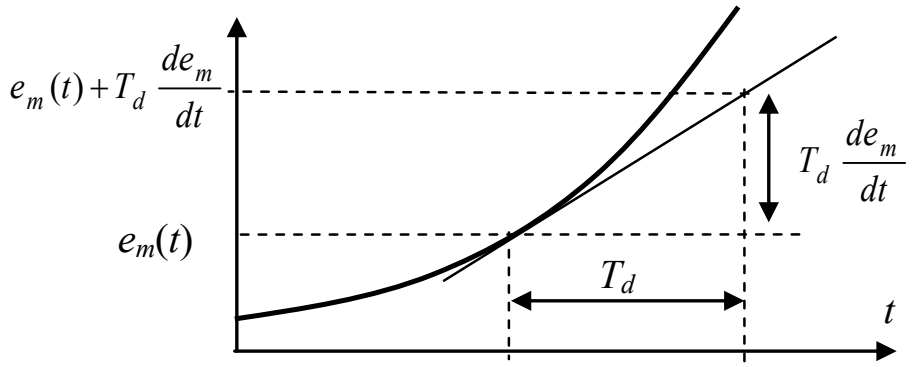
❖ Se hace más oscilatorio.

Control continuo: PID

Acción derivada.

$$\boldsymbol{u(t) = T_d \frac{de_m(t)}{dt}}$$

- Parámetro que lo define: ***tiempo derivativo,*** $\boldsymbol{T_d}$
- Acción adelantada respecto al error (depende de error futuro).



Al aumentar *Td*:

✓ La acción de control se adelanta más al cambio del error: menos oscilatorio.

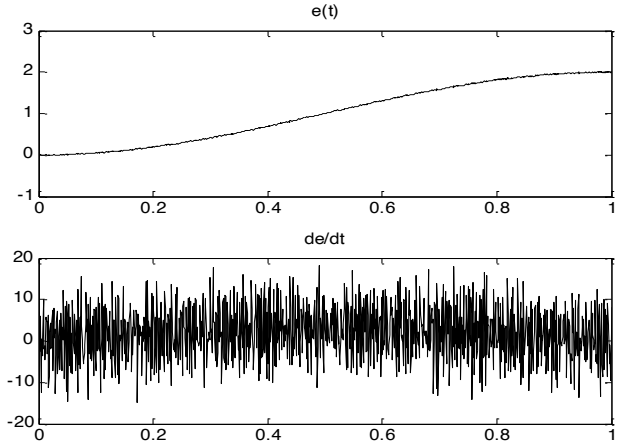
Pero,

❖ Se amplifica más el ruido.

Control continuo: PID

Acción derivada.

- Amplificación del ruido:

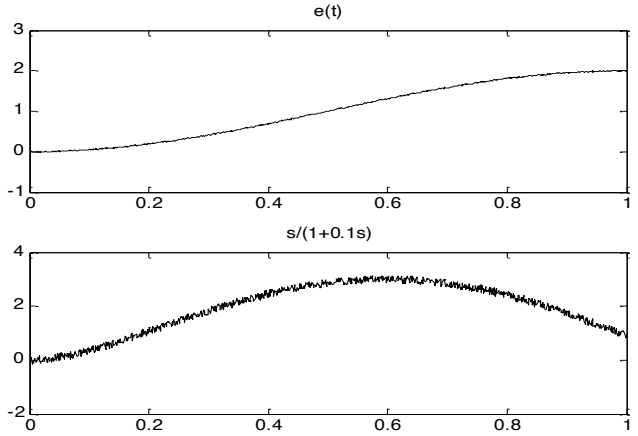


- Solución: añadir un filtro que reduzca el ruido:

$$y_f(t) + \frac{T_d}{N}\frac{dy_f(t)}{dt} = y_m(t)$$

$$\boldsymbol{u(t)} = T_d\frac{dy_f(t)}{dt}$$

A menor ***N***, más filtrado



Control continuo: PID

Ponderación de la referencia.

$$u(t) = K_p \left(b\, r(t) - y_m(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e_m(\tau) d\tau + T_d \left(c \frac{dr(t)}{dt} - \frac{dy_m(t)}{dt} \right) \right)$$

- Para **reducir la sobreoscilación** ante referencia (b<1, c<1).
- Ante perturbación no afecta.

Casos especiales:

- $\boldsymbol{b = 0, c = 0}$ **(regulador I-PD)**
- $\boldsymbol{b = 1, c = 0}$ **(regulador PI-D)**

Control continuo: PID

Controlador PID con filtro y ponderación de la referencia.

$$u(t) = K_p\left(br(t) - y_m(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e_m(\tau)d\tau + T_d\left(c\frac{dr(t)}{dt} - \frac{dy_f(t)}{dt}\right)\right)$$

$$y_f(t) + \frac{T_d}{N}\frac{dy_f(t)}{dt} = y_m(t)$$

- Parámetros que lo definen: $\boldsymbol{K_p, T_i, T_d, N, b, c}$

- Expresión en paralelo

$$u(t) = K_p\big(br(t) - y_m(t)\big) + K_i\int_0^t e_m(\tau)d\tau + K_d\left(c\frac{dr(t)}{dt} - \frac{dy_f(t)}{dt}\right)$$

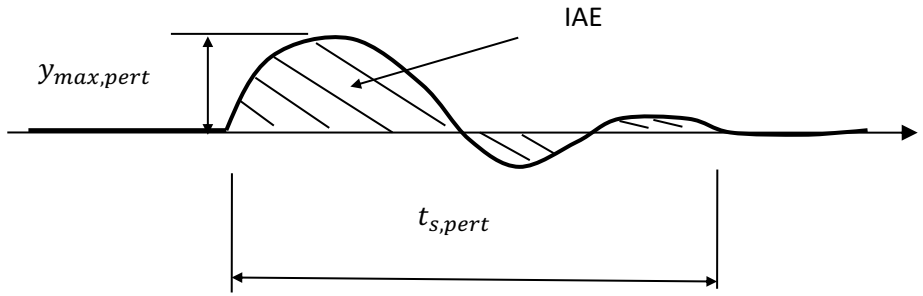
$$y_f(t) + \tau_d\frac{dy_f(t)}{dt} = y_m(t)$$

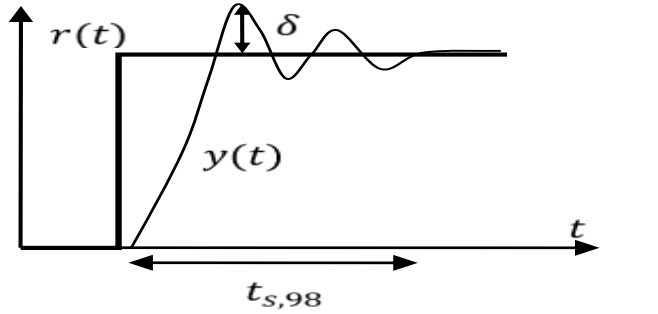
$$K_i = \frac{K_p}{T_i}, \qquad K_d = K_pT_d, \qquad \tau_d = \frac{T_d}{N}$$

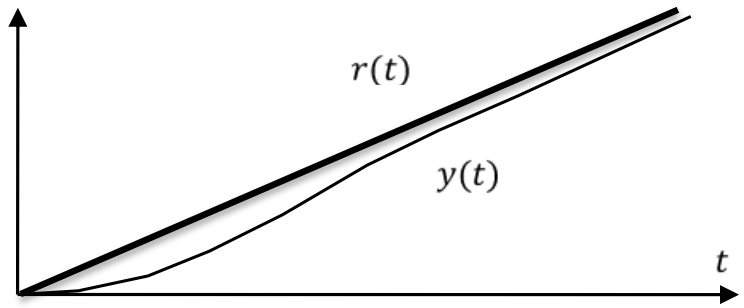
Control continuo: PID

Ajuste de PID (sintonizado o diseño).

- Decidir los valores: K_p, T_i, T_d, N, b, c para que el comportamiento sea adecuado.
- Seguimiento de referencias
  - Cambios bruscos en forma de escalón.
  - Cambios suaves en forma de rampa.
- Rechazo de perturbaciones







¡¡¡¡RAPIDEZ DE RESPUESTA!!!!!!

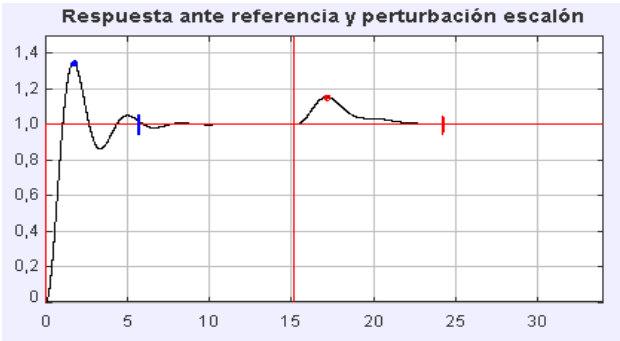
Control continuo: PID

Robustez

Controlador muy robusto

Controlador poco robusto

$Proceso\ original$



$Proceso\ modificado$

$Proceso\ más\ modificado$

Control continuo: PID

Amplificación del ruido del sensor

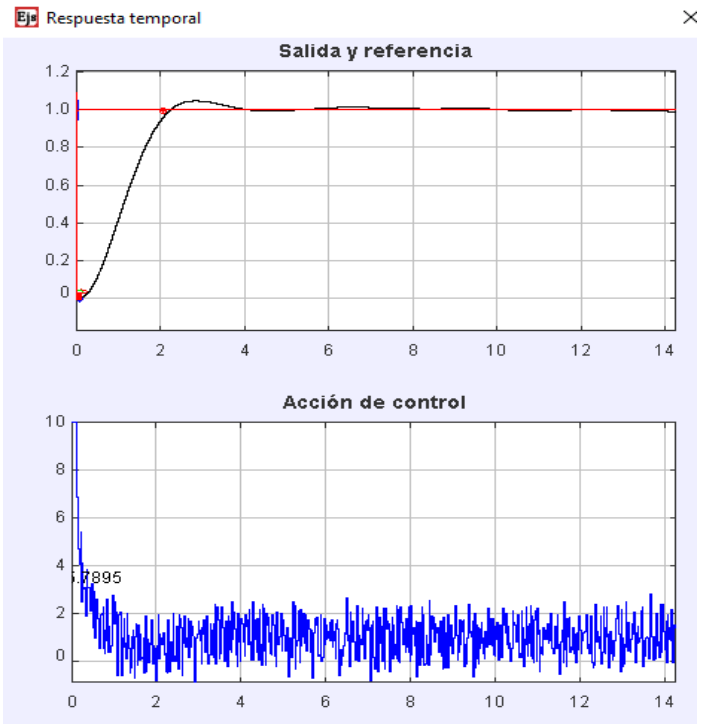
- El ruido es una señal rápida (de frecuencia muy alta).

- Fluctuación de la acción de control debida a un ruido de amplitud v :

$$u_{ruido} = A_{ruido} v$$

La amplificación del ruido (A_{ruido}) depende del tipo de controlador:

- Controlador P ó PI: $A_{ruido} = K_p$
- Controlador PD ó PID: $A_{ruido} = K_p(1 + N)$



PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

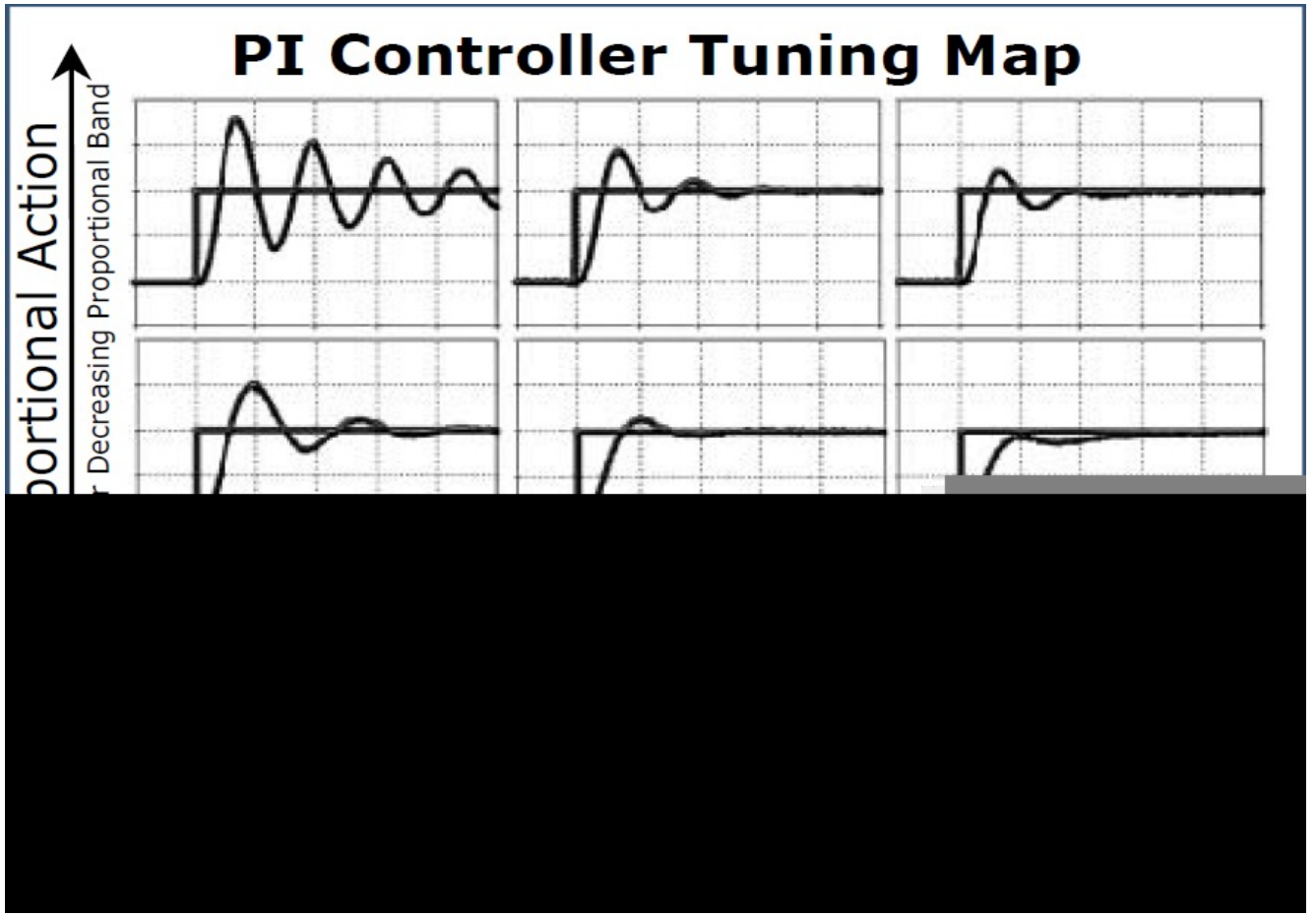
<u>En TWINCAT PLC CONTROL</u>:

- En *Online/Login*.
- En *Online/Run*.
- En la ventana *Sampling trace*, botón derecho del ratón, marcar *Start trace* y después *Auto Read trace*.
- Se espera hasta que la salida oscile y haya dos oscilaciones similares (unos 15 minutos más o menos).
- **Después guardar los datos en un fichero ascii (botón derecho, Save traces values/Values in ascii file), de nombre *datosrele.txt*.**

Ajuste manual de PI.

REAJUSTE MANUAL DEL CONTROLADOR PI:

$K_p \uparrow\uparrow$
$BP \downarrow\downarrow$



$K_p \downarrow\downarrow$
$BP \uparrow\uparrow$

$K_i \uparrow\uparrow$
$T_i \downarrow\downarrow$

$K_i \downarrow\downarrow$
$T_i \uparrow\uparrow$

Ajuste experimental de PID

Método de respuesta de bucle abierto con valor final conocido

- Con k, T y τ se entra en una tabla

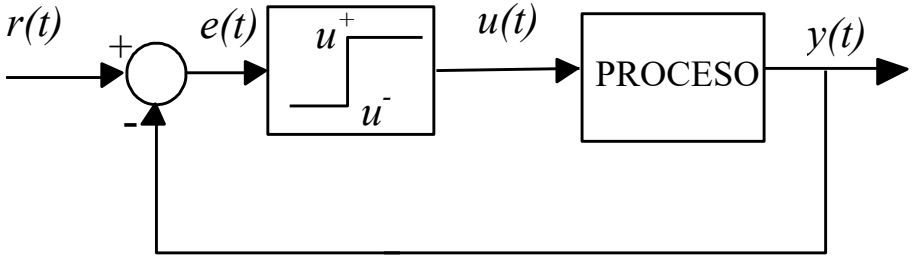
Tipo	Poco robusto			
	K_p	T_i	T_d	K_i
PI	$\frac{0.859}{k}\left(\frac{T}{\tau}\right)^{-0.997}$	$1.484\,\tau\left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.468}$	0	$\frac{0.579}{k\tau}\left(\frac{T}{\tau}\right)^{-1.465}$
PID	$\frac{1.357}{k}\left(\frac{T}{\tau}\right)^{-0.947}$	$1.188\,\tau\left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.738}$	$0.381\,\tau\left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.995}$	$\frac{1.142}{k\tau}\left(\frac{T}{\tau}\right)^{-1.685}$

Tipo				
				K_i
PI	$\frac{0.1}{k}+\left(0.35-\frac{}{(\tau+T)^2}\right)\frac{}{kT}$	$0.35T+\frac{}{\tau^2+12\tau T+7T^2}$	0	$\frac{K_p}{T_i}$
PID	$\frac{1}{k}\left(0.2+0.45\frac{\tau}{T}\right)$	$\frac{0.4T+0.8\tau}{T+0.1\tau}T$	$\frac{0.5T\tau}{0.3T+\tau}$	$\frac{K_p}{T_i}$

Se puede obtener una robustez intermedia interpolando

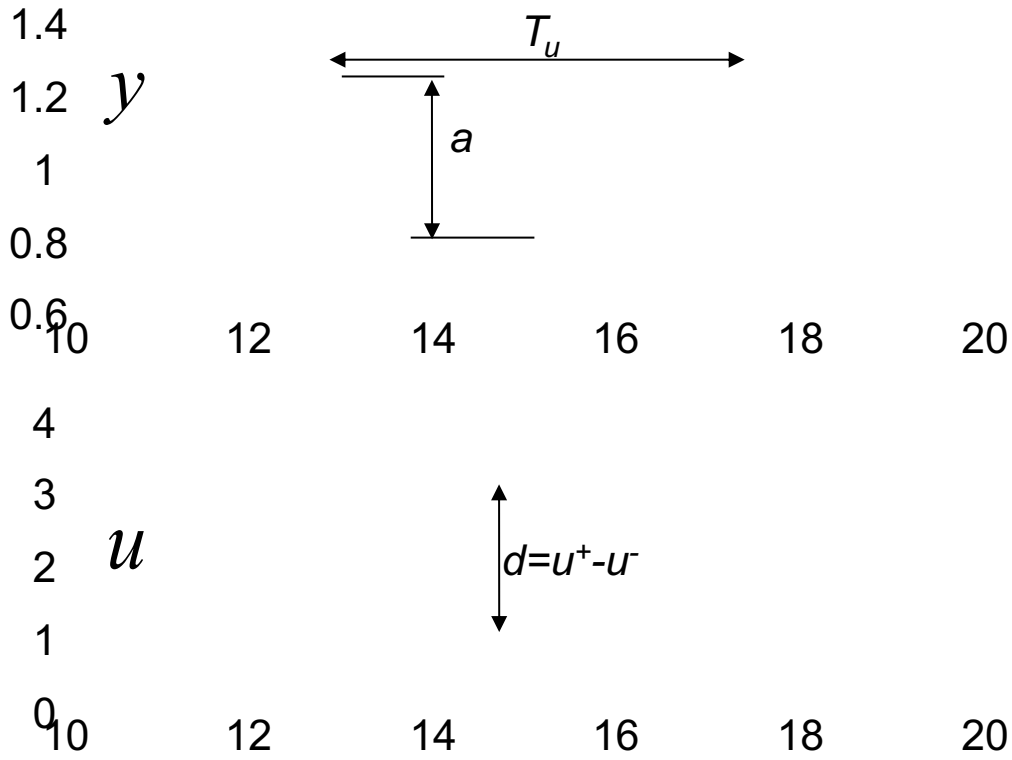
Ajuste experimental de PID

Método de respuesta de bucle cerrado con control tipo relé



Permite obtener rápidamente la ganancia crítica:

$$K_u = \frac{4d}{\pi a}$$



Ajuste experimental de PID

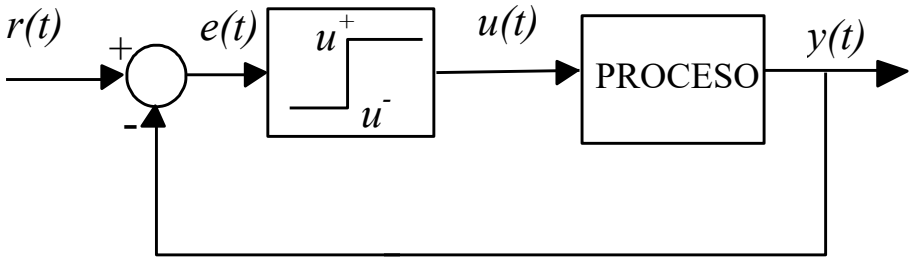
Método de respuesta de bucle cerrado con control tipo relé

Con K_u y T_u se entra en una tabla:

Respuesta	Tipo de control: PI			Tipo de control: PID			
	K_p	T_i	K_i	K_p	T_i	T_d	K_i
Poco robusto	$0.3K_u$	$0.9T_u$	$0.43\frac{K_u}{T_u}$	$0.6K_u$	$0.6T_u$	$0.15T_u$	$\frac{K_u}{T_u}$
Robustez intermedia	$0.22K_u$	T_u	$0.22\frac{K_u}{T_u}$	$0.45K_u$	$0.75T_u$	$0.18T_u$	$0.6\frac{K_u}{T_u}$
Muy robusto	$0.15K_u$	$1.1T_u$	$0.136\frac{K_u}{T_u}$	$0.3K_u$	$0.9T_u$	$0.22T_u$	$0.33\frac{K_u}{T_u}$

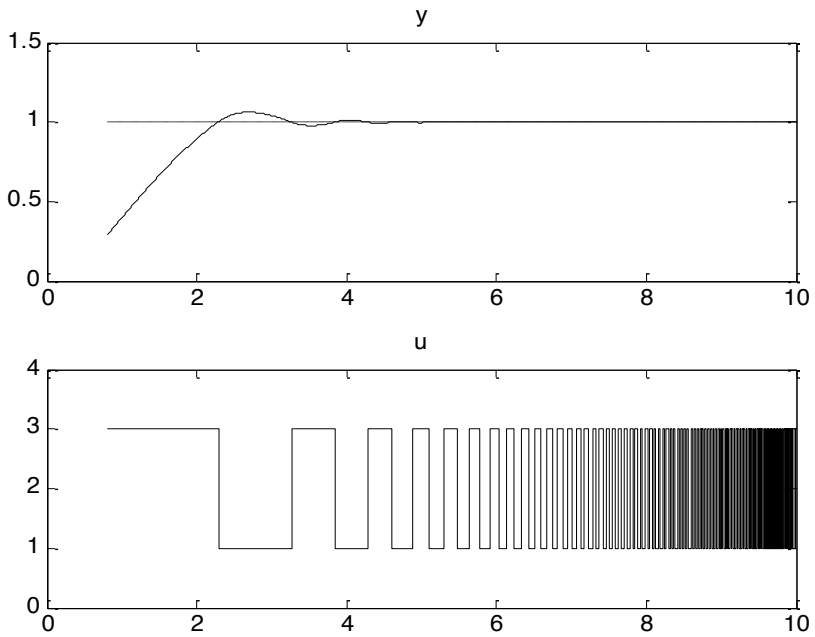
Ajuste experimental de PID

Método de respuesta de bucle cerrado con control tipo relé



Si el proceso es de 1er o 2º orden (sin retardo) la frecuencia de oscilación es infinita→

el método no es válido



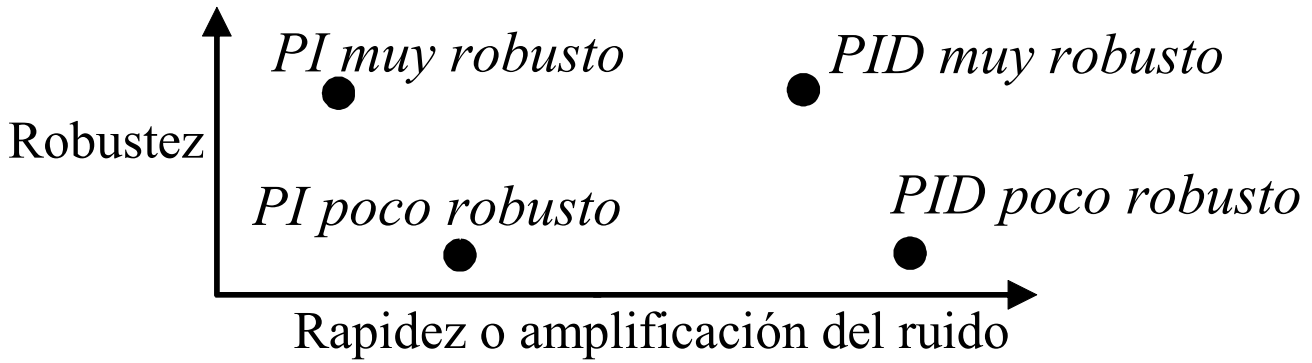
Para evitar problemas:

Relé con histéresis

(el método sigue sin ser válido para 1er o 2º orden)

Ajuste experimental de PID

Las tablas dan 4 puntos de ajuste:



Se pueden obtener ajustes intermedios interpolando:

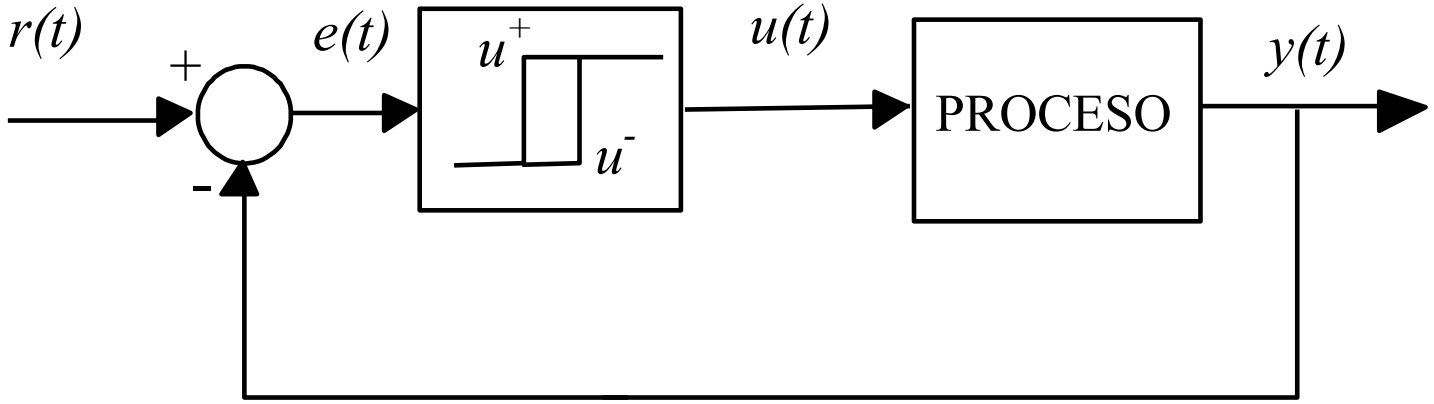
- La N del filtro del derivador (PI → N=0)
- La robustez

Ajuste experimental de PID

Autosintonizado

Experimento automático en PID comerciales

Utilizan método de respuesta de bucle cerrado con relé e histéresis y una tabla similar a las anteriores



La histéresis permite funcionar con **1er o 2º** ord., pero el **resultado es malo** en esos casos

PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

AJUSTE de PID con datos de entrada escalón:

- Abrir la herramienta de ajuste experimental de PID (ejsPIDexperimental.jar), cargar los datos del fichero *datosescalon.txt*, y ajustar los siguientes controladores, mediante el método escalón con valor final conocido:
  - Un controlador PI de robustez intermedia.
  - Un controlador PID de robustez intermedia tal que la amplificación del ruido sea 5.
  - Un controlador de robustez baja tal que la amplificación del ruido sea 10.
- Seleccionad un rango de datos constante para medir la amplitud del ruido de medida.

PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

AJUSTE de PID con datos de relé:

- Abrir la herramienta de ajuste experimental de PID (ejsPIDexperimental.jar), cargar los datos del fichero *datosrele.txt*, y ajustar los siguientes controladores, mediante el método relé sin ganancia conocida:
  - Un controlador PI de robustez intermedia.
  - Un controlador PID de robustez intermedia tal que la amplificación del ruido sea 2.
  - Un controlador de robustez alta tal que la amplificación del ruido sea 5.

PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

<u>En el TWINCAT PLC CONTROL</u>:

- Se guarda el proyecto con otro nombre: **PID.pro**.
- Hay que importar la librería **PID_AW**. En *Window/Library Manager*. Botón derecho (*Additional library*).
- Se añaden las variables (solo las que están en negrita). Introducid los valores de Kp, Ti, Td, N:

```
PROGRAM Main
VAR
    Kp : LREAL :=0.571;
    Ti: LREAL :=125.3;
    Td: LREAL:= 27.16;
    N: LREAL:=7.86;
    b :LREAL :=1;
    c: LREAL :=1;
    umax : LREAL :=10;
    umin : LREAL:=0;
    T : LREAL :=0.5;
    PID: PID_AW;
END_VAR
```

PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

En el TWINCAT PLC CONTROL:

- Se cambia el programa para añadir el PID:

```
y:=INT_TO_REAL(yent)*100/32767;
PID(
        bEnable:=TRUE,
        fSetpointValue:=ref ,
        fActualValue:= y,
        fCtrlCycleTime:=T ,
        fKp:= Kp,
        fTi:= Ti,
        fTd:= Td,
        fN:= N,
        fb:=b,
        fc:=c,
        fumax:= umax,
        fumin := umin,
        fCtrlOutput=> u,
        nErrorStatus=> );
        uent:=REAL_TO_INT(u*32767/10);
```

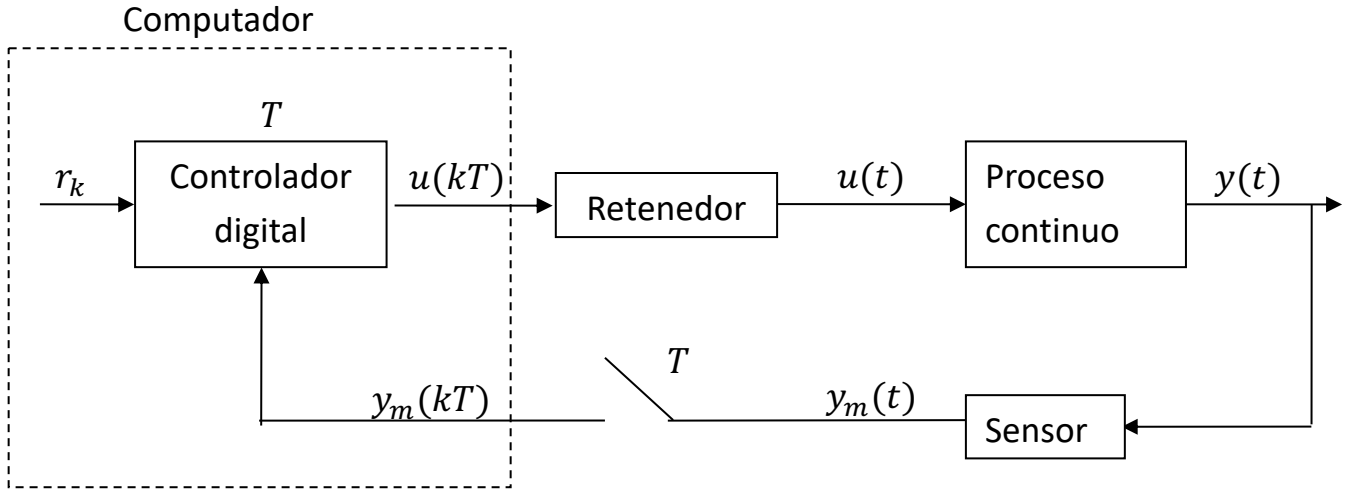
PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

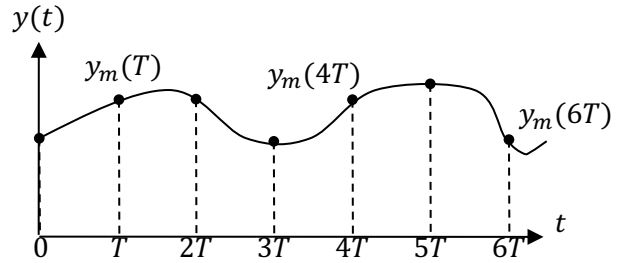
<u>En el TWINCAT PLC CONTROL</u>:

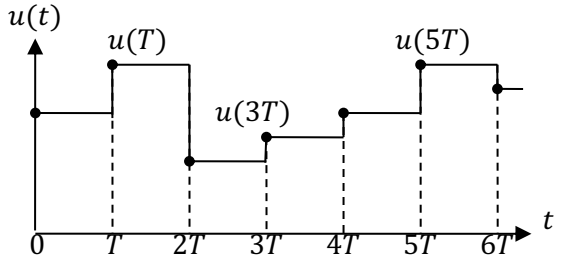
- En *Sampling Trace*, botón derecho /*Trace configuration* se configura una señal más a visualizar, *Main.ref* (pulsando a *Help manager*) y se añade en Var 2 Main.ref.
- Probar el PID del ajuste mediante respuesta escalón con robustez intermedia:
  - Cambiar en la ventana de variables los valores de Kp, Ti, Td y N a los obtenidos.
  - Se guarda y se compila (Rebuild all).
  - En Online/Login y después Run.
  - En la ventana *Sampling trace*, botón derecho del ratón, marcar *Auto Read trace* y después *Start trace*.
  - Esperar a que se estabilice la temperatura en 50ºC.
  - Después cambiar el valor de ref a 60 ºC (para ello pulsar sobre la variable ref, cambiar su valor y pulsar la tecla F7 del teclado) y esperar a que se estabilice.
  - Cambiar *b* a 0.6 y después pulsar F7. Esperar a que se estabilice la temperatura en 60.
  - Después volver a poner ref=50 º C y esperar a que se estabilice.
  - Después conectar el ventilador a 5 V para provocar una perturbación, y esperar a que se estabilice.

Implementación del PID

Implementación digital del PID







Implementación del PID

Implementación digital del PID

Rutina periódica:

1. Leer el valor de la salida del proceso, y_k.
2. Calcular o leer el valor de la referencia, r_k.
3. Calcular la acción de control, u_k.
4. Actualizar la entrada al proceso, $u(t)= u_k$.

Aproximación discreta de ecuación diferencial del PI:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau = P(t) + I(t)$$

$$I_k = I_{k-1} + \frac{K_p T}{T_i} e_k$$

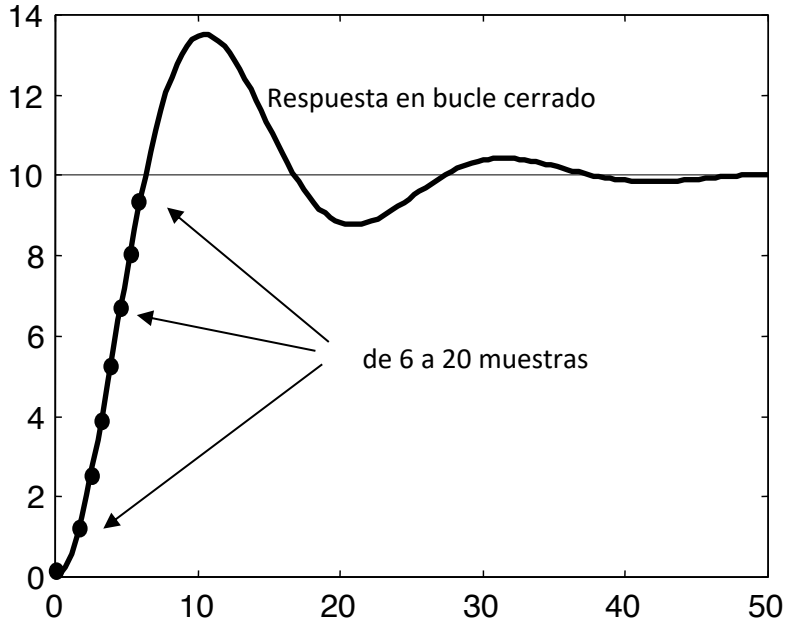
$$u_k = K_p e_k + I_k$$

Implementación del PID

Elección del periodo de muestreo

Bastante bajo para que no se pierda información. Criterio práctico:

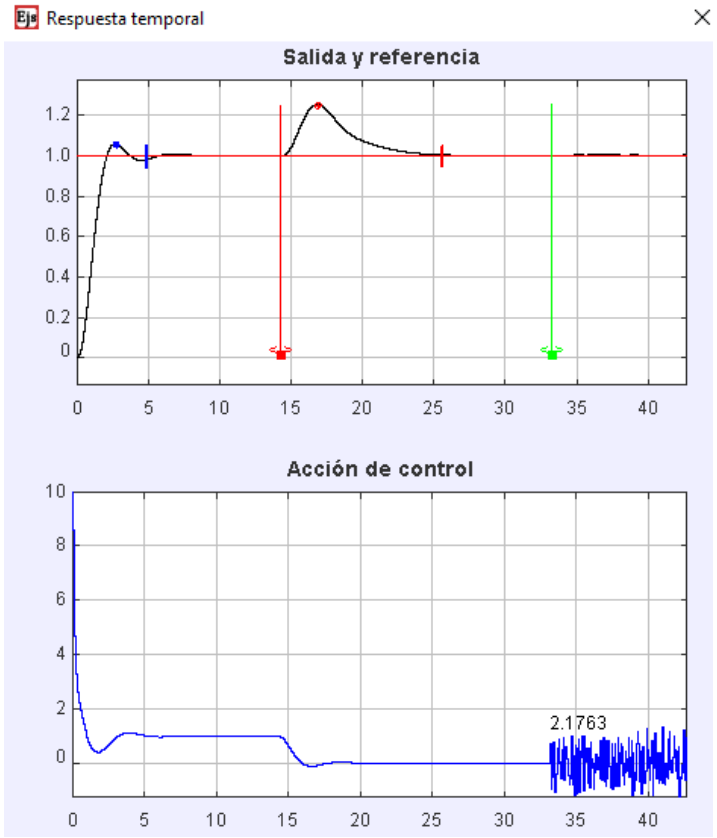
- $\boldsymbol{T \approx \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{20}\right) t_r}$. Que quepan entre 6 y 20 muestras en la subida ante escalón. Un valor típico: $T \approx \frac{t_r}{10}$.



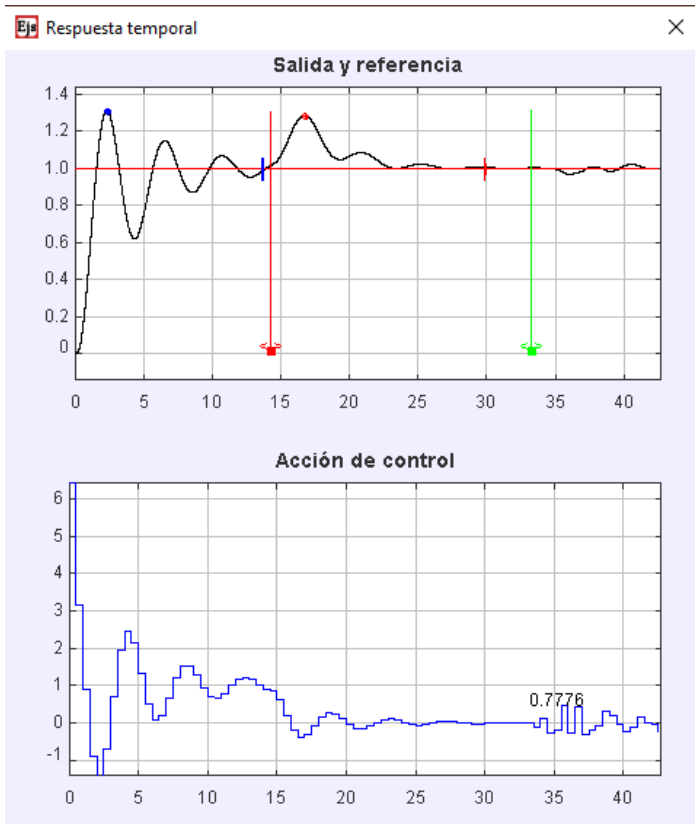
Implementación del PID

Elección del periodo de muestreo

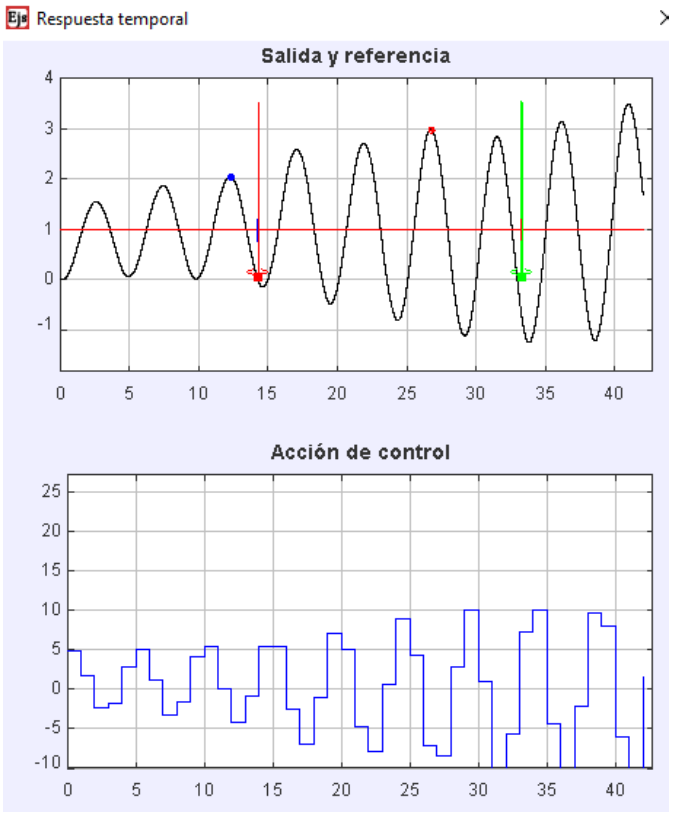
Periodo correcto



Periodo demasiado alto



Periodo todavía más alto



PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

<u>En el TWINCAT PLC CONTROL</u>:

- Probar el PI del ajuste mediante respuesta escalón con robustez intermedia:
  - Cambiar los valores de Kp, y Ti a los obtenidos del ajuste del PI (Td:=0). Una vez cambiados pulsar la tecla F7.
  - Esperar a que se estabilice la temperatura en 50ºC, y desconectar el ventilador. Esto provoca una perturbación inversa a la que produce la conexión del ventilador.
  - Esperar a que vuelva a estabilizarse en 50 ºC, y después cambiar el valor de ref a 60 ºC (para ello pulsar sobre la variable ref, cambiar su valor y pulsar la tecla F7 del teclado) y esperar a que se estabilice.
  - Ajustar el valor de *b* si la sobreoscilación es excesiva, cambiando de nuevo la referencia a 50 para probar el comportamiento.

PROGRAMACIÓN DEL PLC Y EXPERIMENTO

<u>En el TWINCAT PLC CONTROL</u>:

- Probar el PID del ajuste mediante respuesta escalón con robustez baja:
  - Cambiar los valores de Kp, Ti, Td y N a los obtenidos del ajuste del PID, haciendo doble click en cada variable. Una vez estén todos introducidos, pulsar la tecla F7.
  - Cambiar la referencia a 50ªC y esperar a que se estabilice la temperatura en 50ºC.
  - Después conectar el ventilador a 5 V para provocar una perturbación, y esperar a que se estabilice.
  - Después guardar los datos en un fichero ascii (botón derecho, Save traces values/Values in ascii file).