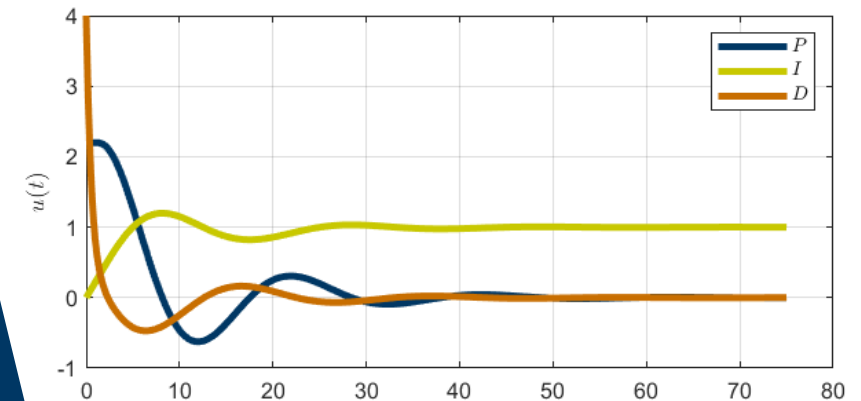
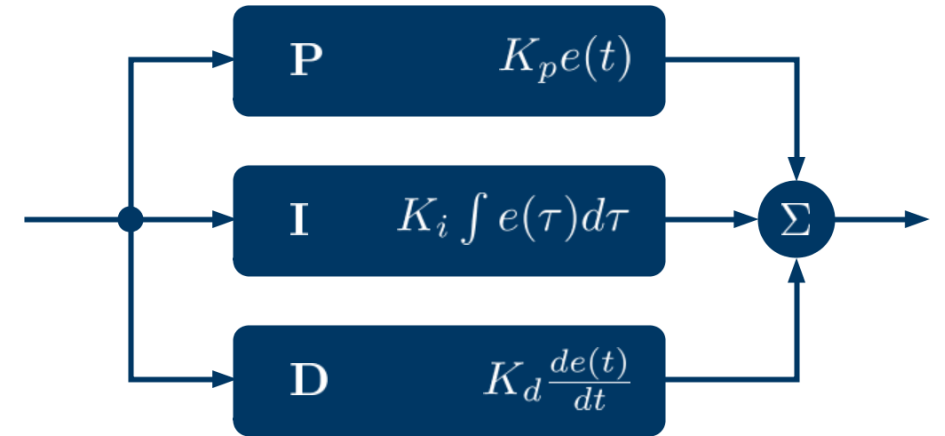


# CONTROLADORES PID: PRINCIPIOS Y AJUSTE EXPERIMENTAL



CICLO DE CONFERENCIAS DEL MÁSTER UNED-UCM Y DEL PROGRAMA DE  
DOCTORADO EN “INGENIERÍA DE SISTEMAS Y DE CONTROL”



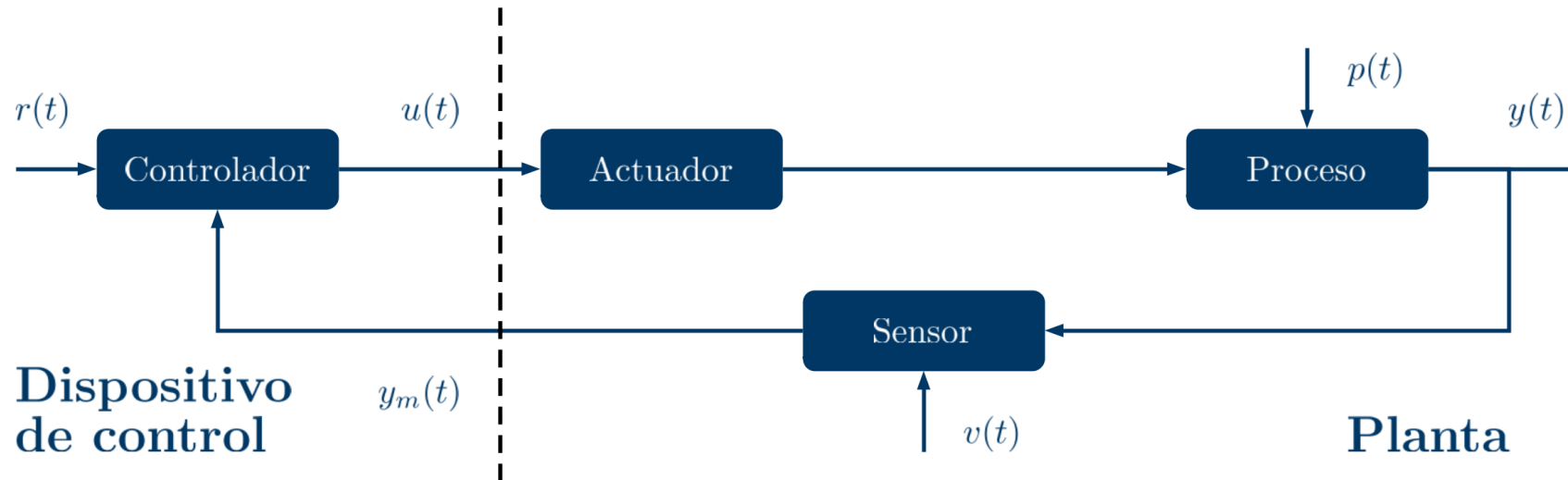
<b>ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA</b>	<b>3</b>
<b>FILTRADO DE LA DERIVADA</b>	<b>16</b>
<b>PONDERACIÓN DE LA REFERENCIA</b>	<b>22</b>
<b>ANTI WIND-UP DEL INTEGRADOR</b>	<b>28</b>
<b>FORMATOS ESTÁNDAR DE PID</b>	<b>35</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DIGITAL DEL PID</b>	<b>43</b>
<b>SELECCIÓN DEL TIPO DE CONTROLADOR</b>	<b>55</b>
<b>TÉCNICAS DE DISEÑO DE PID</b>	<b>60</b>
<b>AJUSTE EXPERIMENTAL</b>	<b>66</b>
<b>MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO</b>	<b>71</b>
<b>MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE CERRADO</b>	<b>84</b>
<b>AUTOAJUSTE</b>	<b>91</b>
<b>HERRAMIENTAS DE SOPORTE</b>	<b>97</b>

# ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA

CONTROLADOR PID EN EL LAZO CERRADO

ACCIONES

# ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA



$r(t)$ : Referencia

$u(t)$ : Acción de control

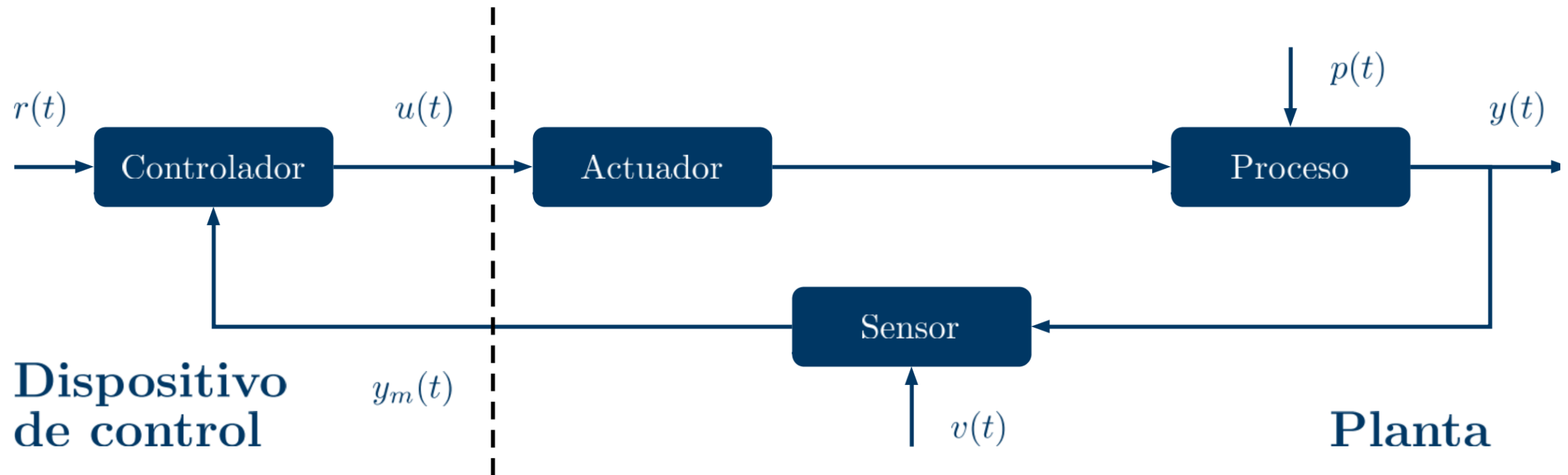
$y_m(t)$ : Salida medida

$p(t)$ : Perturbación

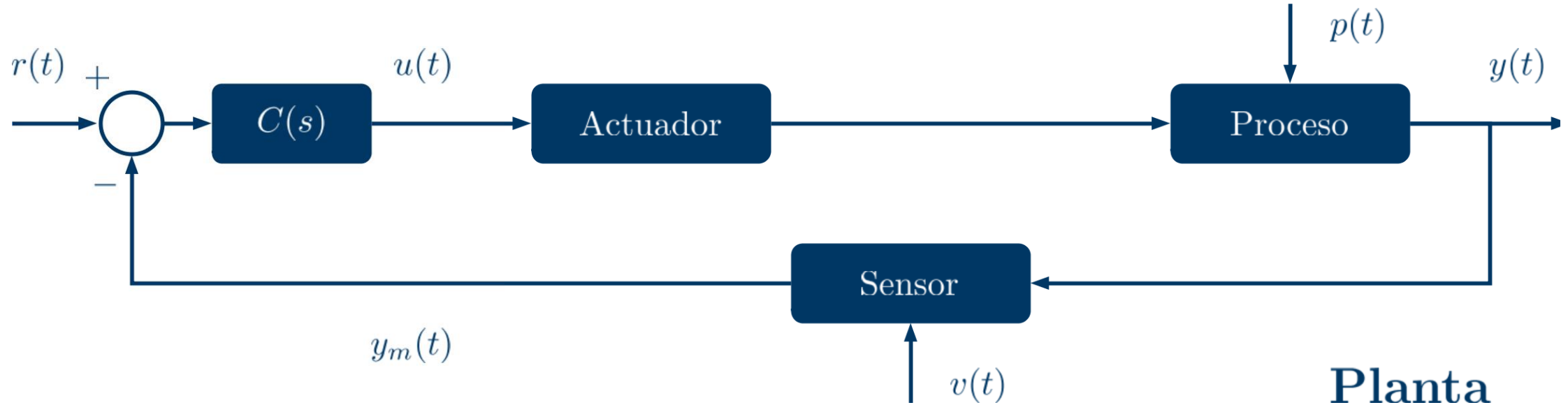
$y(t)$ : Salida

$v(t)$ : Ruido

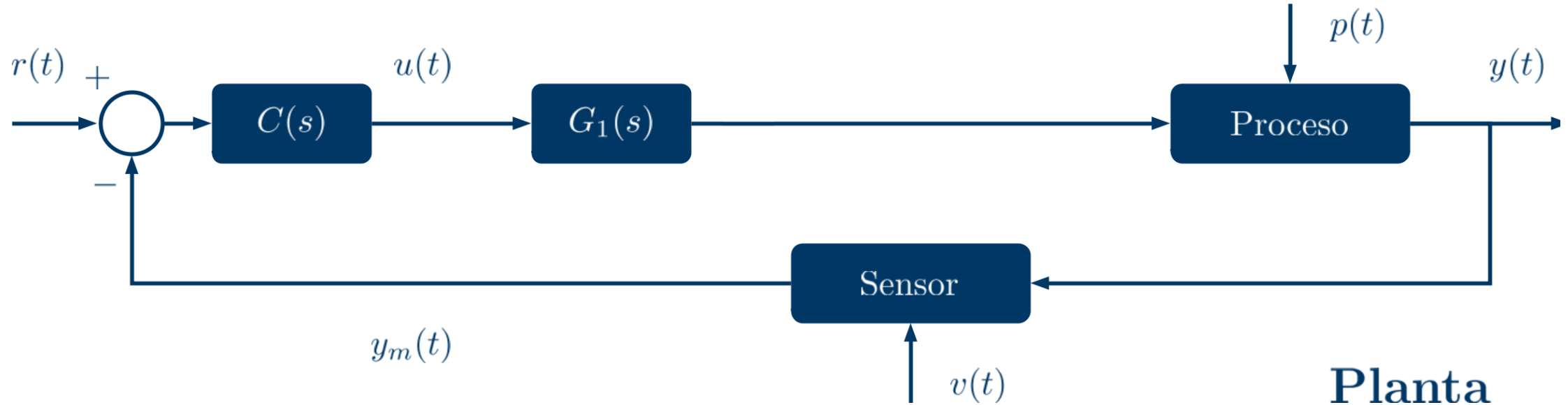
# ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA



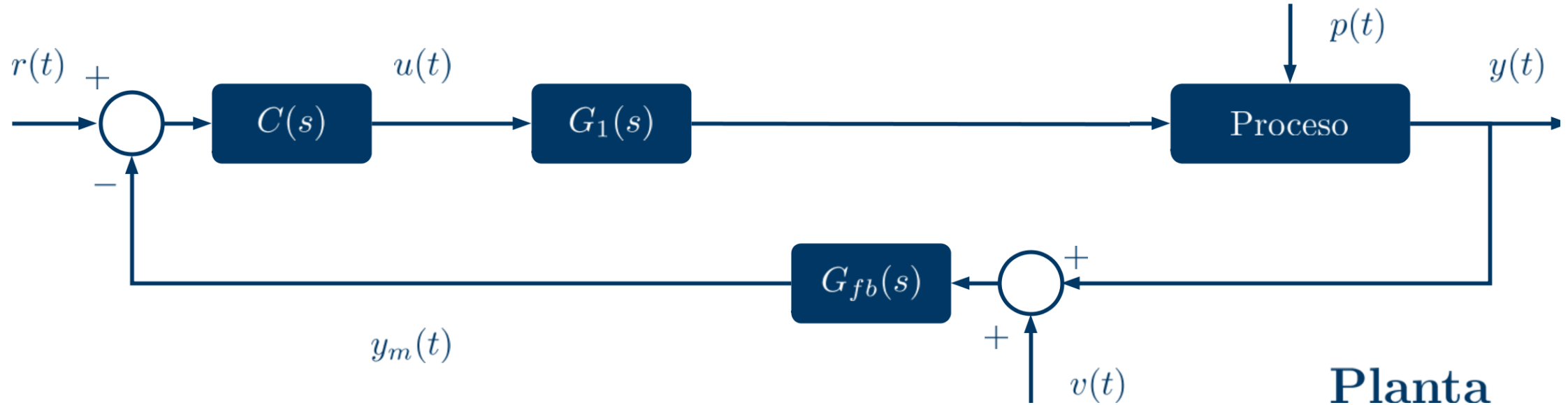
# ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA



# ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA

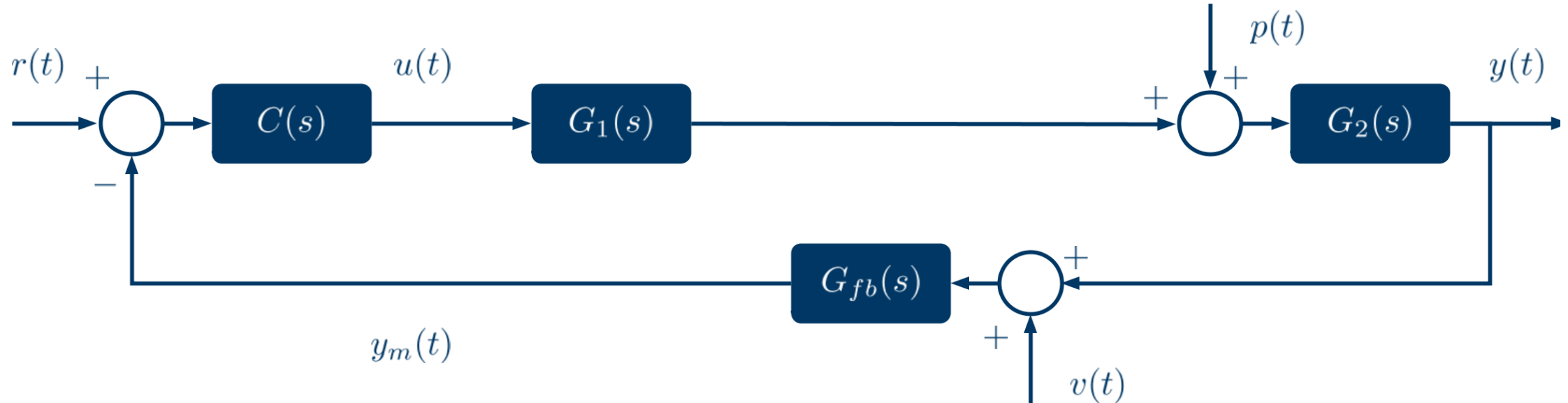


# ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA

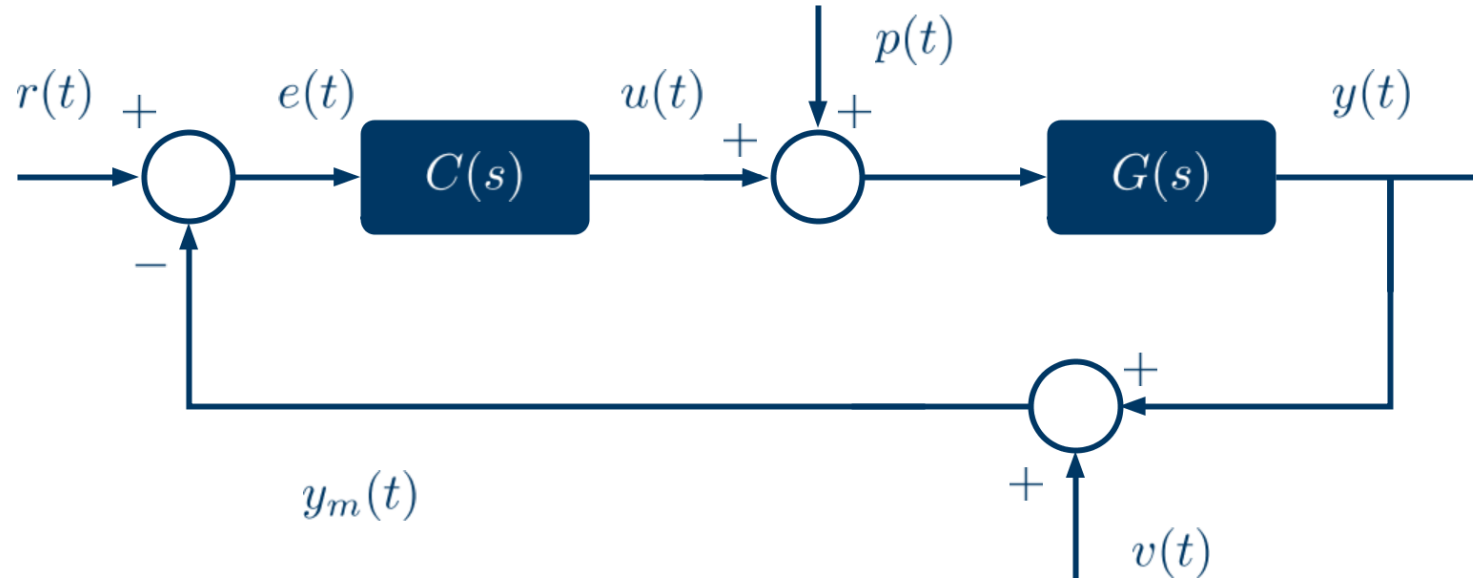




# ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA



# ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA



# ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA



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

# ACCIÓN PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVADA



$$u(t) = K_p \left( \underbrace{e(t)}_{\text{Proporcional}} + \underbrace{\frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau}_{\text{Integral}} + \underbrace{T_d \frac{de(t)}{dt}}_{\text{Derivada}} \right)$$

**Proporcional**

**Integral**

**Derivada**

## Acción Proporcional. Control Proporcional

$$u(t) = K_p e(t)$$

Aumentar  $K_p$

Parámetro que la define:  $K_p$

$$BP = \frac{100}{K_p}$$

- Hace el sistema más rápido
- Disminuye el error

Pero,

- Más oscilatorio
- Amplifica el ruido de medida
- Puede producir acciones saturadas

## Acción Integral

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

Parámetro que la define:  $T_i$

Acción lenta destinada a conseguir un error nulo en régimen permanente

## Control PI

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

Ganancia Integral  $K_i = K_p/T_i$

Disminuir  $T_i$

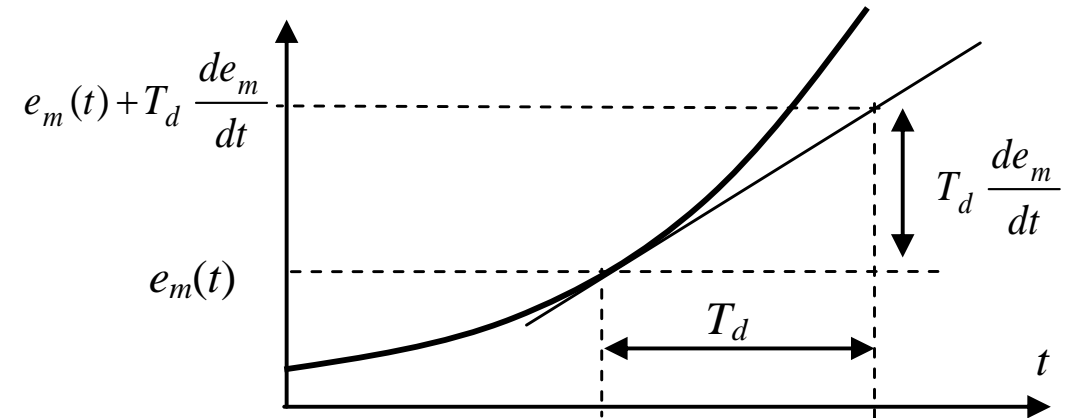
- Hace el sistema más rápido
- Pero,
- Se hace más oscilatorio

## Acción Derivada

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

Parámetro que la define:  $T_d$

Acción rápida que se anticipa al error



Aumentar  $T_d$

- Se anticipa en una ventana mayor el cambio del error

Pero,

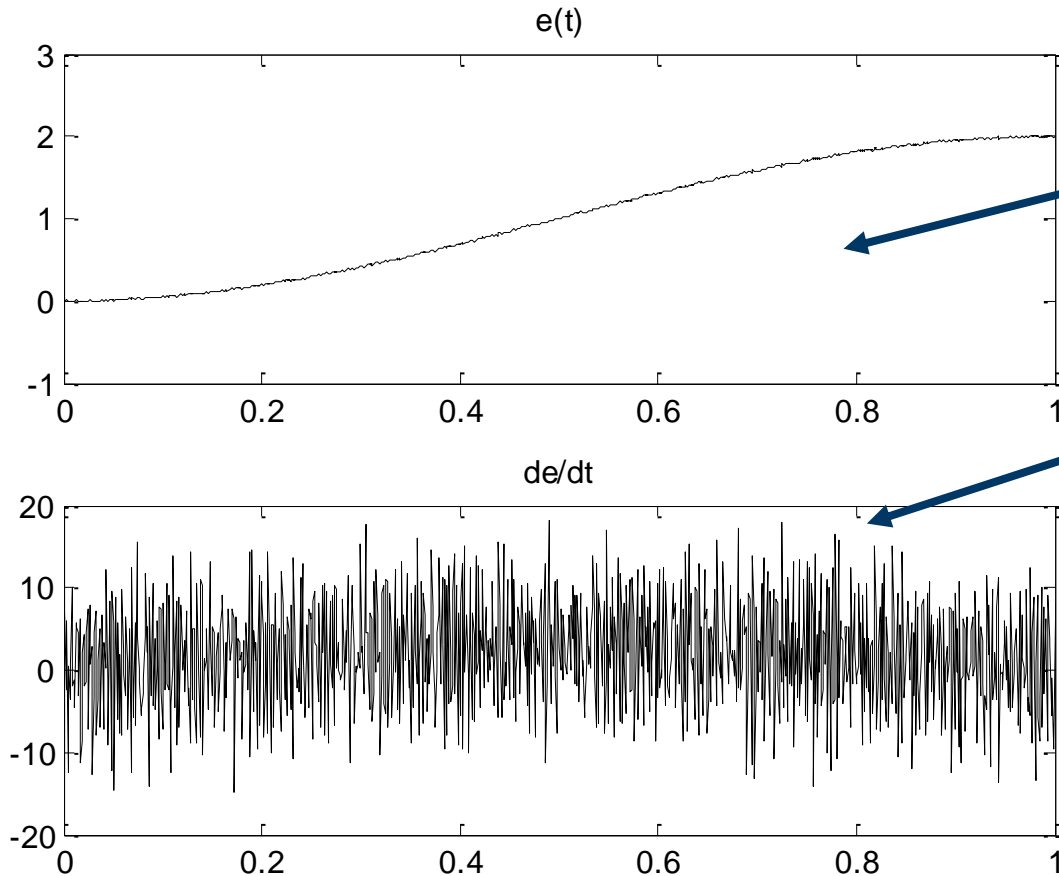
- Se amplifica también el ruido

# FILTRADO DE LA DERIVADA

ACCIÓN DERIVADA SIN FILTRO Y CON FILTRO

FILTRADO DE MEDIDA



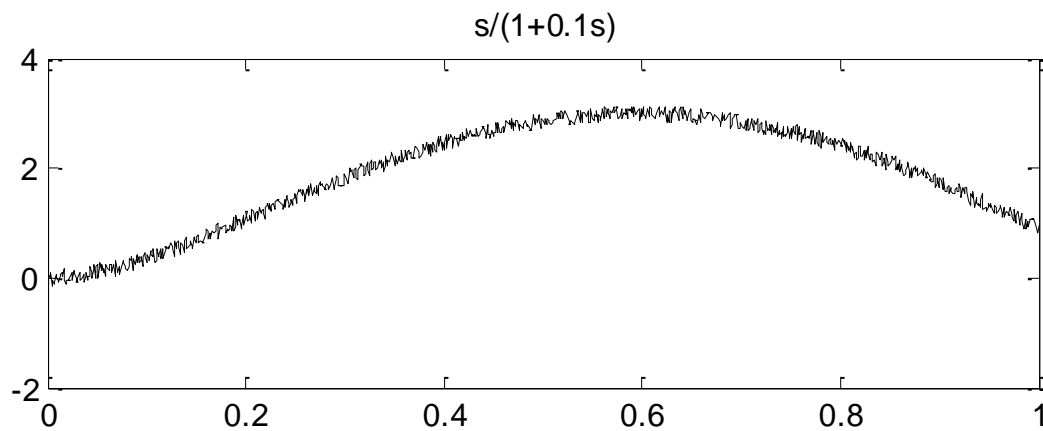
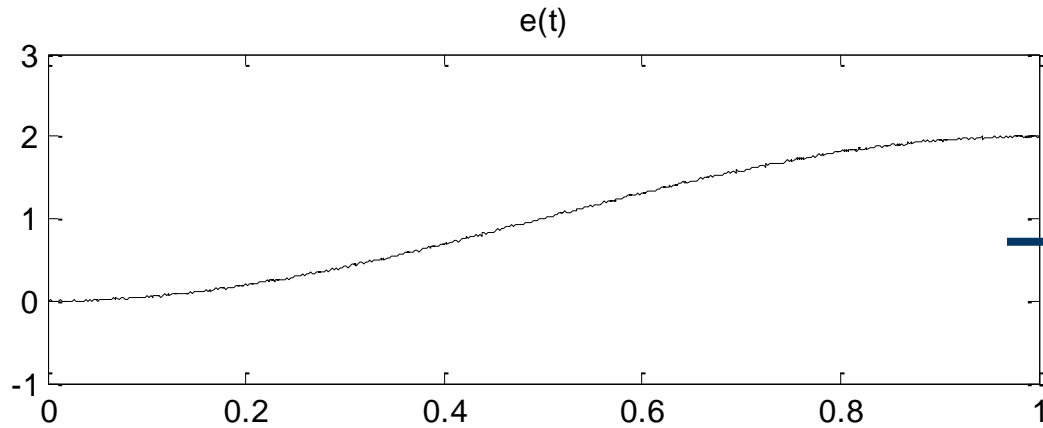


Señal con amplitud de ruido baja, pero alta frecuencia.

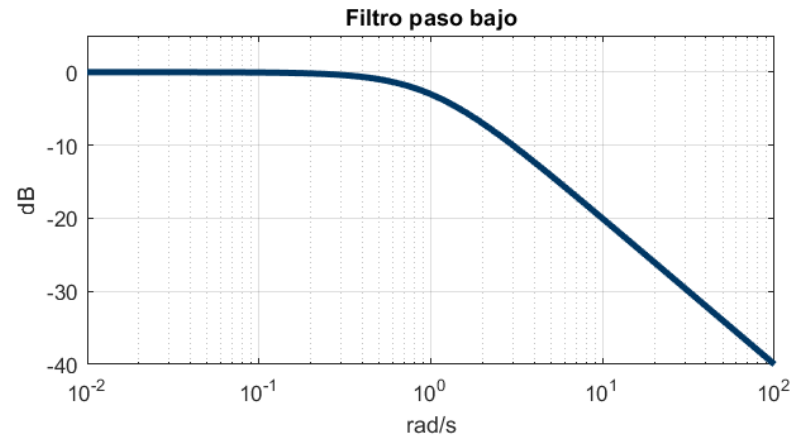
El derivador la amplifica mucho, dando lugar a una señal inutilizable.

Para poder implementar esta acción:  
se debe añadir un filtro en la derivada

# FILTRADO DE LA DERIVADA

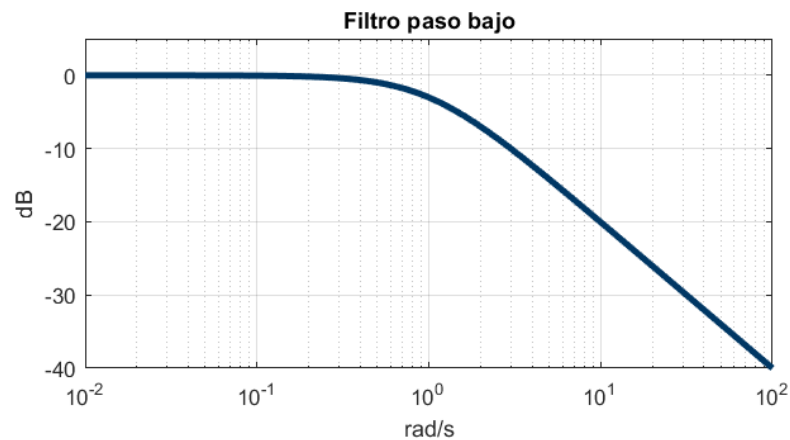


$$T_d \frac{de(t)}{dt}$$



$$T_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$\frac{U_d(s)}{E(s)} = K_p \cdot T_d \cdot s \cdot \frac{1}{\frac{T_d}{N} \cdot s + 1}$$

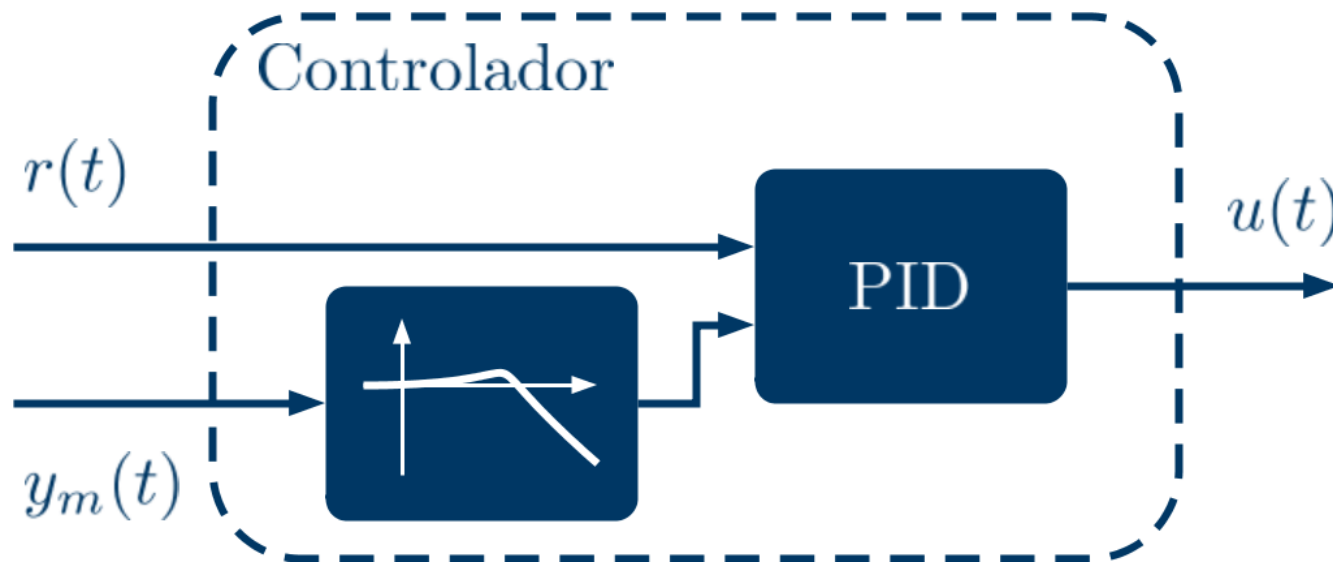


Siendo  $N$  el parámetro de filtro de la derivada.

$$N \in [3, 20]$$

Valores de  $N$  altos: mayor amplificación ruido.

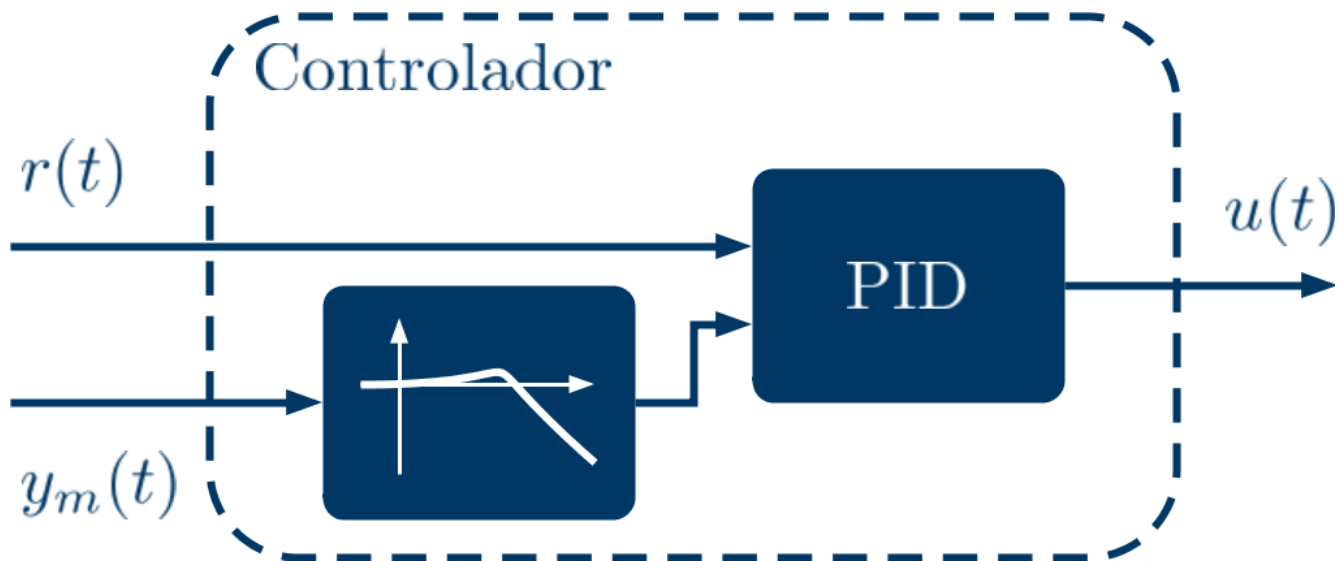
Filtro de TODA la señal de medida (cualquier implementación del PID):



*High frequency roll-off*

*Para señales de medida muy ruidosas*

Filtro de TODA la señal de medida (cualquier implementación del PID):



$$H_f(s) = \frac{1}{1 + s \cdot T_f + (s \cdot T_f)^2 / 2}$$

Controlador PI:  $T_f = T_i / N'$

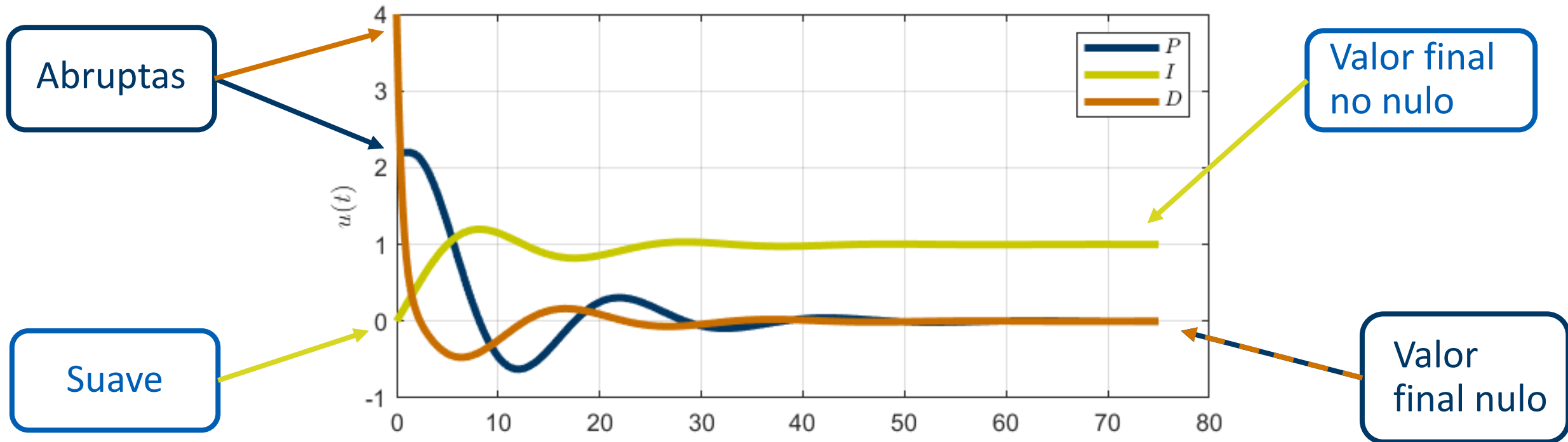
Controlador PID:  $T_f = T_d / N'$

$N' \in [3, 20]$

# PONDERACIÓN DE LA REFERENCIA

MOTIVACIÓN Y CONSIDERACIONES

# PONDERACIÓN DE LA REFERENCIA

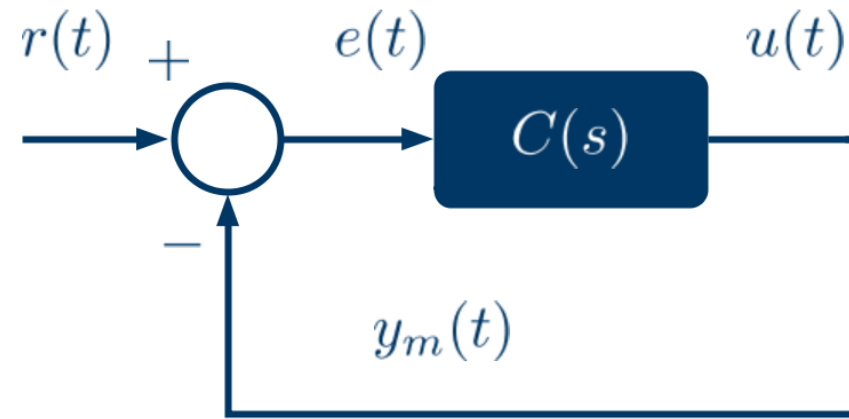




$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

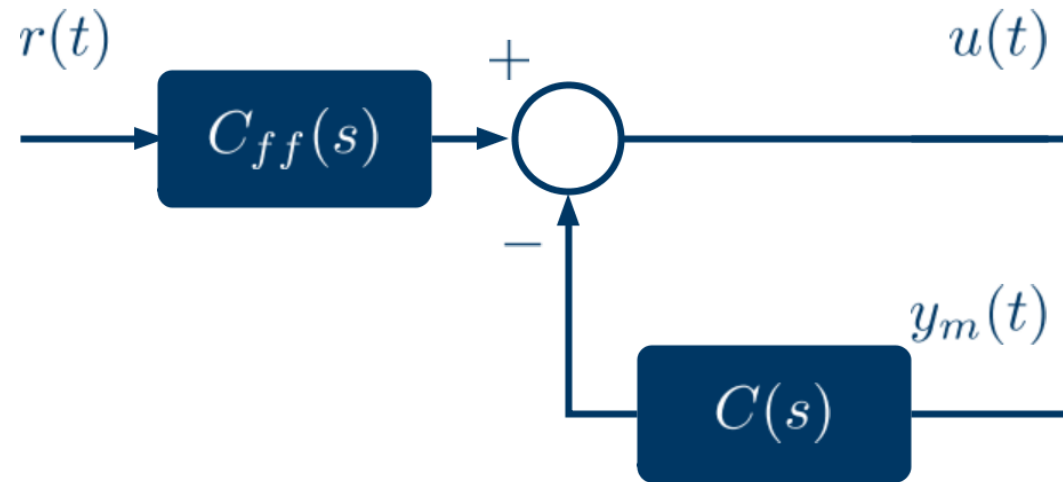


# PONDERACIÓN DE LA REFERENCIA



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

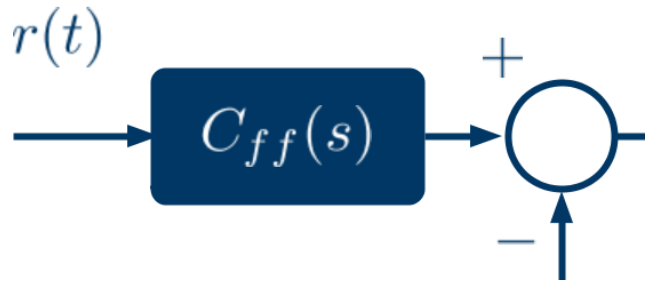
# PONDERACIÓN DE LA REFERENCIA



$$u_{ff}(t) = K_p \left( r(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t r(\tau) d\tau + T_d \frac{dr(t)}{dt} \right)$$

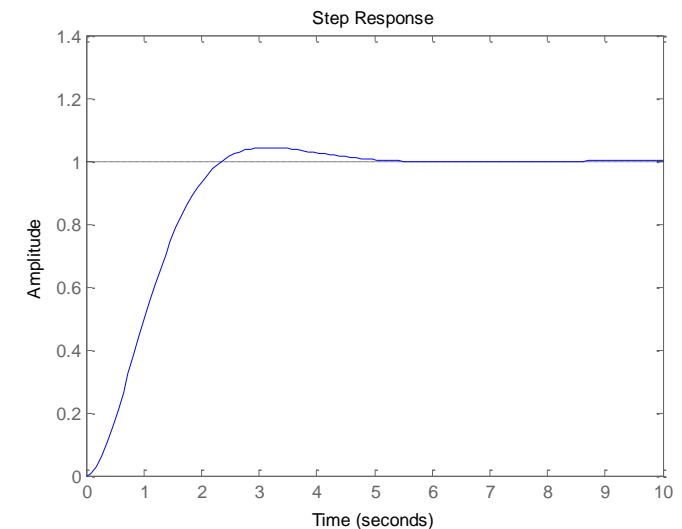
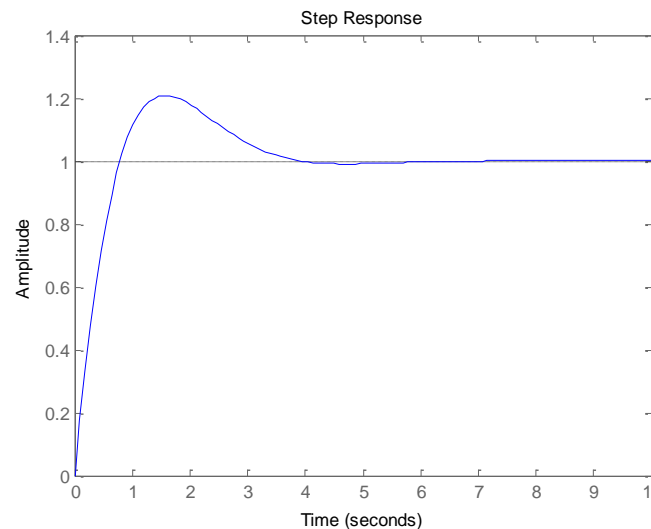
$$u_{fb}(t) = K_p \left( y_m(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t y_m(\tau) d\tau + T_d \frac{dy_m(t)}{dt} \right)$$

# PONDERACIÓN DE LA REFERENCIA



$$u_{ff}(t) = K_p \left( b \cdot r(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t r(\tau) d\tau + T_d \cdot c \cdot \frac{dr(t)}{dt} \right)$$

- Ponderaciones ( $b < 1$ ,  $c < 1$ ) para reducir la sobreoscilación ante cambios en la referencia
- No tiene efecto ante cambios en la perturbación



## Nomenclatura:

- Controladores PID con dos grados de libertad (*Two degree of freedom* PID, 2-DOF PID)
- Al término  $C_{ff}(s)$  se le denomina controlador de Pre-alimentación (*feedforward*)

## Casos particulares:

- $b=0, c=0 \rightarrow$  Regulador **I-PD**
- $b=1, c=0 \rightarrow$  Regulador **PI-D**

## Importante:

- Los parámetros  $b$  y  $c$  se pueden escoger libremente según la respuesta deseada frente a cambios en la referencia sin afectar a la respuesta frente a perturbación.

## Excepciones:

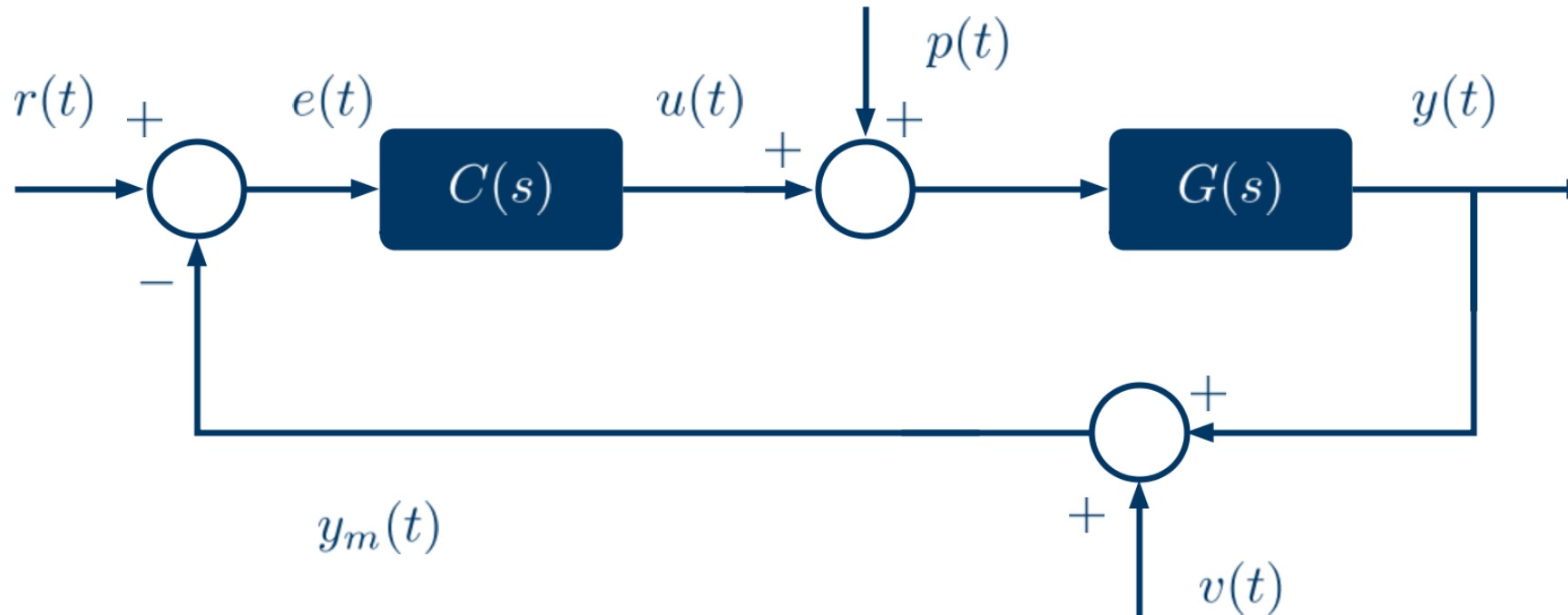
1. Controlador sin integrador (P o PD); se debe escoger  $b=1$ .
2. Seguimiento de referencias tipo rampa (siempre PI o PID);  $b=1$ .

# ANTI WIND-UP DEL INTEGRADOR

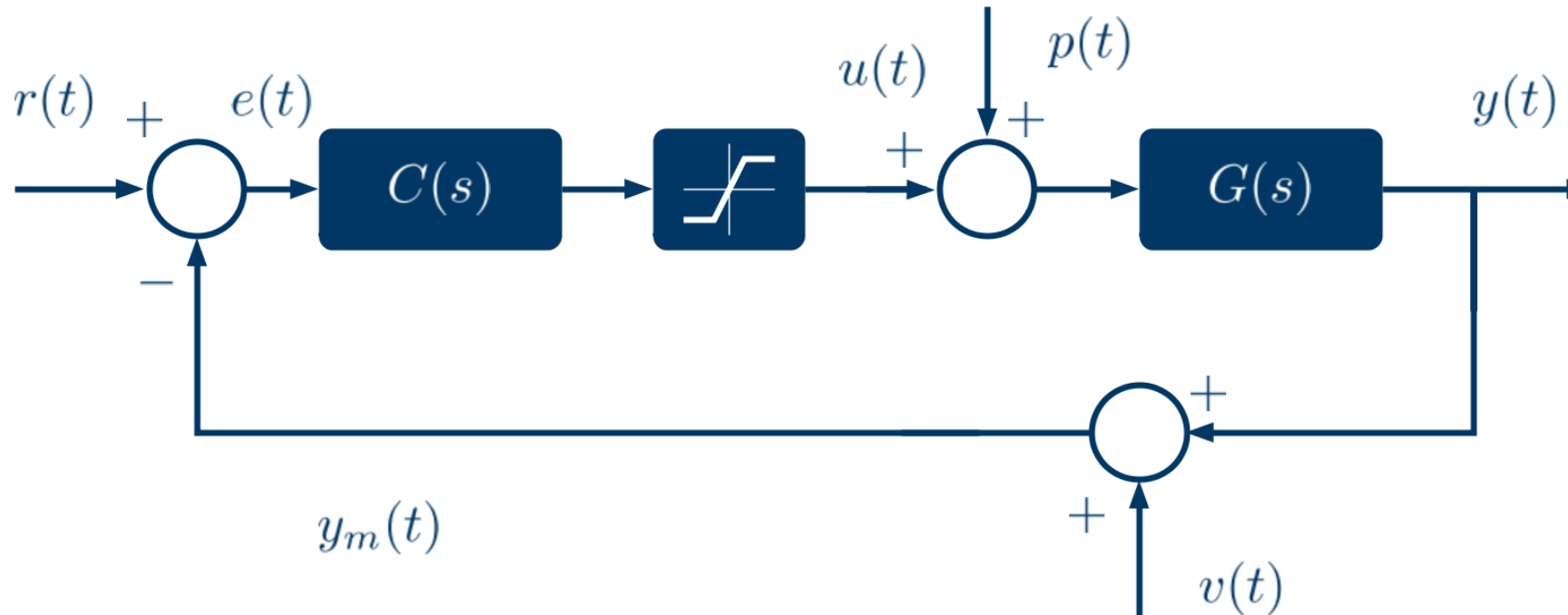
EFFECTO DE ACTUADORES SATURADOS

MODELO DEL ANTI WIND-UP CONTINUO Y RESPUESTA

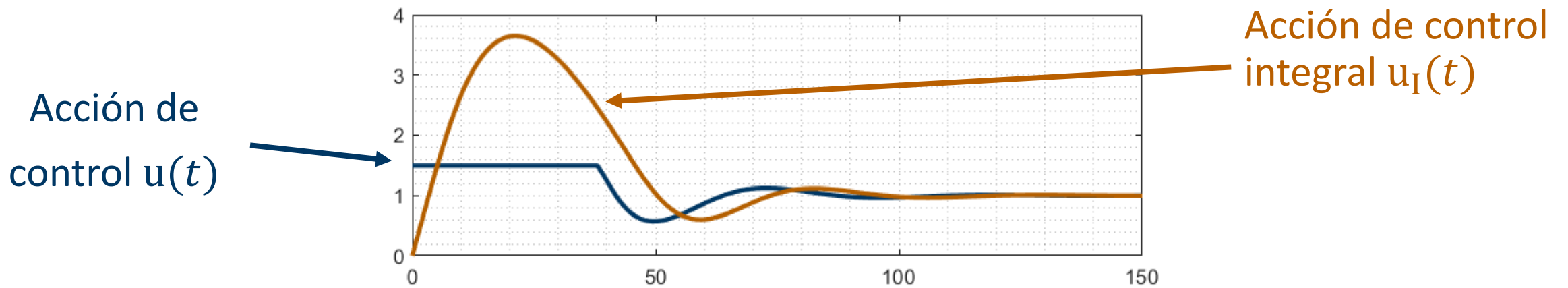
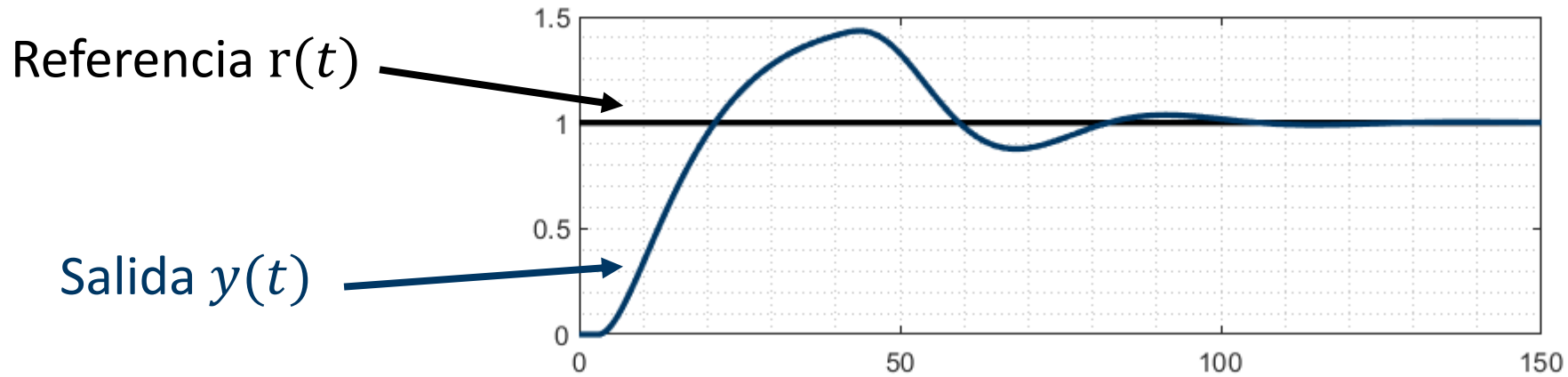
# ANTI WIND-UP DEL INTEGRADOR



# ANTI WIND-UP DEL INTEGRADOR

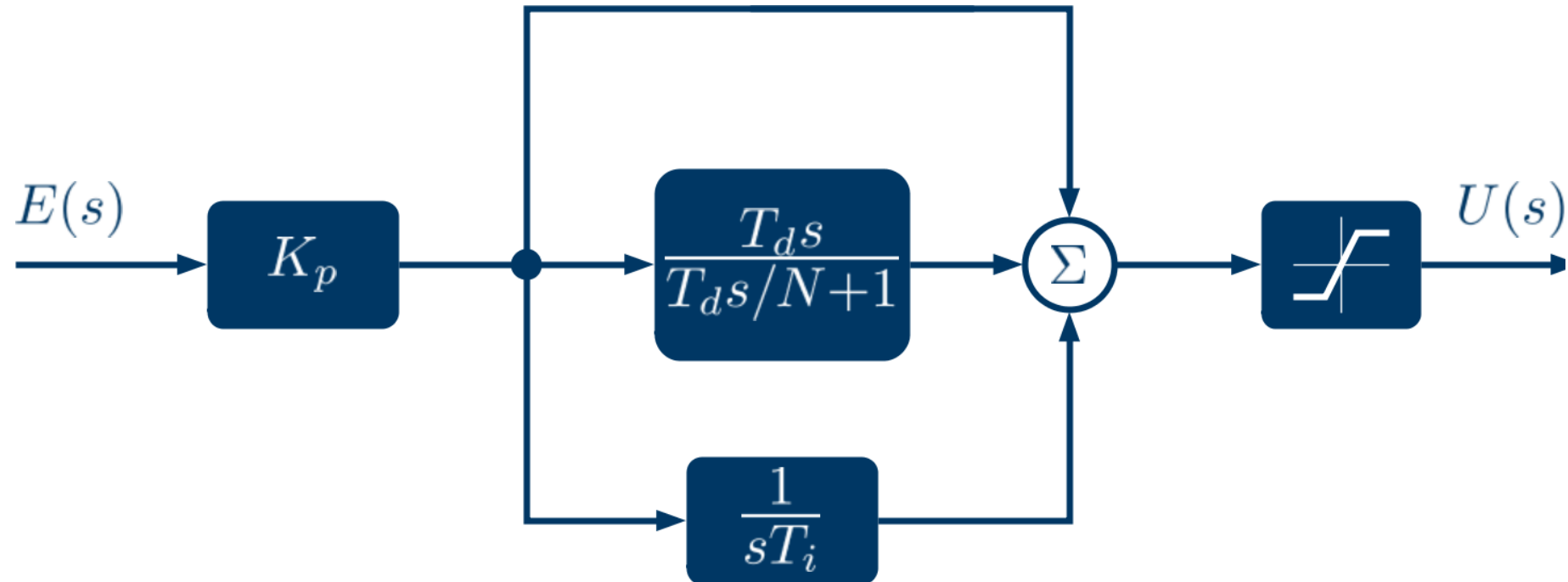


# ANTI WIND-UP DEL INTEGRADOR

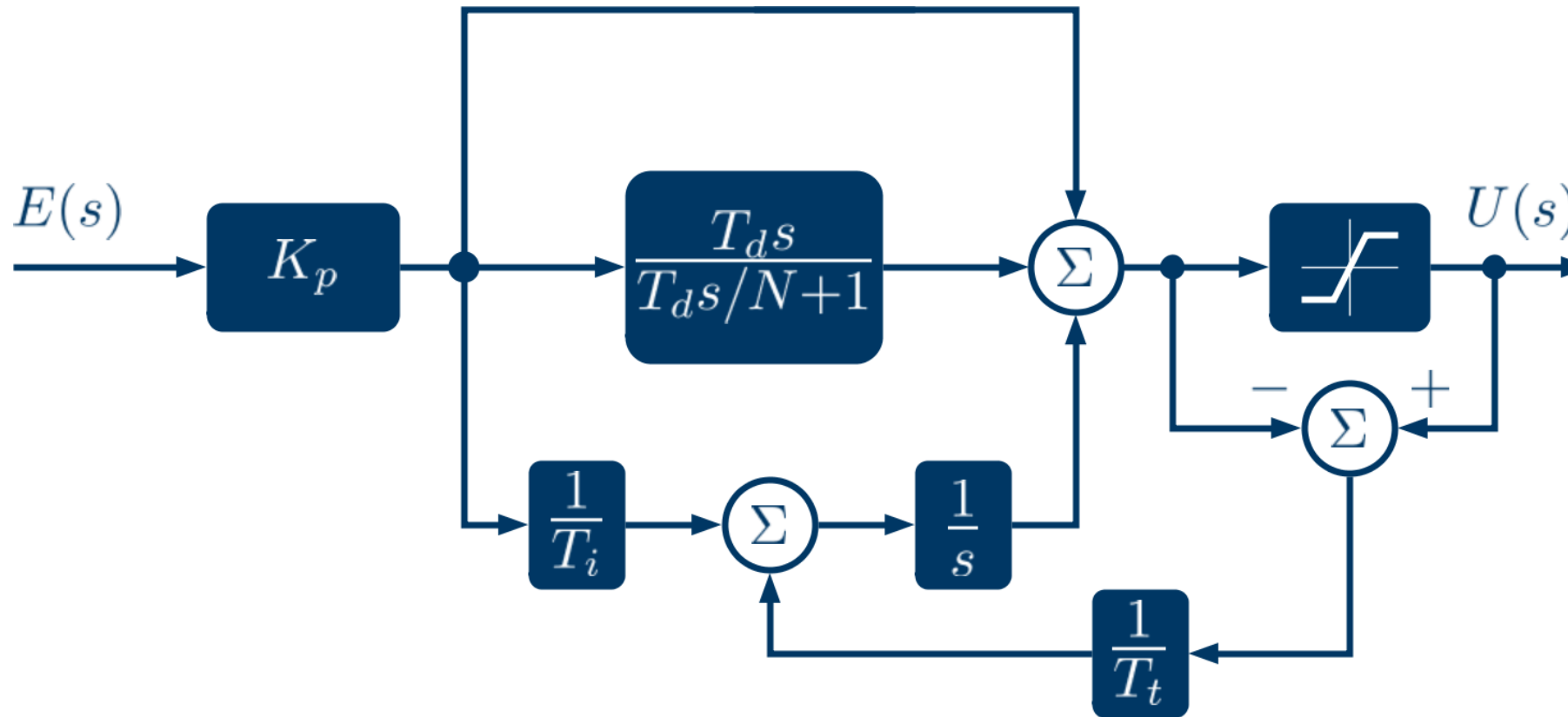




# ANTI WIND-UP DEL INTEGRADOR



# ANTI WIND-UP DEL INTEGRADOR

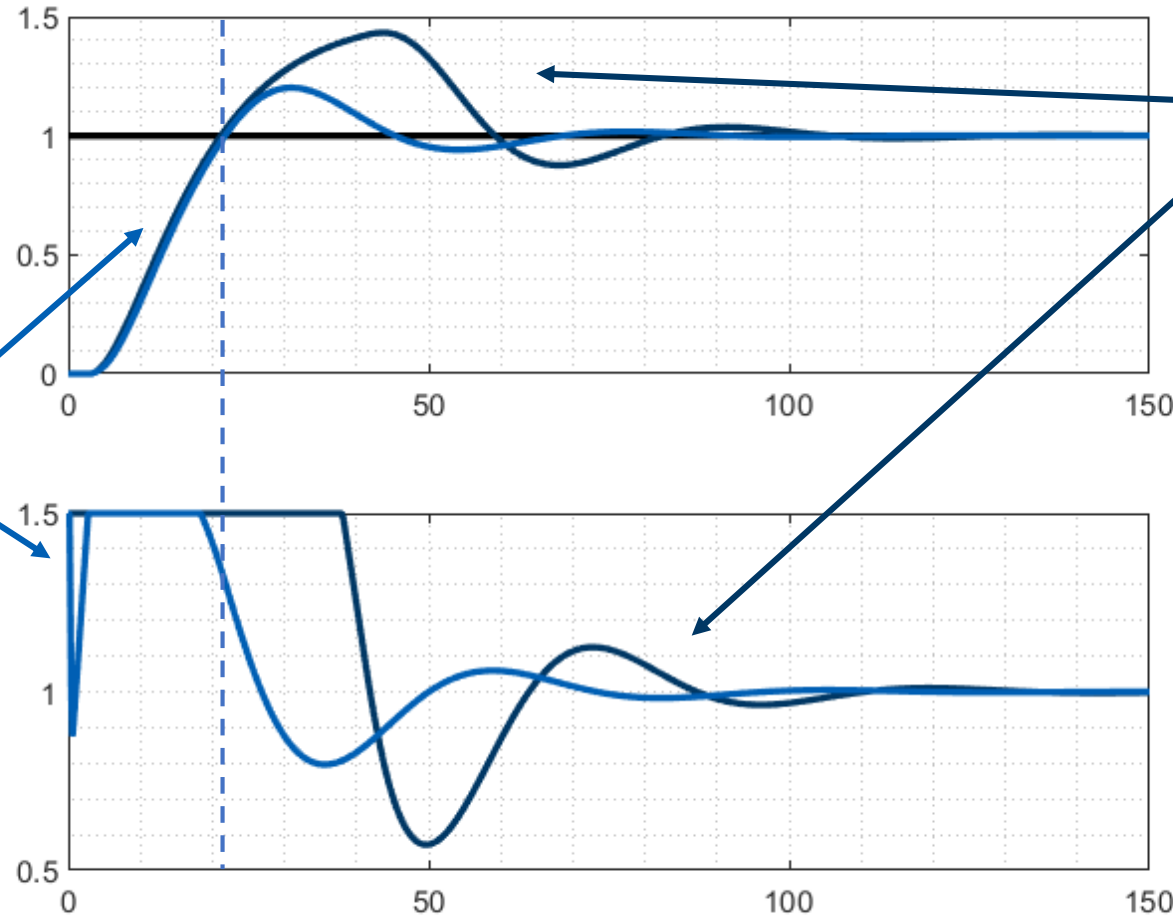


$$T_i \geq T_t \geq T_d$$

$$T_t = \sqrt{T_i \cdot T_d}$$

# ANTI WIND-UP DEL INTEGRADOR

Con anti wind-up

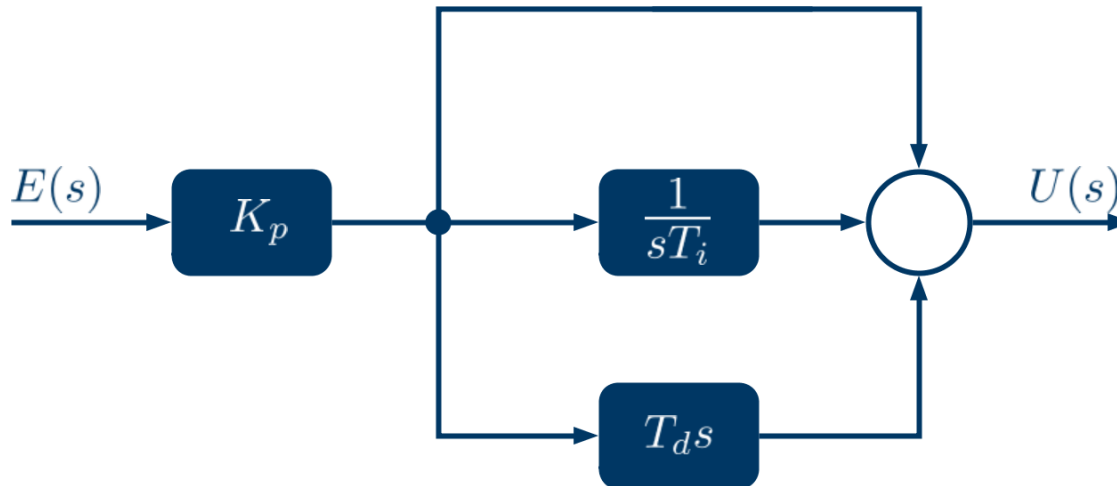


Sin anti wind-up

# FORMATOS ESTÁNDAR DE PID

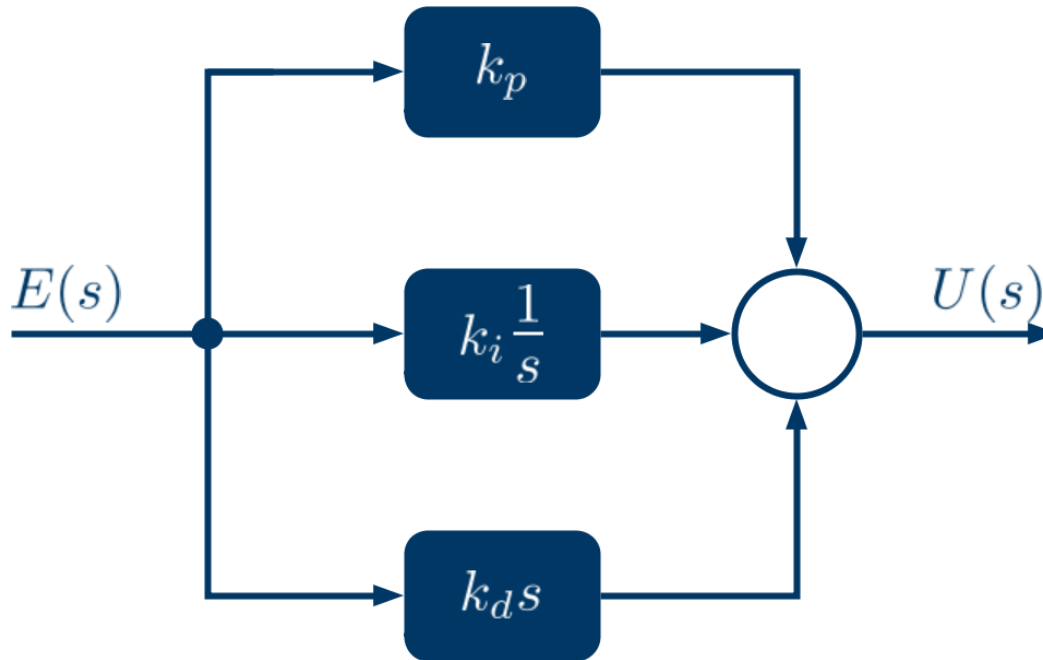
IDEAL, PARALELO, SERIE

## Controlador PID formato Estándar (ISA, ideal, non-interacting):



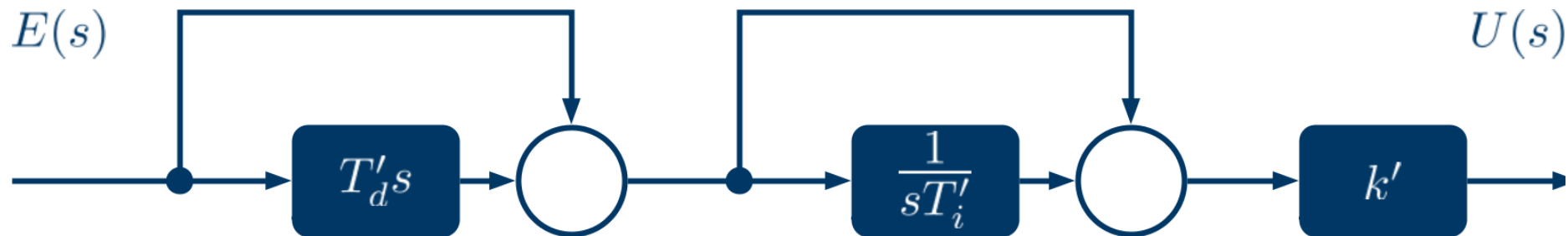
$$U(s) = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{s \cdot T_i} + T_d \cdot s \right) \cdot E(s)$$

## Controlador PID en PARALELO:



$$U(s) = \left( k_p + k_i \cdot \frac{1}{s} + k_d \cdot s \right) \cdot E(s)$$

## Controlador PID en SERIE (interacting form):



$$U(s) = k' \cdot \left( 1 + \frac{1}{s \cdot T'_i} \right) \cdot (1 + T'_d s) \cdot E(s)$$

Equivalencias SERIE a ideal:

$$K_p = k' \cdot \left( 1 + \frac{T'_d}{T'_i} \right)$$

$$T_i = T'_i + T'_d$$

$$T_d = \frac{T'_i \cdot T'_d}{T'_i + T'_d}$$

Equivalencias ideal a SERIE:

(solo si  $T_i \geq 4T_d$ )

$$k' = \frac{K_p}{2} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 - 4T_d/T_i} \right)$$

$$T'_i = \frac{T_i}{2} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 - 4T_d/T_i} \right)$$

$$T'_d = \frac{T_i}{2} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - 4T_d/T_i} \right)$$

Equivalencias ideal a par:

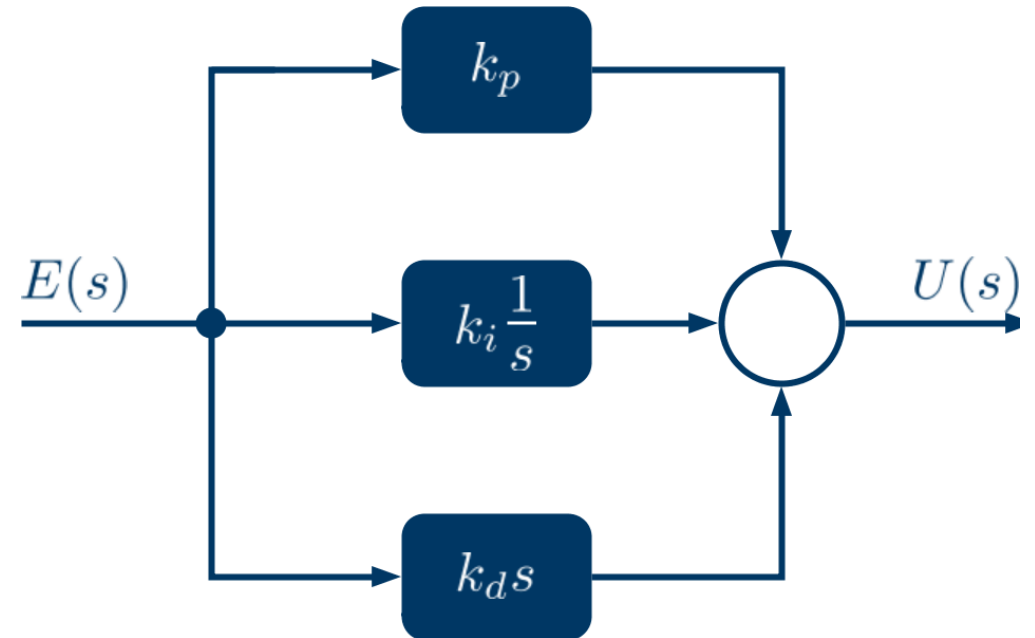
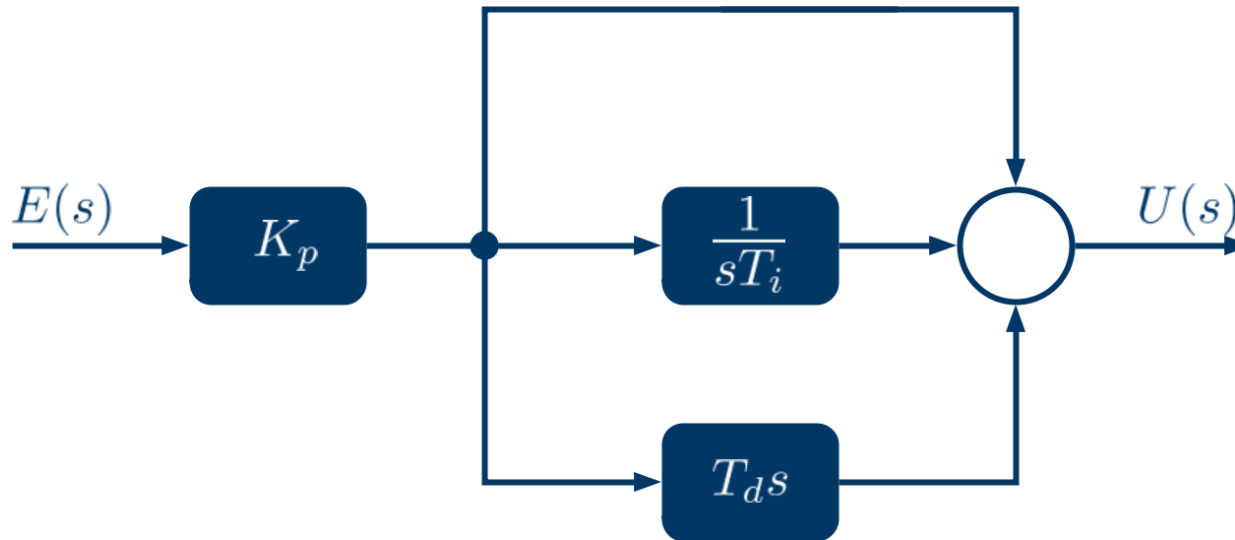
$$k_p = K_p$$

$$k_i = \frac{K_p}{T_i}$$

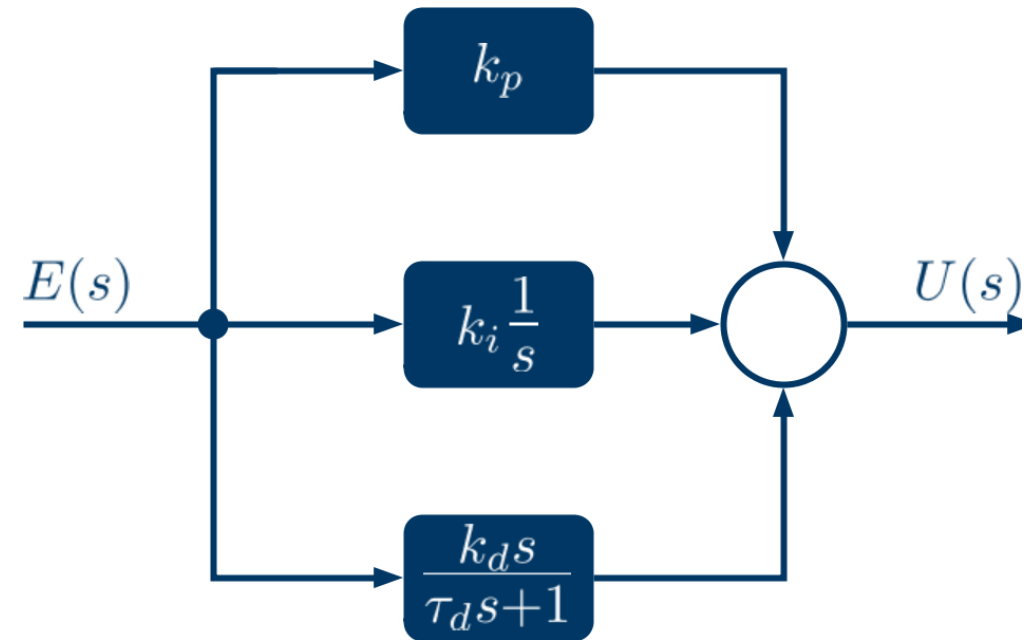
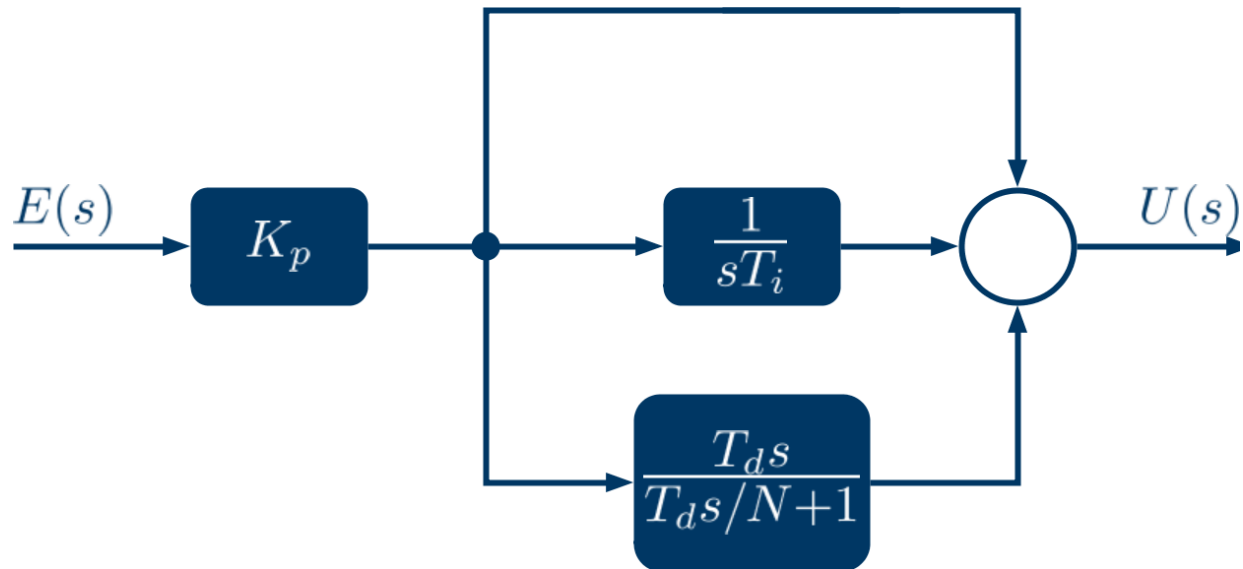
$$k_d = K_p \cdot T_d$$



Filtro de la derivada forma ideal y en paralelo:



Filtro de la derivada forma ideal y en paralelo:



Filtro de la derivada forma ideal y en paralelo:

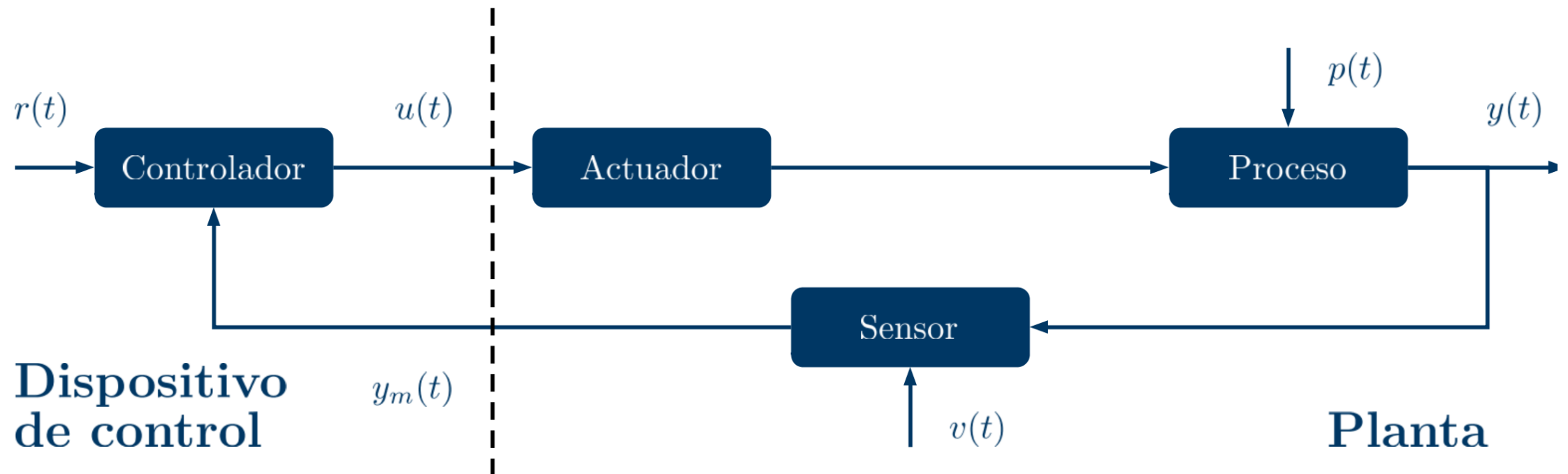


$$\tau_d = \frac{T_d}{N}$$

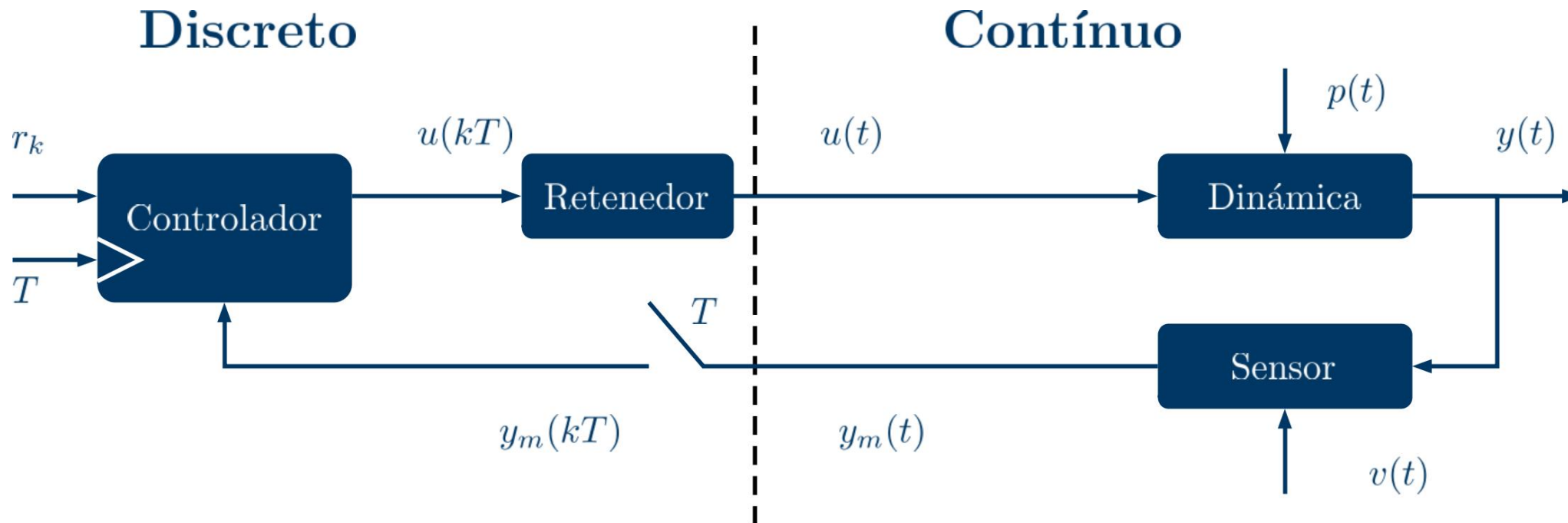
# IMPLEMENTACIÓN DIGITAL DEL PID

DISCRETIZACIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y PERIODO

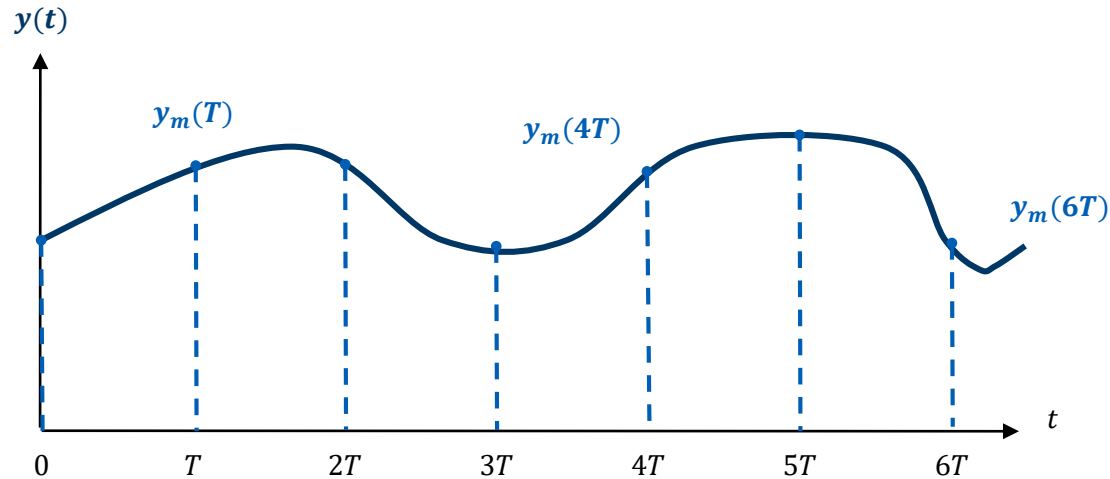
# IMPLEMENTACIÓN DIGITAL DEL PID



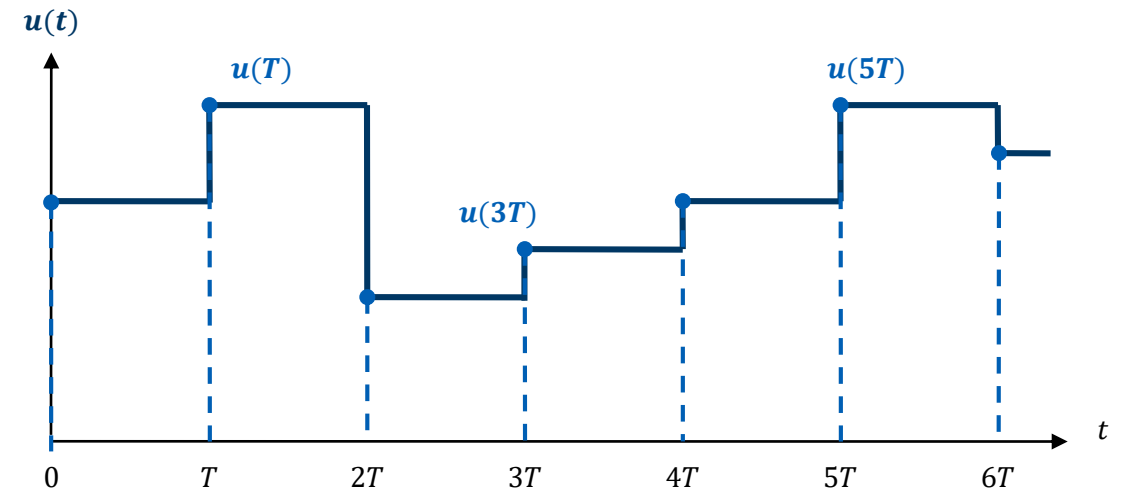
# IMPLEMENTACIÓN DIGITAL DEL PID



## Contínuo a Discreto

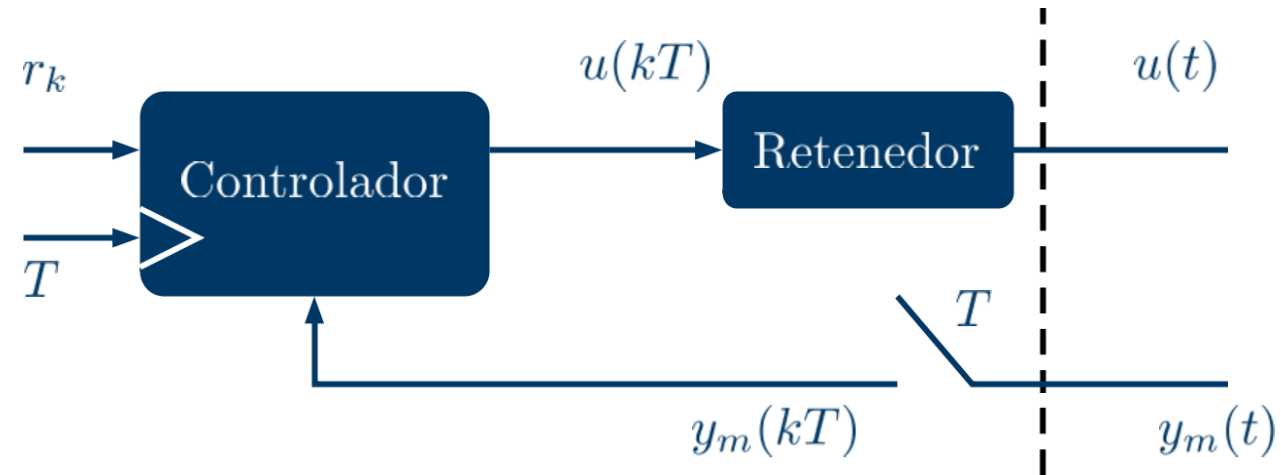


## Discreto a contínuo



Rutina periódica consiste en:

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



Implementar:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_d \cdot s}{\frac{T_d}{N} \cdot s + 1} \right) = P + I + D$$



Término Proporcional:

$$P(t) = K_p \cdot e(t) \quad P_k = K_p \cdot e_k$$

Término Derivativo:

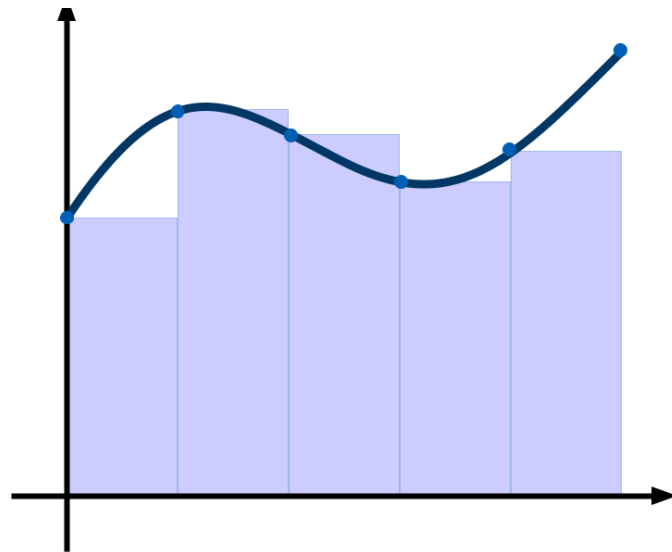
$$\frac{T_d}{N} \cdot \frac{dD(t)}{dt} + D(t) = -K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Término Integral:

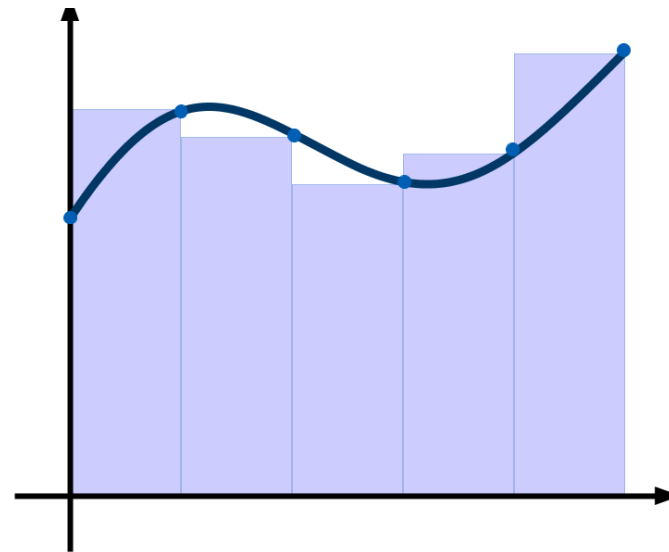
$$I(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \rightarrow \frac{dI(t)}{dt} = \frac{K_p}{T_i} e$$

Varias formas de abordar el paso a ecuación en diferencias

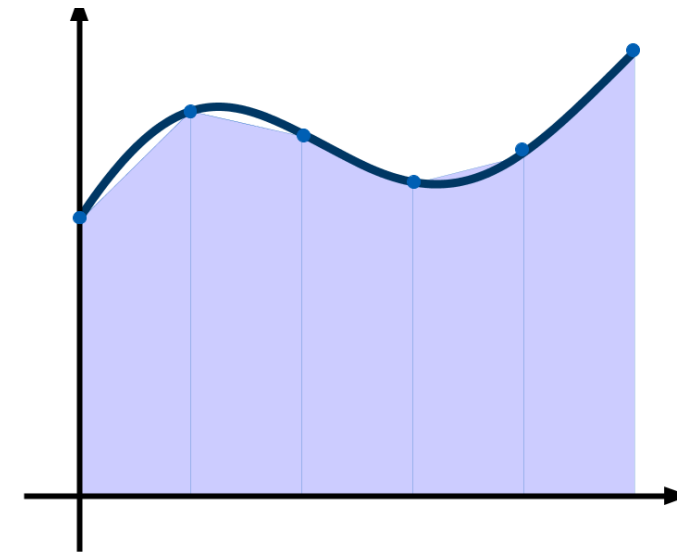
# IMPLEMENTACIÓN DIGITAL DEL PID



Forward Euler



Backward Euler



Tustin o Bilinear

Término Integral:

$$I_k = I_{k-1} + b_{i1} \cdot e_k + b_{i2} \cdot e_{k-1}$$

Término Derivativo:

$$D_k = a_d \cdot D_{k-1} + b_d \cdot (e_k - e_{k-1})$$

	$b_{i1}$	$b_{i2}$	$a_d$	$b_d$
<b>Forward</b>	0	$\frac{K_p T}{T_i}$	$1 - \frac{NT}{T_d}$	$K_p N$
<b>Backward</b>	$\frac{K_p T}{T_i}$	0	$\frac{T_d}{T_d + NT}$	$\frac{K_p T_d N}{T_d + NT}$
<b>Tustin</b>	$\frac{K_p T}{2T_i}$	$\frac{K_p T}{2T_i}$	$\frac{2T_d - NT}{2T_d + NT}$	$\frac{2K_p T_d N}{2T_d + NT}$

# IMPLEMENTACIÓN DIGITAL DEL PID



```
y0=entrada analógica 1;  
r0=entrada analógica 2; (o ref=variable interna)  
D=ad*D+bd*(c*r0-c*r1-y0+y1);  
I=I+bi1*(r0-y0);  
u=Kp*(b*r0-y0)+D+I;  
if ((u<umin)&&(e<0)) || ((u>umax)&&(e>0)) then  
    I=I-bi1*(r0-y0);  
end_if  
if (u<umin) then  
    u=umin;  
end_if  
if (u>umax) then  
    u=umax;  
end_if  
salida analógica=u;  
r1=r0;  
y1=y0;
```

# IMPLEMENTACIÓN DIGITAL DEL PID

```
y0=entrada analógica 1;  
r0=entrada analógica 2; (o ref=variable interna)  
D=ad*D+bd*(c*r0-c*r1-y0+y1);  
I=I+bi1*(r0-y0);  
u=Kp*(b*r0-y0)+D+I;  
if ((u<umin)&&(e<0)) || ((u>umax)&&(e>0)) then  
    I=I-bi1*(r0-y0);  
end_if  
if (u<umin) then  
    u=umin;  
end_if  
if (u>umax) then  
    u=umax;  
end_if  
salida analógica=u;  
r1=r0;  
y1=y0;
```

Ponderación de la referencia



# IMPLEMENTACIÓN DIGITAL DEL PID

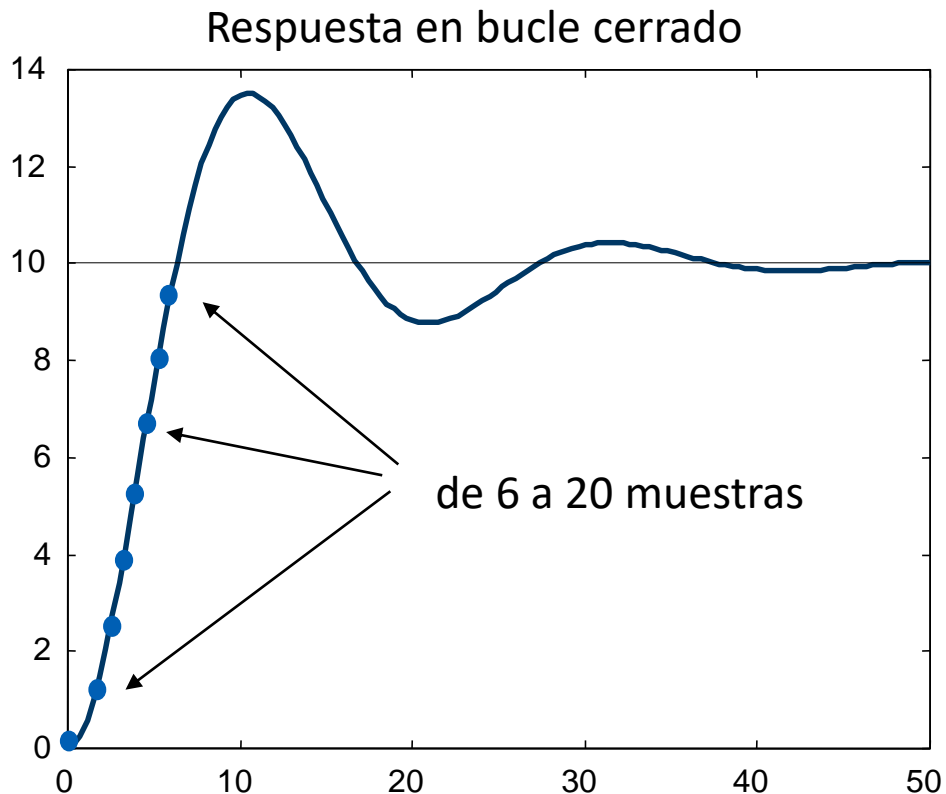


```
y0=entrada analógica 1;  
r0=entrada analógica 2; (o ref=variable interna)  
D=ad*D+bd*(c*r0-c*r1-y0+y1);  
I=I+bi1*(r0-y0);  
u=Kp*(b*r0-y0)+D+I;  
if ((u<umin)&&(e<0)) || ((u>umax)&&(e>0)) then  
    I=I-bi1*(r0-y0);  
end_if  
if (u<umin) then  
    u=umin;  
end_if  
if (u>umax) then  
    u=umax;  
end_if  
salida analógica=u;  
r1=r0;  
y1=y0;
```

Ponderación de la referencia

Saturación y anti wind-up

## Selección del periodo de muestreo $T$



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

- $T \in \left[ \frac{t_r}{20}, \frac{t_r}{6} \right]$

Que quepan entre 6 y 20 muestras en la subida.

Un valor típico:  $T \approx \frac{t_r}{10}$ .

# SELECCIÓN DEL TIPO DE CONTROLADOR

RELACIÓN ENTRE OBJETIVOS Y PARÁMETROS

CARACTERÍSTICAS DE CONTROLADORES

ENTRE EL PI Y EL PID



Relación entre objetivos de diseño y parámetros del controlador

**Seguimiento de referencia y rechazo de perturbaciones**

**Atenuación del ruido de medida**

**Robustez frente a cambios en el proceso**

## ¿Qué controlador escoger?

### Controlador PI

- El ruido de medida es grande.
- Se requiere respuesta suave y lenta.
- El proceso tiene mucho retardo.

### Controlador P o PD

- Excepcionalmente en procesos con integrador.
- Lazo interno de un control en cascada.

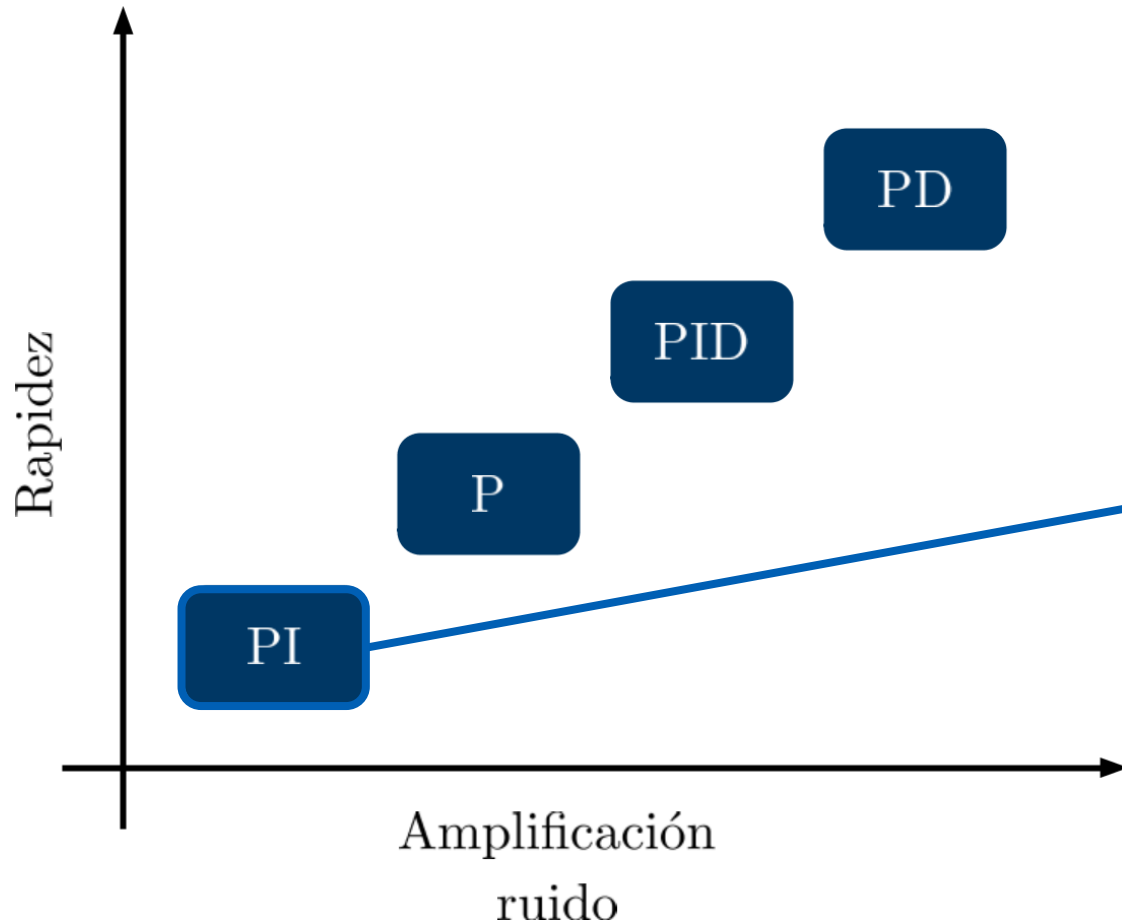
### Controlador PID

- El ruido de medida NO es grande.
- Se requiere respuesta lo más rápida.
- El proceso no tiene mucho retardo.

### Otro tipo de controladores o estructuras

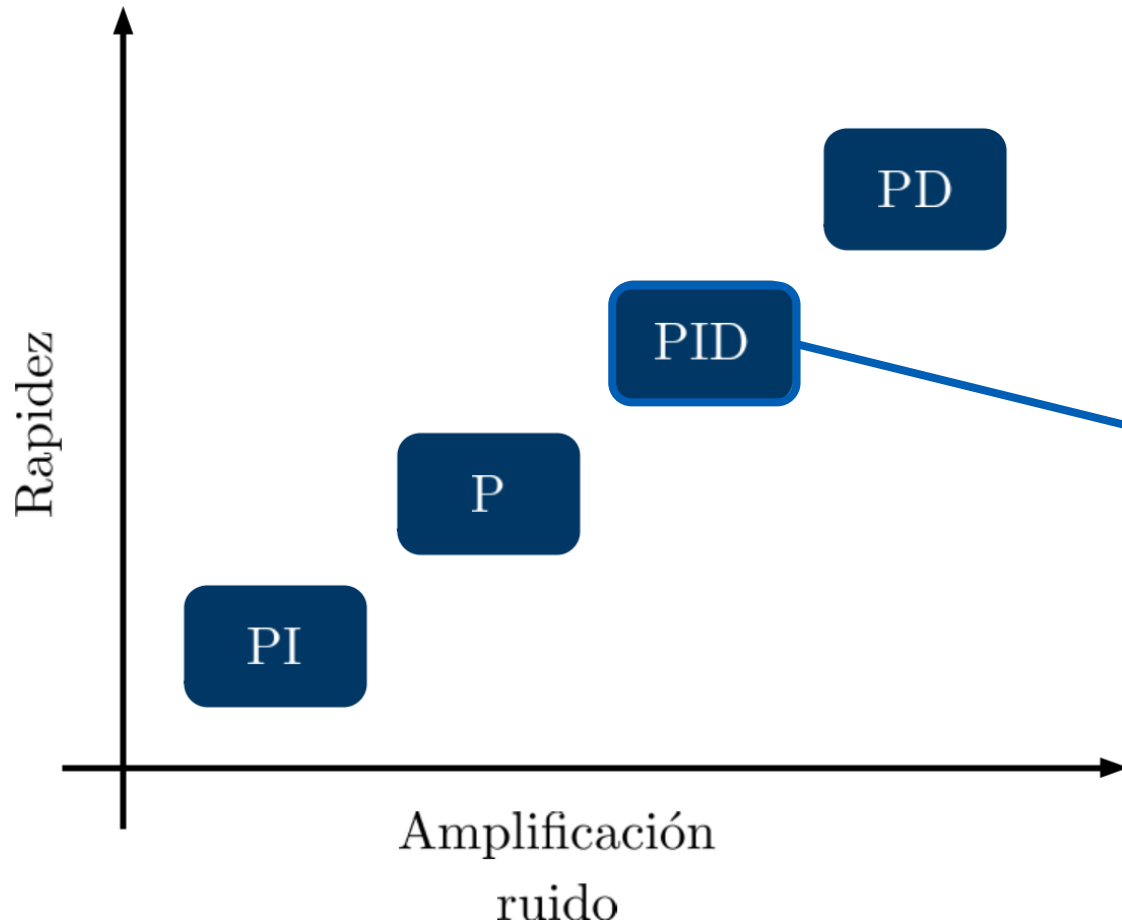
- Variantes de lazos según sensores y actuadores: Predictor de Smith, control en cascada...
- Realimentación de estados, Gain-scheduling,...

# SELECCIÓN DEL TIPO DE CONTROLADOR



Si el sensor es muy ruidoso, o bien se requiere una respuesta muy suave, o bien el proceso tiene un retardo grande, lo más común es elegir el **controlador PI**.

# SELECCIÓN DEL TIPO DE CONTROLADOR



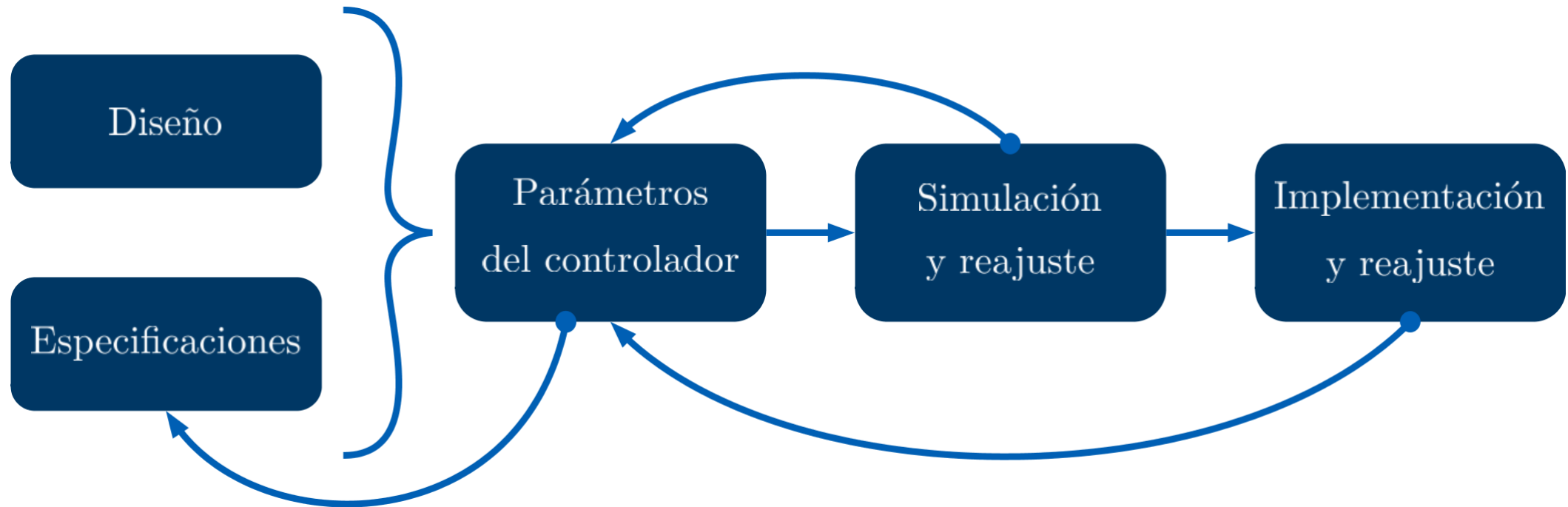
Si el sensor no es muy ruidoso y el sistema no tiene un retardo grande se puede elegir el **controlador PID** completo.

Pero, hay que ajustar el parámetro de filtro N adecuadamente.

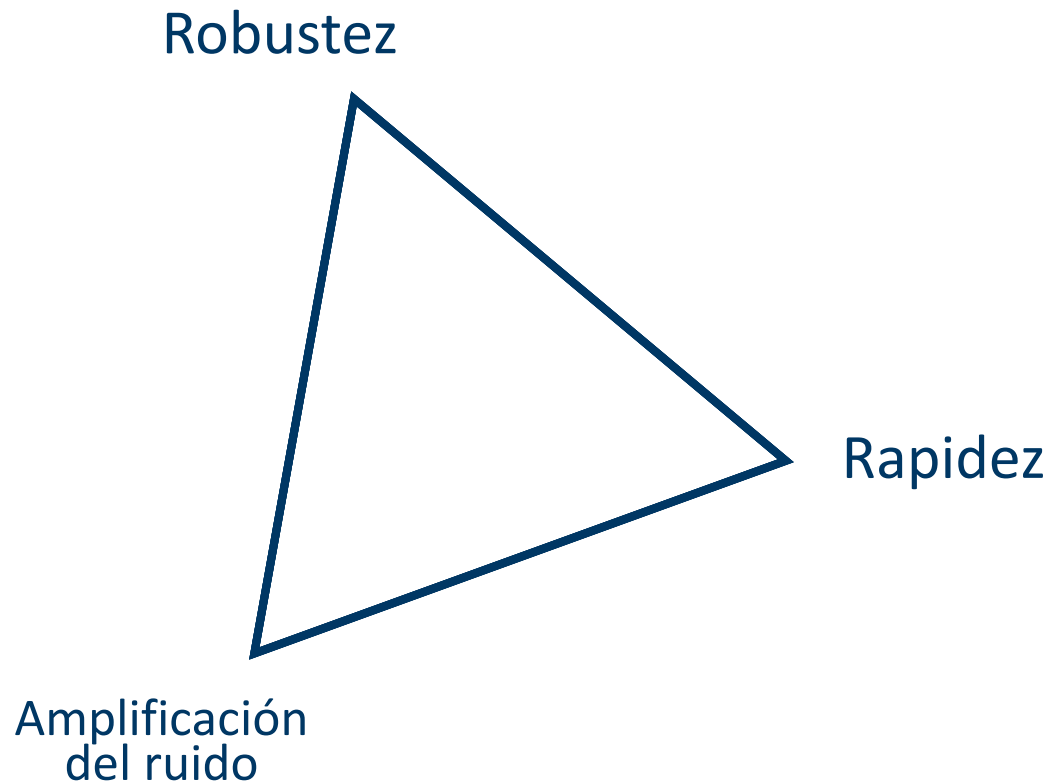
# TÉCNICAS DE DISEÑO

PRINCIPIOS Y ESTRATÉGIAS

Ajustar **NO** es un procedimiento unidireccional, es iterativo



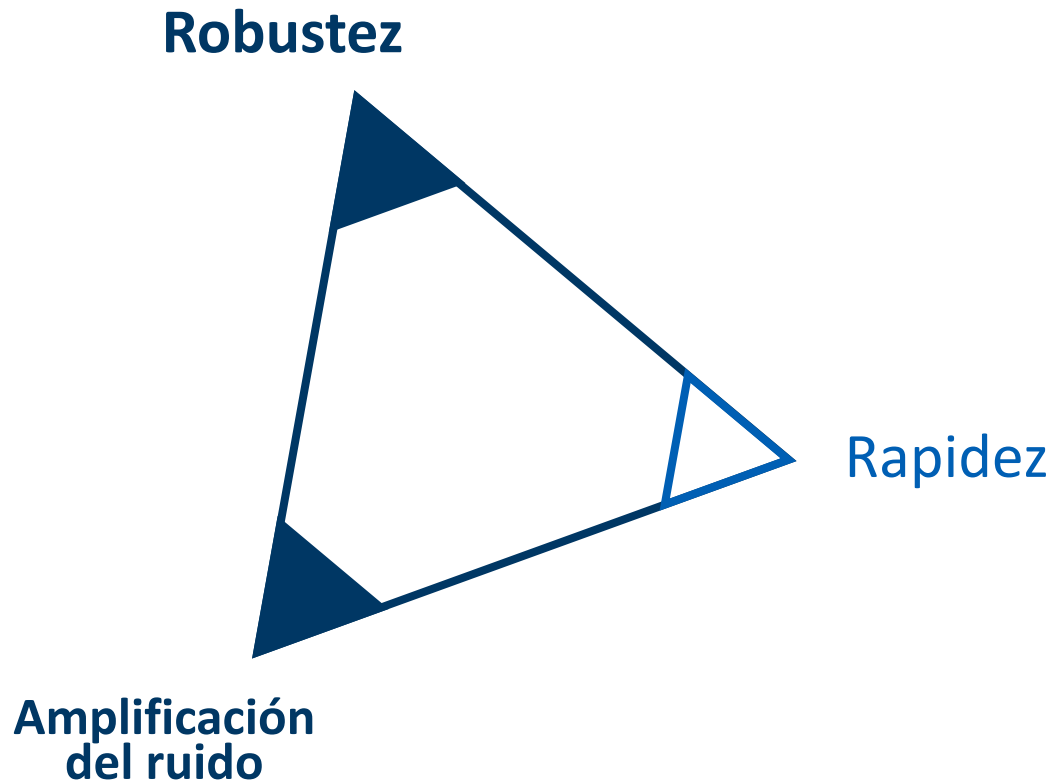
El ajuste es un compromiso entre tres objetivos



3 Estrategias de ajuste de PID:

**Fijar 2 vértices y optimizar el restante**

El ajuste es un compromiso entre tres objetivos

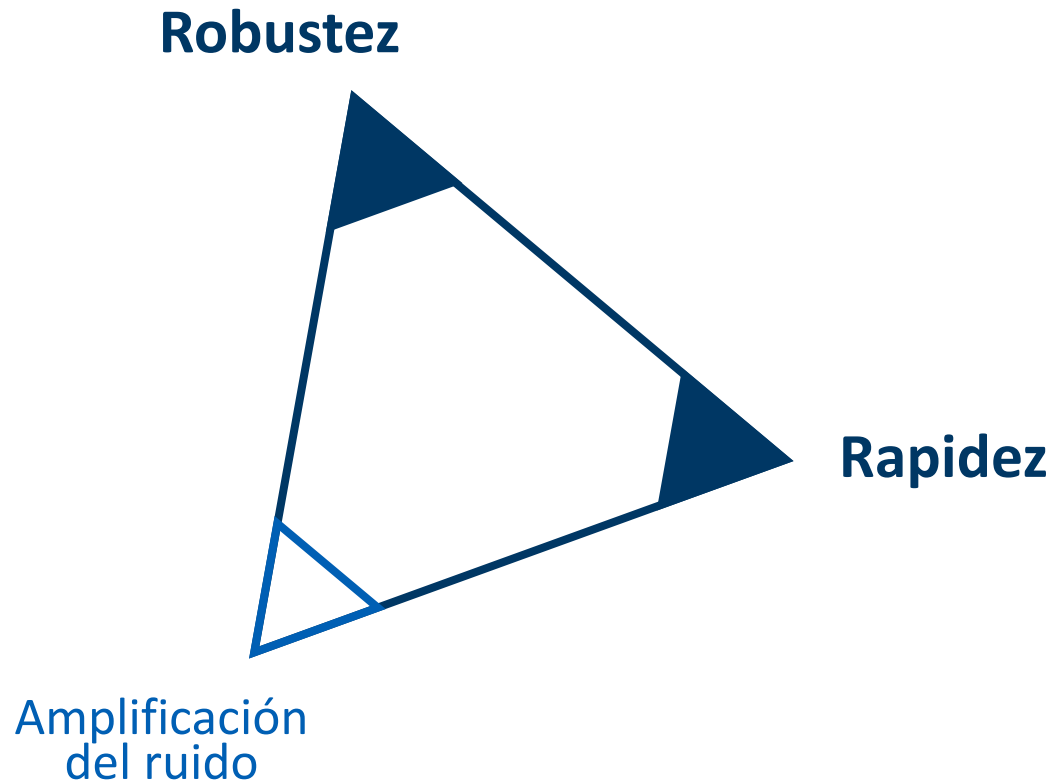


3 Estrategias de ajuste de PID:

1. Fijar **robustez** y **amplificación del ruido** y optimizar **rapidez** de respuesta.



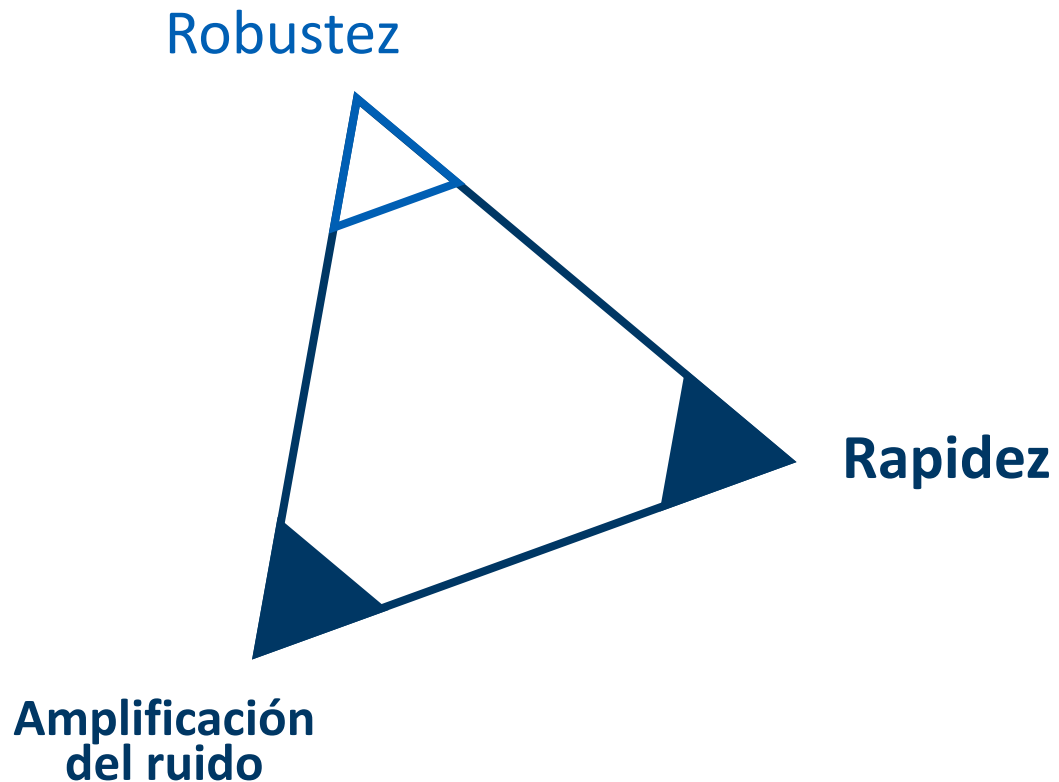
El ajuste es un compromiso entre tres objetivos



3 Estrategias de ajuste de PID:

1. Fijar **robustez** y **amplificación del ruido** y minimizar la **rapidez** de respuesta.
2. Fijar **robustez** y **rapidez** de respuesta y minimizar la **amplificación del ruido**.
3. Fijar **rapidez** y **amplificación del ruido** y minimizar la **robustez**.

El ajuste es un compromiso entre tres objetivos

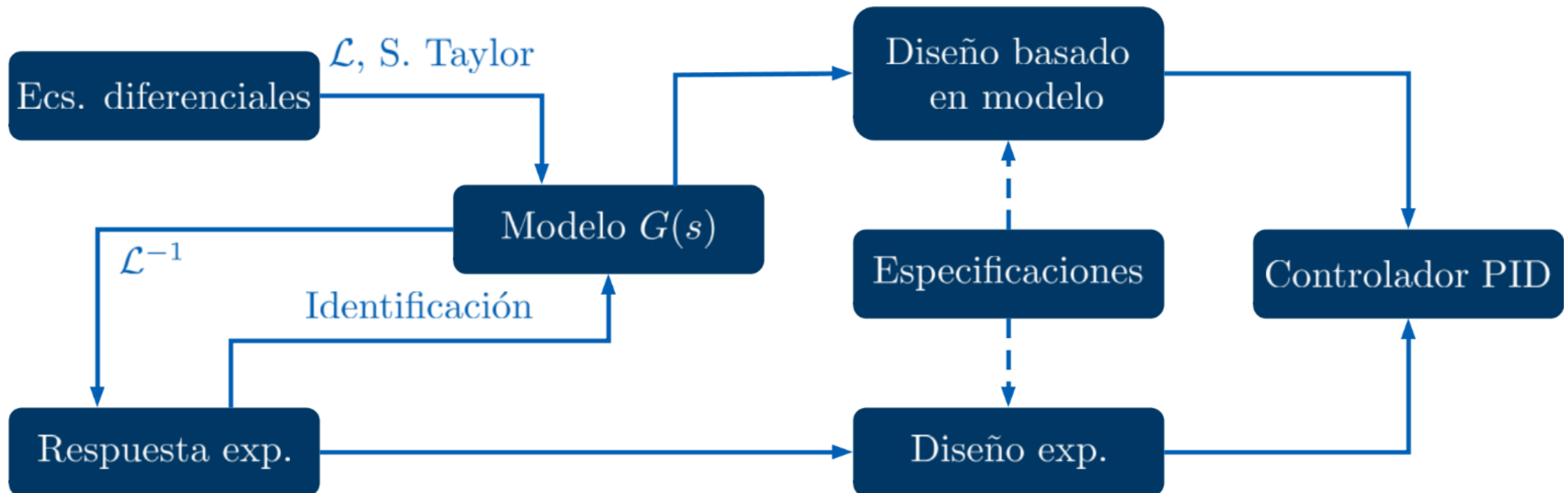


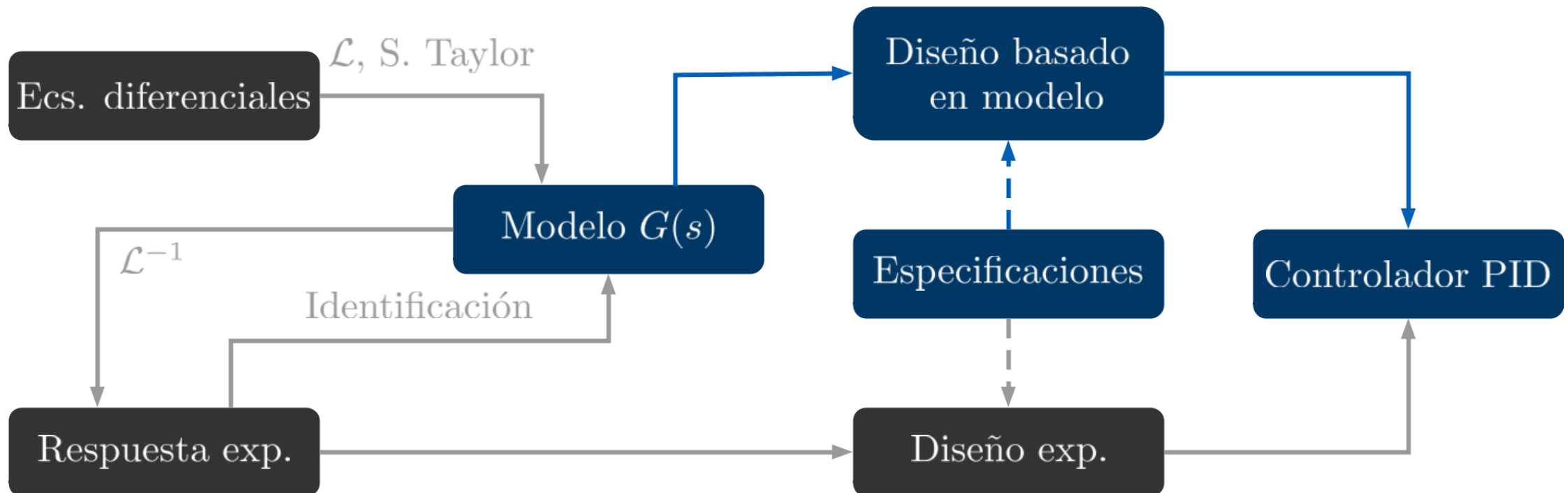
3 Estrategias de ajuste de PID:

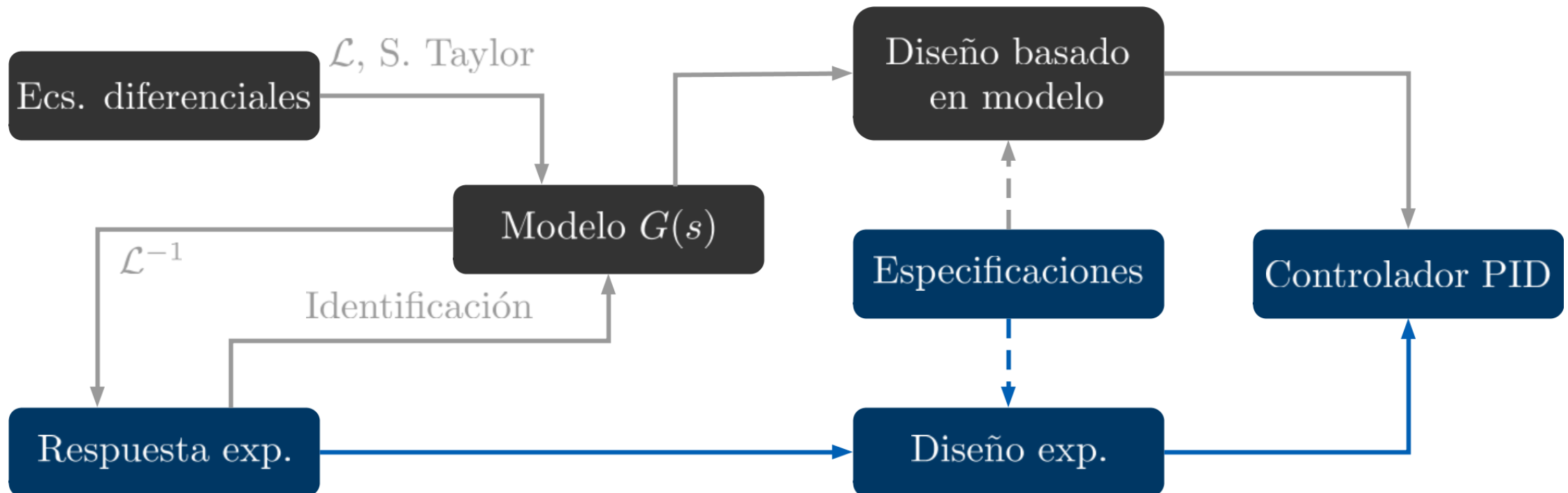
3. Fijar la **rapidez** de respuesta y la **amplificación del ruido** y maximizar la **robustez**.

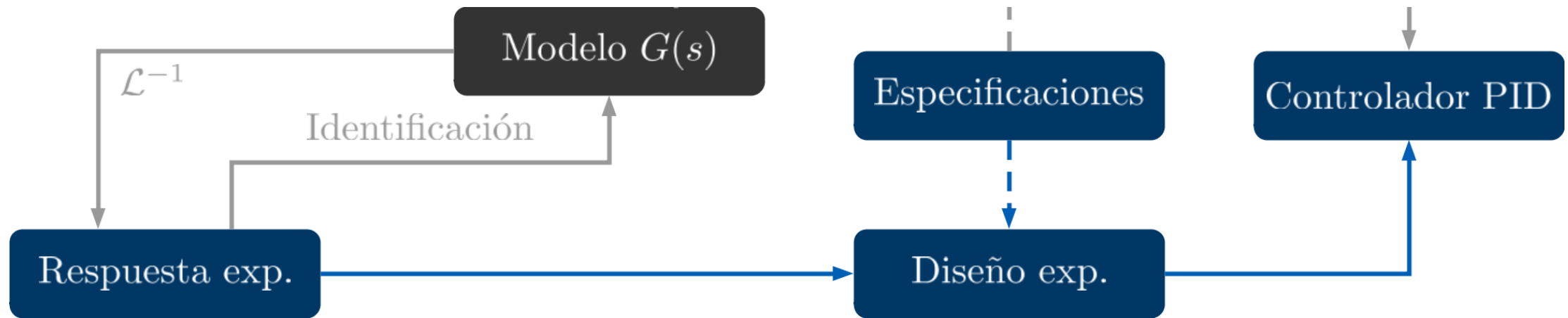
# AJUSTE EXPERIMENTAL

INTRODUCCIÓN









- No requieren conocer un Modelo.
- Se basan en realizar un experimento.
- De la respuesta se extraen parámetros para obtener el controlador.
- Existen distintos métodos según el tipo de experimento y duración.

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO

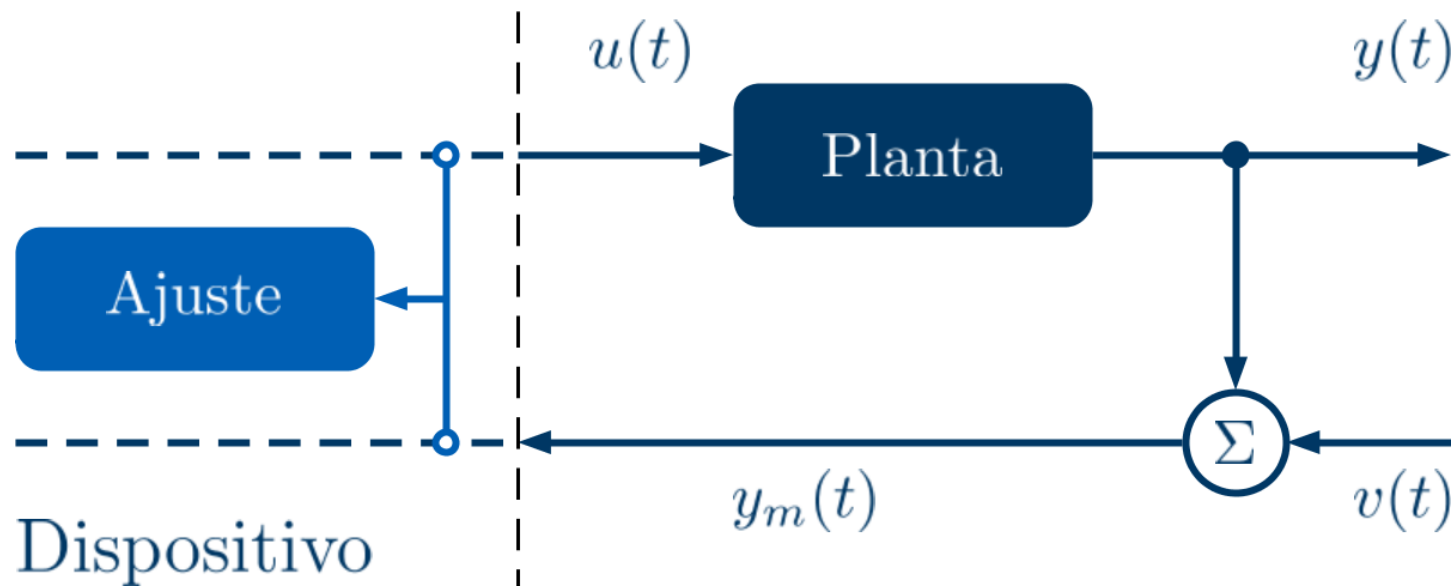
MÉTODOS SIN VALOR FINAL CONOCIDO

MÉTODOS CON VALOR FINAL CONOCIDO



# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO

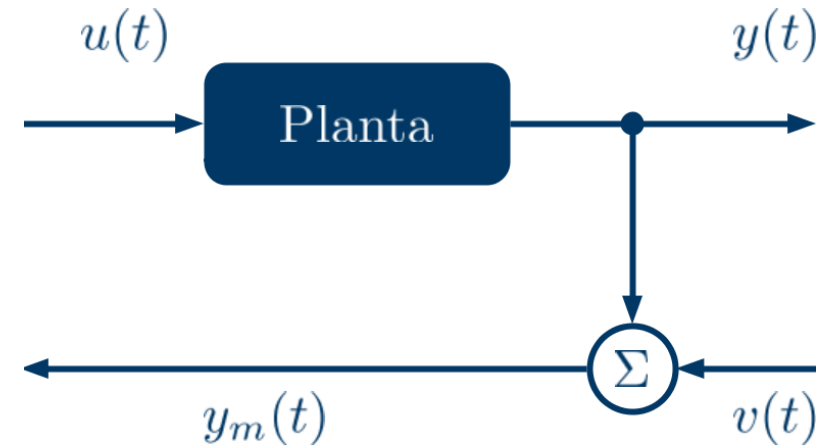
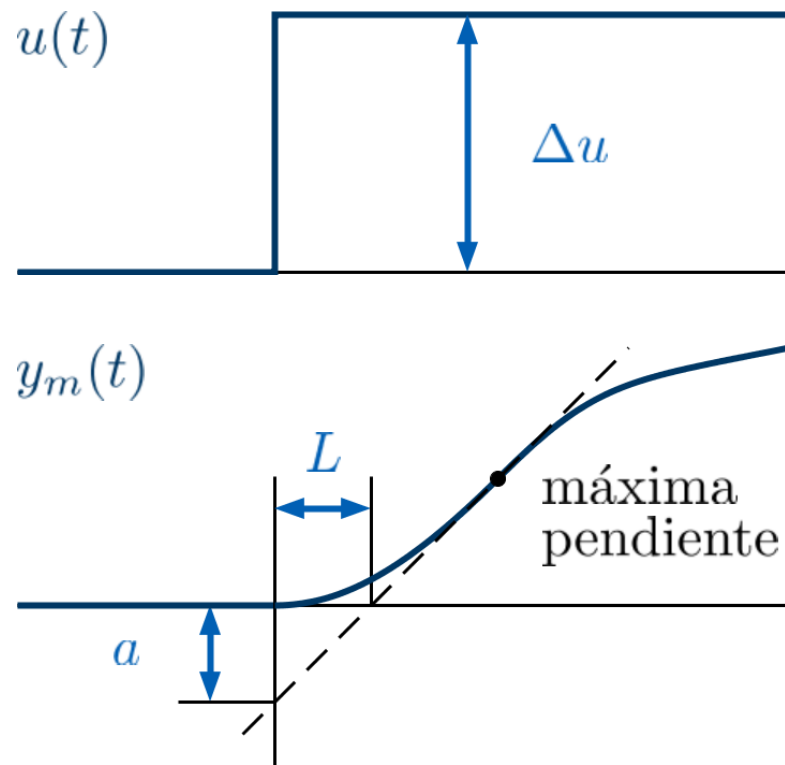
Métodos en bucle abierto:



$u(t)$  no es función de  $y_m(t)$

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO

Escalón sin valor final conocido:



- Con el sistema estabilizado, se incrementa la entrada en  $\Delta u$ .
- No es necesario esperar al valor final de la salida.

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO



Escalón sin valor final conocido:

	PI				PID			
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$K_i$	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$K_i$
<b>Poco robusto</b>	$0.6 \frac{\Delta u}{a}$	$4L$	0	$0.15 \frac{\Delta u}{aL}$	$0.95 \frac{\Delta u}{a}$	$2.4L$	$0.42L$	$0.4 \frac{\Delta u}{aL}$
<b>Robustez intermedia</b>	$0.475 \frac{\Delta u}{a}$	$8.7L$	0	$0.055 \frac{\Delta u}{aL}$	$0.7 \frac{\Delta u}{a}$	$5.2L$	$0.46L$	$0.135 \frac{\Delta u}{aL}$
<b>Muy robusto</b>	$0.35 \frac{\Delta u}{a}$	$13.4L$	0	$0.025 \frac{\Delta u}{aL}$	$0.45 \frac{\Delta u}{a}$	$8L$	$0.5L$	$0.056 \frac{\Delta u}{aL}$

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO

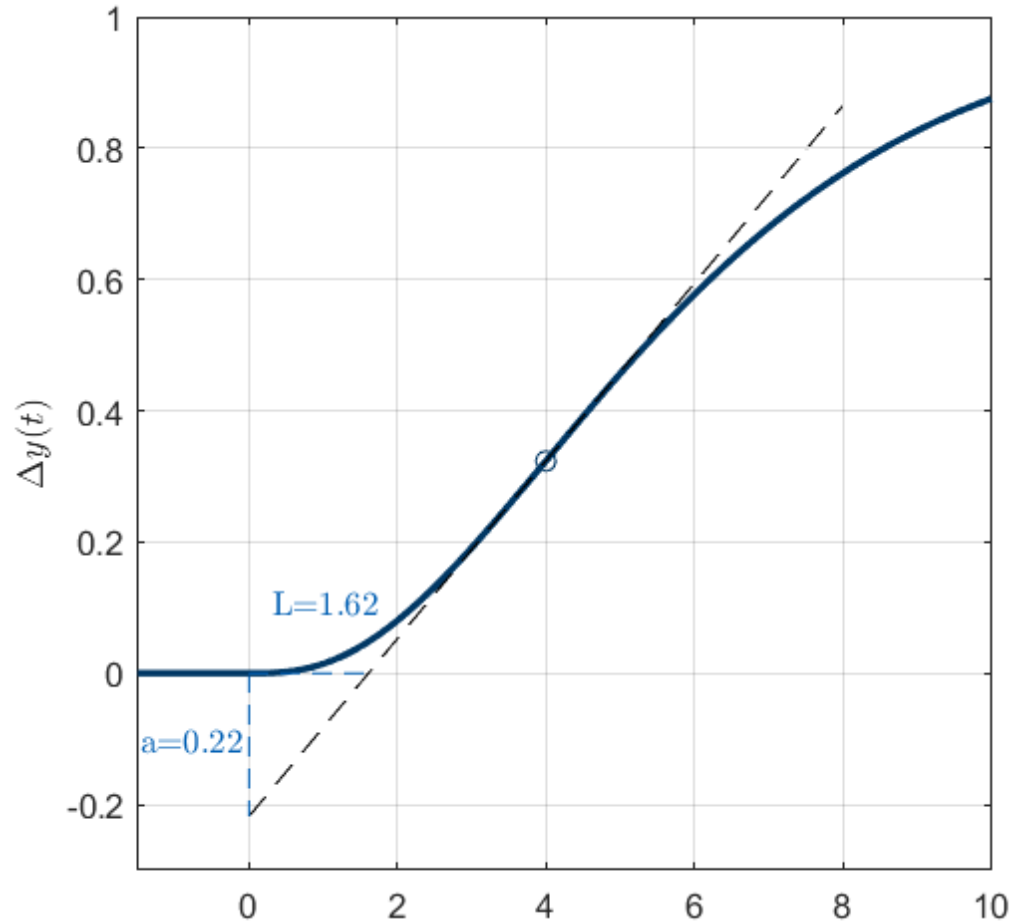
Escalón sin valor final conocido:

	PI			
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$K_i$
<b>Poco robusto</b>	$0.6 \frac{\Delta u}{a}$	$4L$	0	$0.15 \frac{\Delta u}{aL}$
<b>Robustez intermedia</b>	$0.475 \frac{\Delta u}{a}$	$8.7L$	0	$0.055 \frac{\Delta u}{aL}$
<b>Muy robusto</b>	$0.35 \frac{\Delta u}{a}$	$13.4L$	0	$0.025 \frac{\Delta u}{aL}$

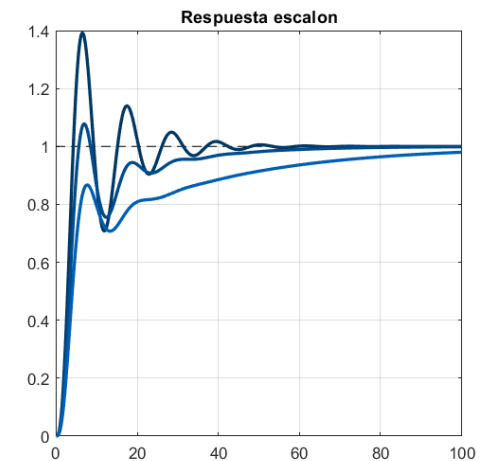
Permite estimar el  $IAE \approx \frac{1}{K_i} = IE$

Se pueden obtener controladores con diferentes grados de robustez interpolando

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO

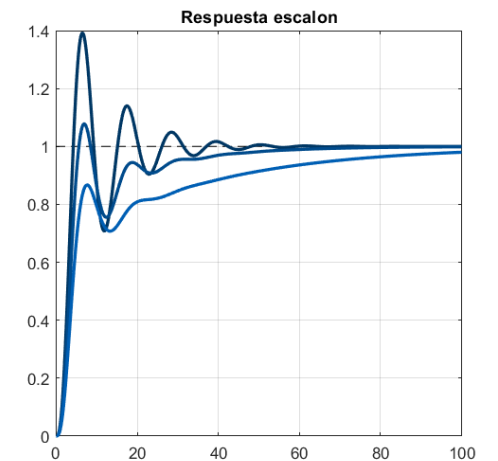
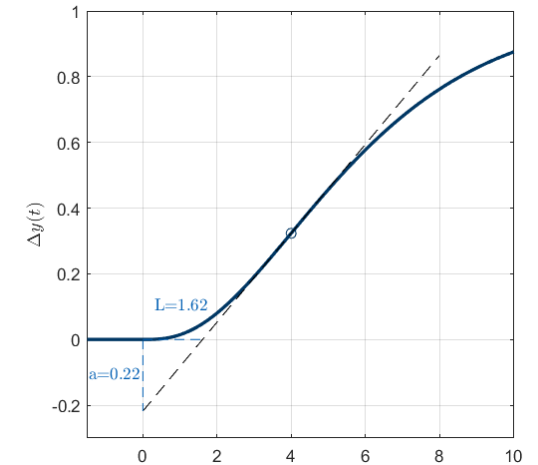


	PI			
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$K_i$
<b>Poco robusto</b>	$0.6 \frac{\Delta u}{a}$	$4L$	0	$0.15 \frac{\Delta u}{aL}$
<b>Robustez intermedia</b>	$0.475 \frac{\Delta u}{a}$	$8.7L$	0	$0.055 \frac{\Delta u}{aL}$
<b>Muy robusto</b>	$0.35 \frac{\Delta u}{a}$	$13.4L$	0	$0.025 \frac{\Delta u}{aL}$

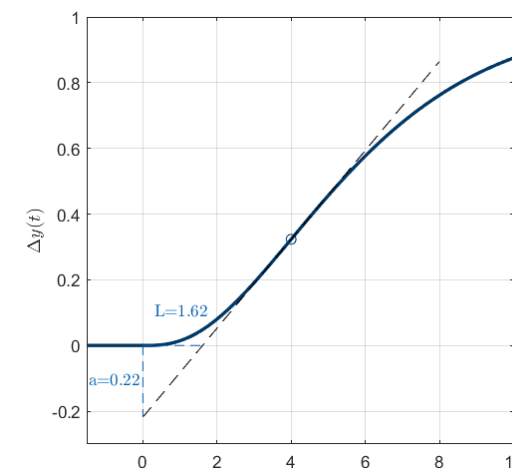
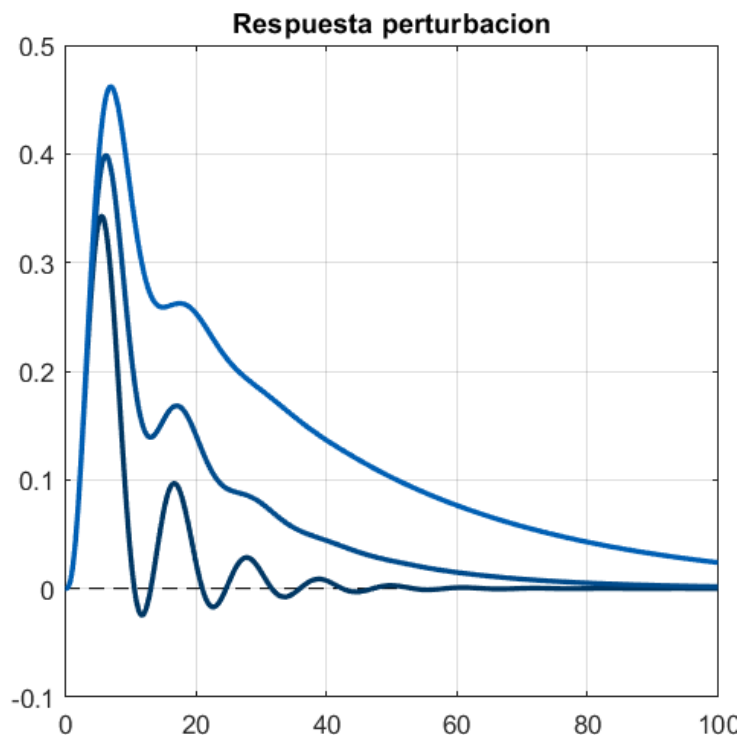
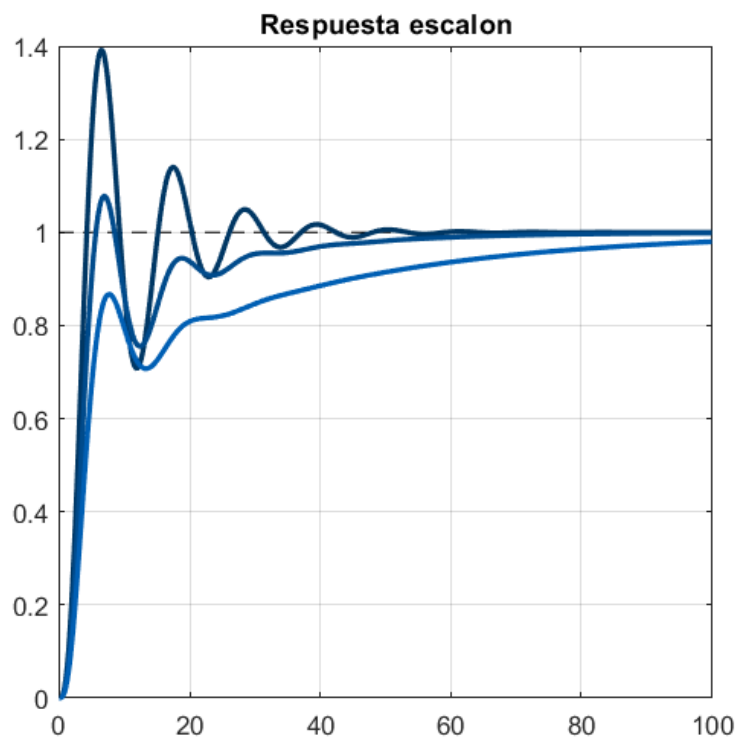


# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO

	PI			
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$K_i$
<b>Poco robusto</b>	$0.6 \frac{\Delta u}{a}$	$4L$	0	$0.15 \frac{\Delta u}{aL}$
<b>Robustez intermedia</b>	$0.475 \frac{\Delta u}{a}$	$8.7L$	0	$0.055 \frac{\Delta u}{aL}$
<b>Muy robusto</b>	$0.35 \frac{\Delta u}{a}$	$13.4L$	0	$0.025 \frac{\Delta u}{aL}$



# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO



— Poco robusto

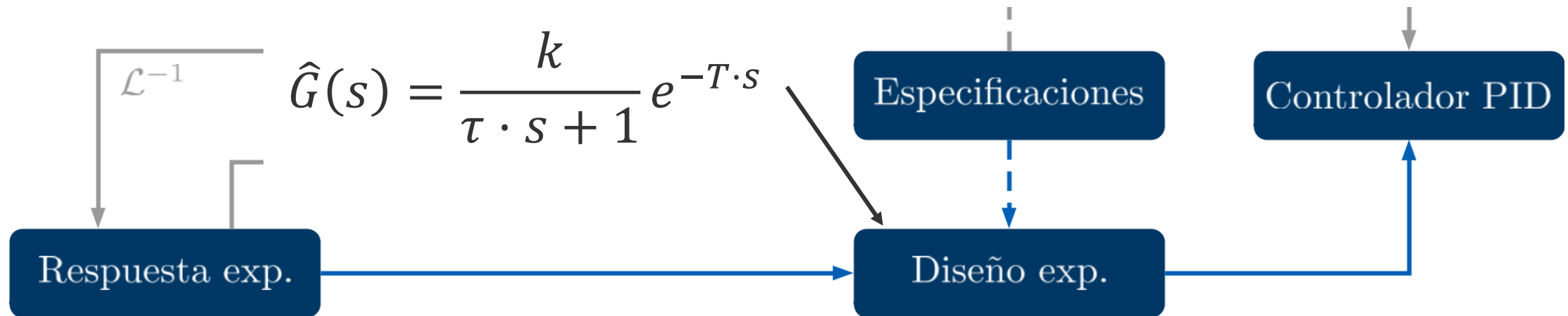
— Intermedio

— Muy robusto

	PI			
	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$K_i$
<b>Poco robusto</b>	$0.6 \frac{\Delta u}{a}$	$4L$	0	$0.15 \frac{\Delta u}{aL}$
<b>Robustez intermedia</b>	$0.475 \frac{\Delta u}{a}$	$8.7L$	0	$0.055 \frac{\Delta u}{aL}$
<b>Muy robusto</b>	$0.35 \frac{\Delta u}{a}$	$13.4L$	0	$0.025 \frac{\Delta u}{aL}$

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO

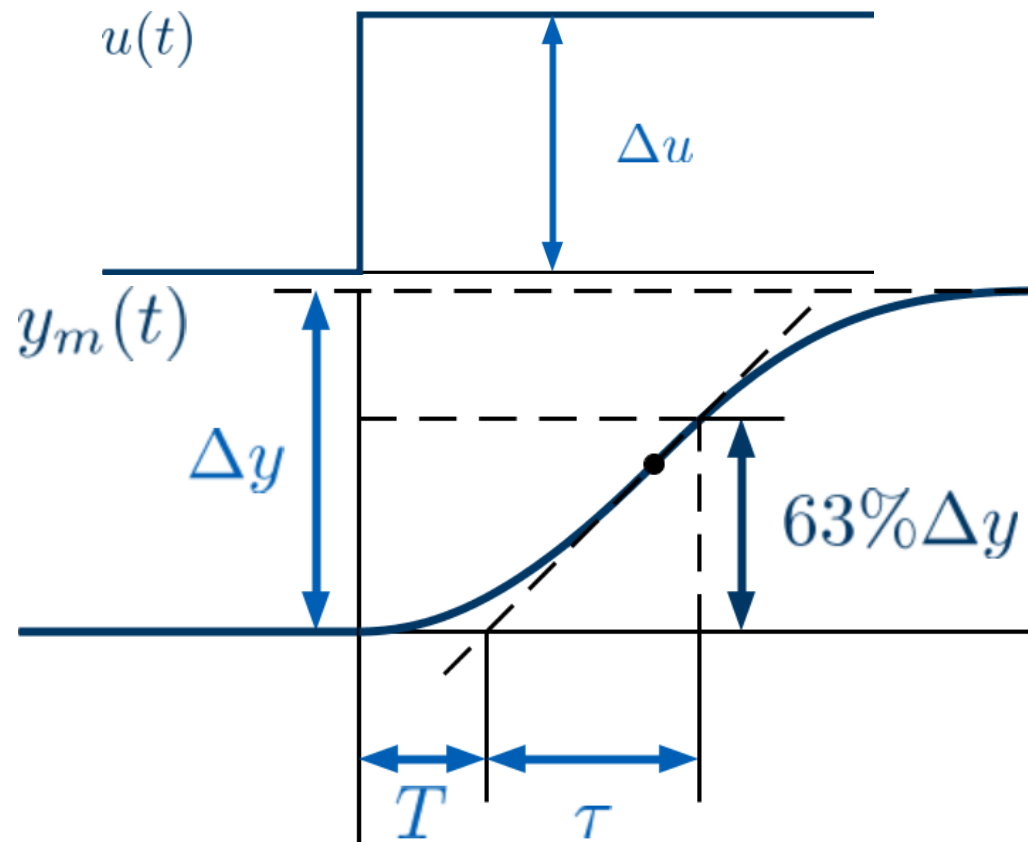
Escalón con valor final conocido





# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO

Escalón con valor final conocido, método de la recta tangente:



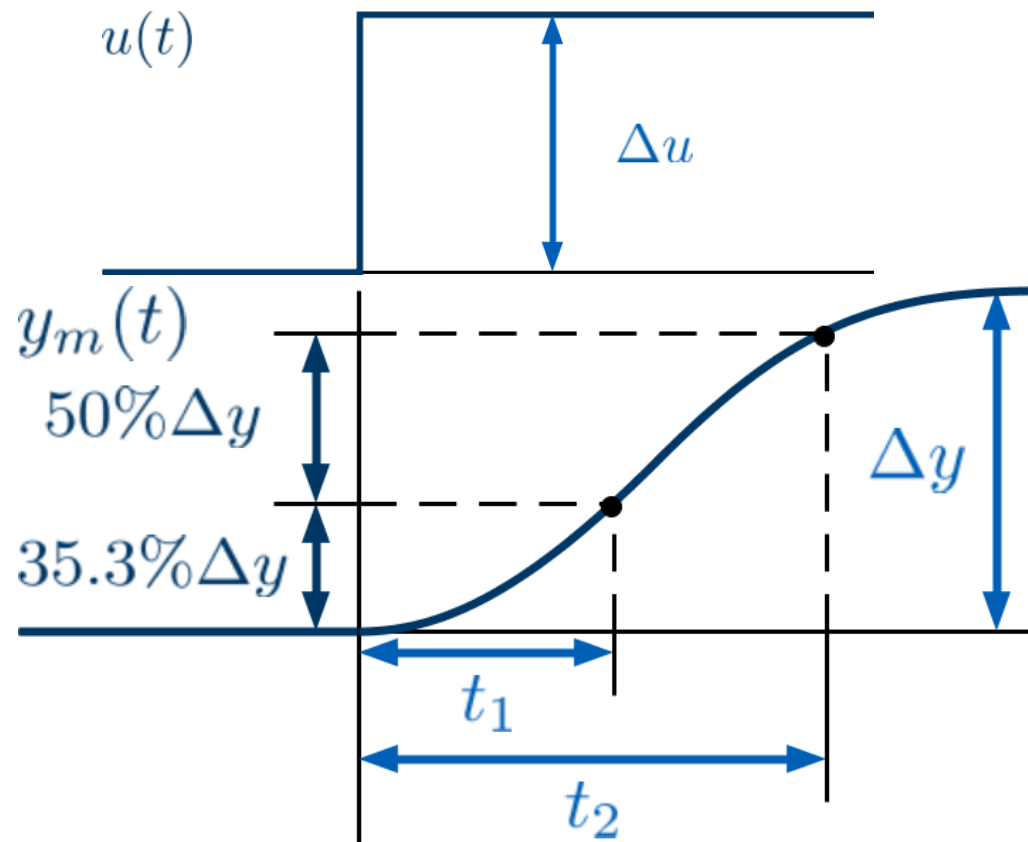
$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$T \leftarrow$  medición

$\tau \leftarrow$  medición

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO

Escalón con valor final conocido, método de dos puntos (35,3% y 85,3%):



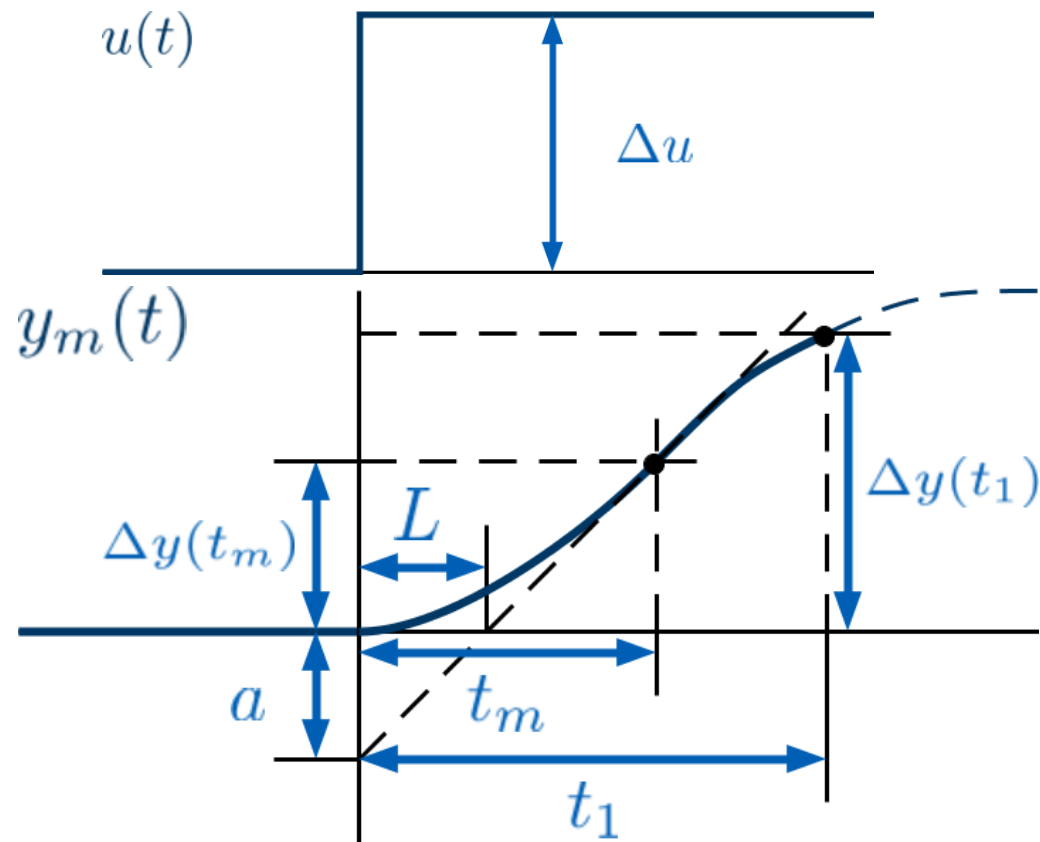
$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$T = 1,3 \cdot t_1 - 0,29 \cdot t_2$$

$$\tau = 0,67 \cdot (t_2 - t_1)$$

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO

Escalón con valor final conocido, estimación del modelo sin valor final



$$k = \frac{\Delta y(t_m)}{\Delta u} + \frac{a \cdot \tau}{L \cdot \Delta u}$$

$$T = t_m - \tau \cdot \ln \left( \frac{\Delta y(t_m) \cdot L}{a \cdot \tau} + 1 \right)$$

$$\Delta y(t_1) - \Delta y(t_m) = \frac{a}{L} \cdot \tau \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_1 - t_m}{\tau}} \right)$$

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE ABIERTO



Escalón con valor final conocido, obtención del controlador:

	PI		PID		
	$K_p$	$T_i$	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>Poco robusto</b>	$\frac{0.859}{k} \left(\frac{T}{\tau}\right)^{-0.997}$	$1.484 \tau \left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.468}$	$\frac{1.357}{k} \left(\frac{T}{\tau}\right)^{-0.947}$	$1.188 \tau \left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.738}$	$0.381 \tau \left(\frac{T}{\tau}\right)^{0.995}$
<b>Muy robusto</b>	$\frac{0.15}{k} + \left(0.35 - \frac{\tau T}{(\tau + T)^2}\right) \frac{\tau}{kT}$	$0.35T + \frac{13\tau^2 T}{\tau^2 + 12\tau T + 7T^2}$	$\frac{1}{k} \left(0.2 + 0.45 \frac{\tau}{T}\right)$	$\frac{0.4T + 0.8\tau}{T + 0.1\tau} T$	$\frac{0.5T\tau}{0.3T + \tau}$

Se puede **interpol**ar entre controladores

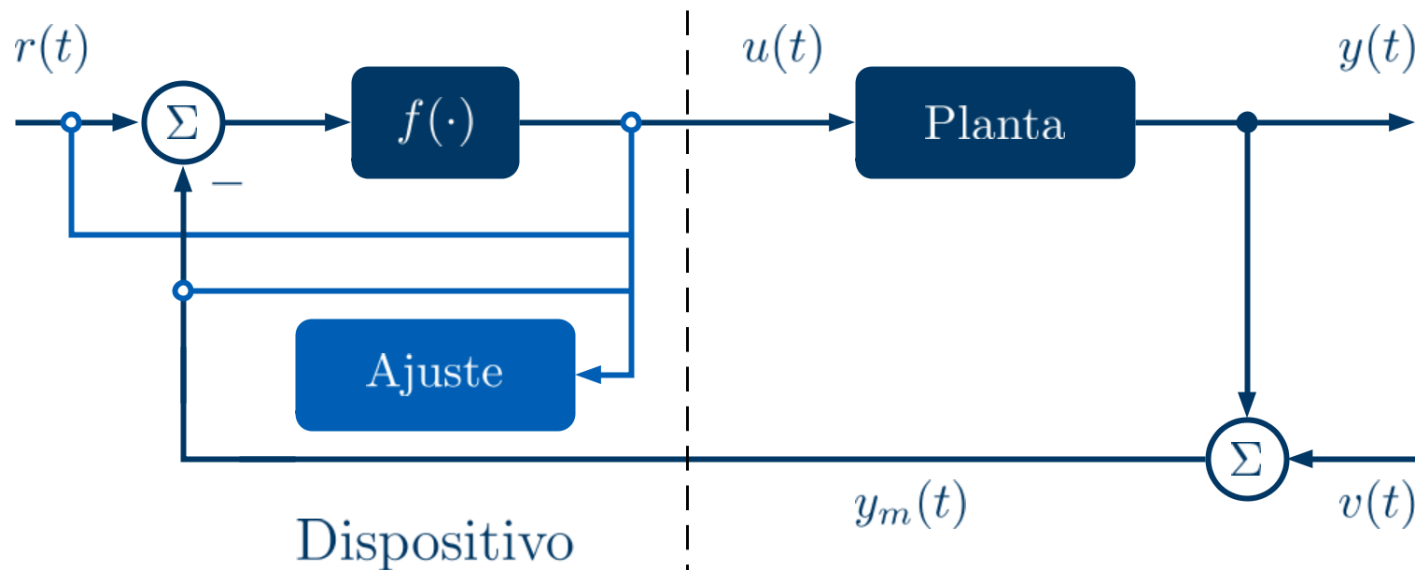
# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE CERRADO

MÉTODO CON PID

MÉTODO CON RELÉ

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE CERRADO

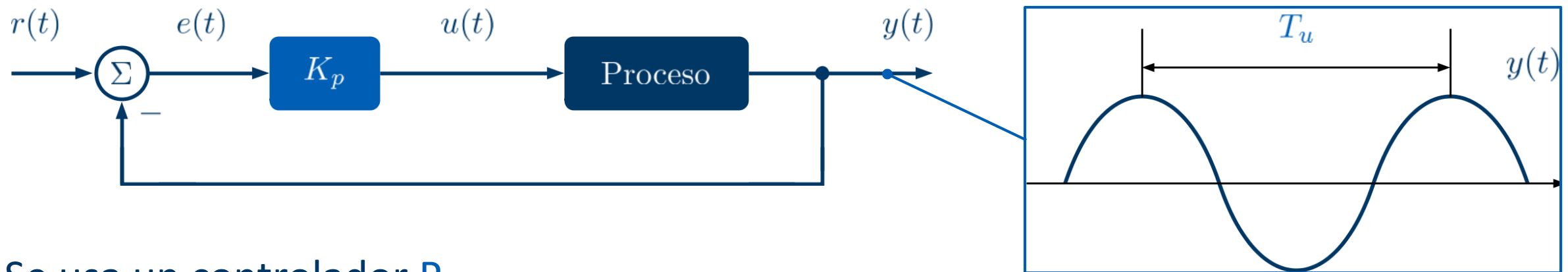
Métodos en bucle cerrado:



$u(t)$  es función de  $y_m(t)$

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE CERRADO

Método en bucle cerrado, con PID:

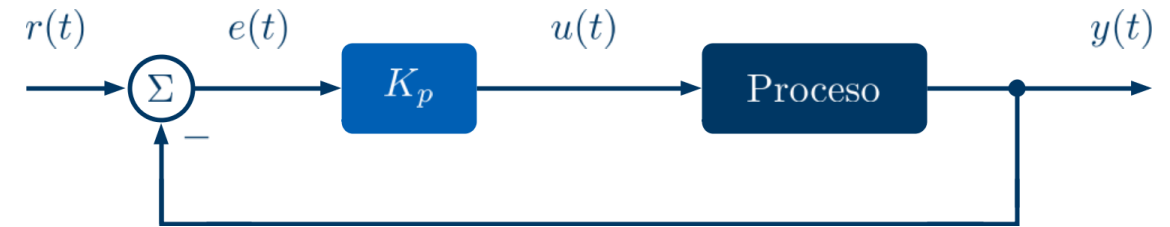


- Se usa un controlador P.
- Se aumenta la ganancia  $K_p$  hasta que oscila sin amortiguarse ( $K_u$ ).
- Se mide el periodo de las oscilaciones ( $T_u$ ).

# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE CERRADO



Método en bucle cerrado, con PID:

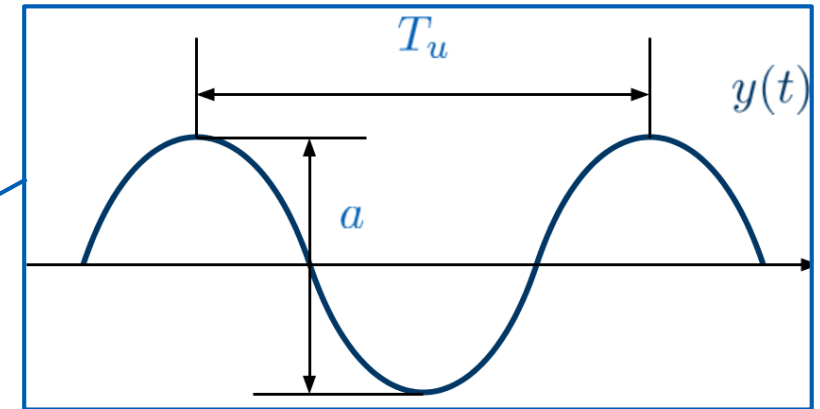
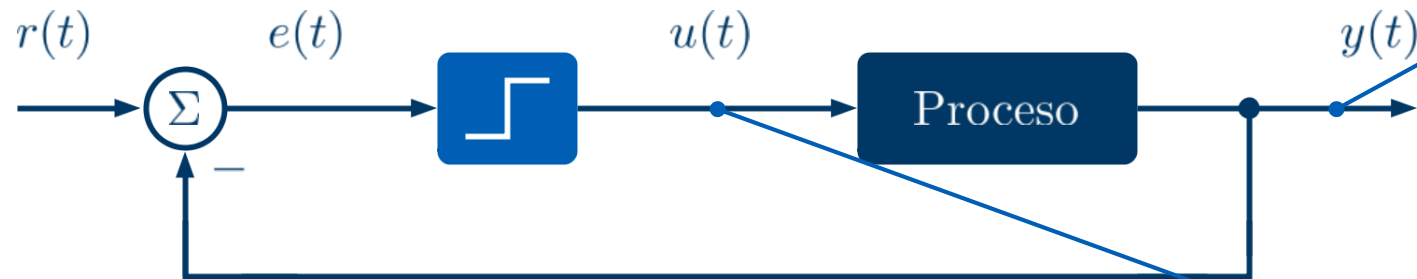


	PI			PID			
	$K_p$	$T_i$	$K_i$	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$K_i$
<b>Poco robusto</b>	$0.3K_u$	$0.9T_u$	$0.43 \frac{K_u}{T_u}$	$0.6K_u$	$0.6T_u$	$0.15T_u$	$\frac{K_u}{T_u}$
<b>Intermedio</b>	$0.22K_u$	$T_u$	$0.22 \frac{K_u}{T_u}$	$0.45K_u$	$0.75T_u$	$0.18T_u$	$0.6 \frac{K_u}{T_u}$
<b>Muy robusto</b>	$0.15K_u$	$1.1T_u$	$0.136 \frac{K_u}{T_u}$	$0.3K_u$	$0.9T_u$	$0.22T_u$	$0.33 \frac{K_u}{T_u}$



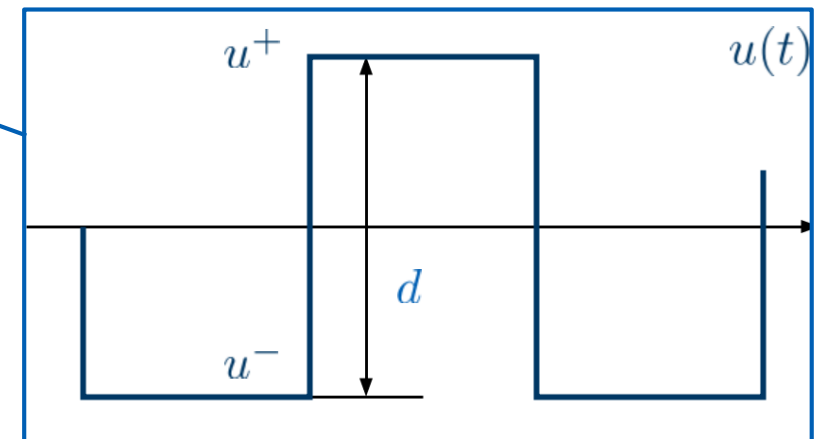
# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE CERRADO

Método en bucle cerrado, con relé:



Alternativa que permite obtener rápidamente la ganancia crítica:

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

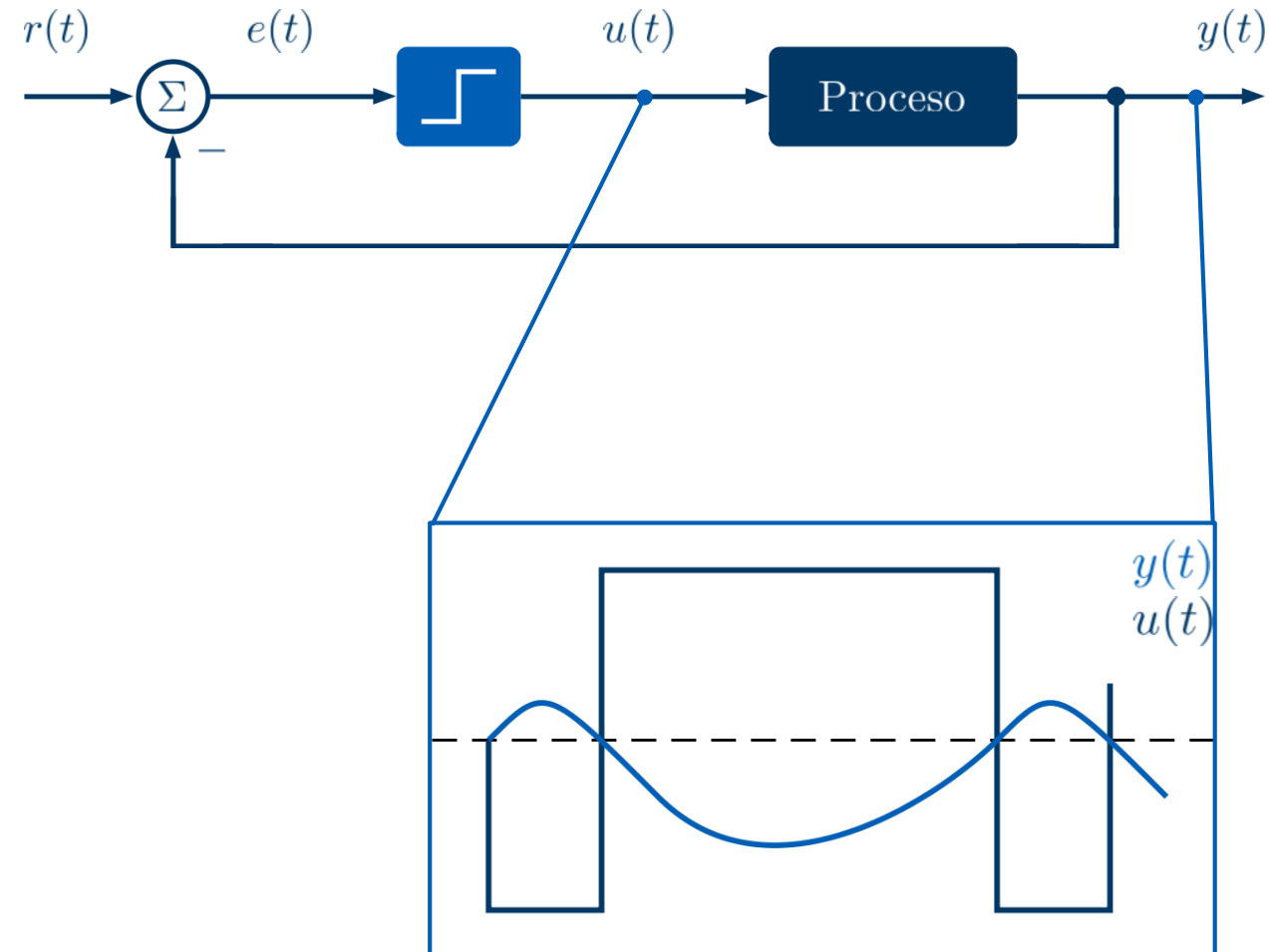


# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE CERRADO

Método en bucle cerrado, con relé:

Si la referencia no está centrada, la onda cuadrada puede ser muy asimétrica (imprecisión en el método). Para corregirlo:

- Modificar la referencia.
- O Modificar los valores  $u^+$  y  $u^-$ .

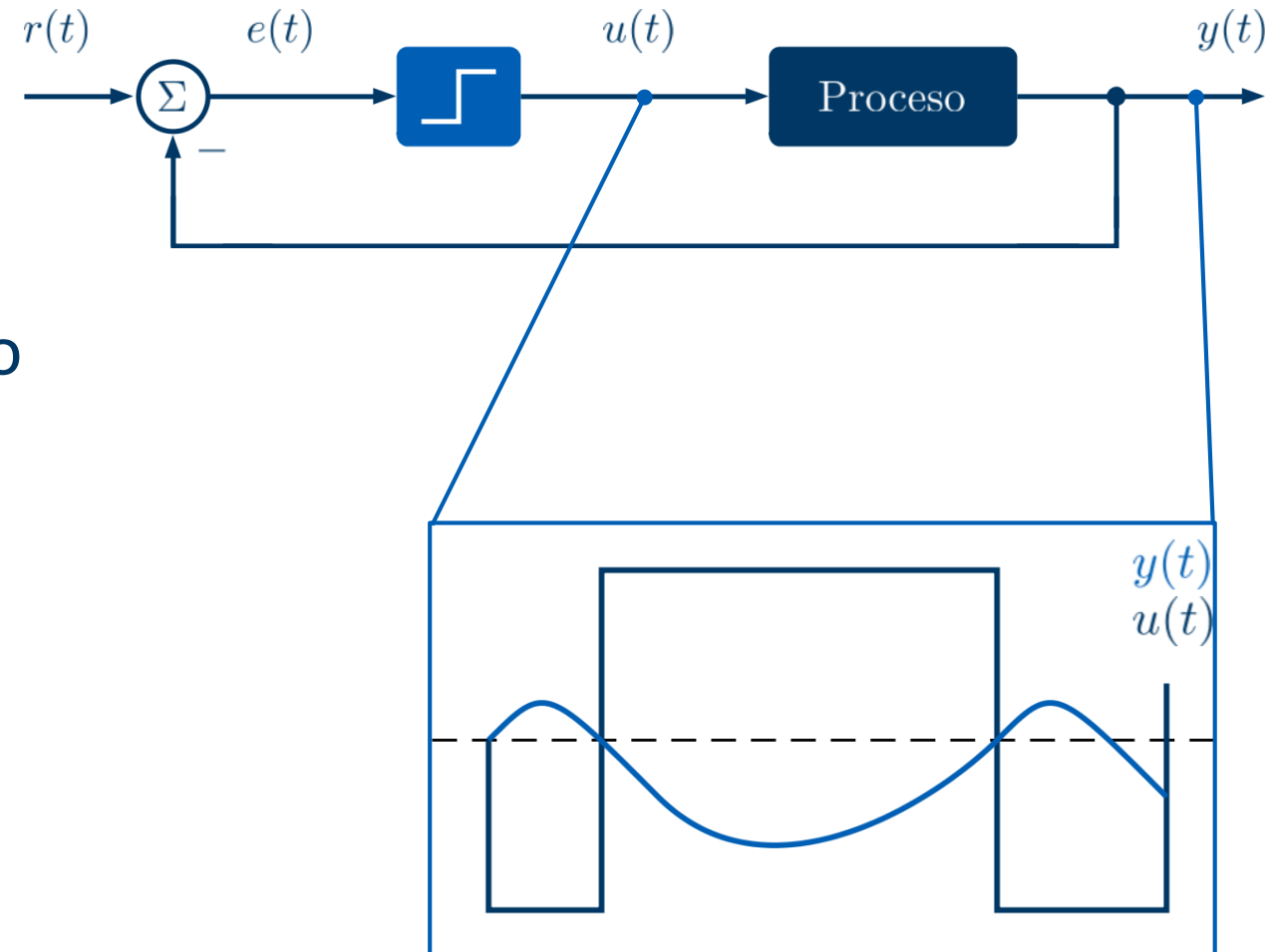


# MÉTODOS BASADOS EN LA RESPUESTA EN BUCLE CERRADO

Método en bucle cerrado, con relé:

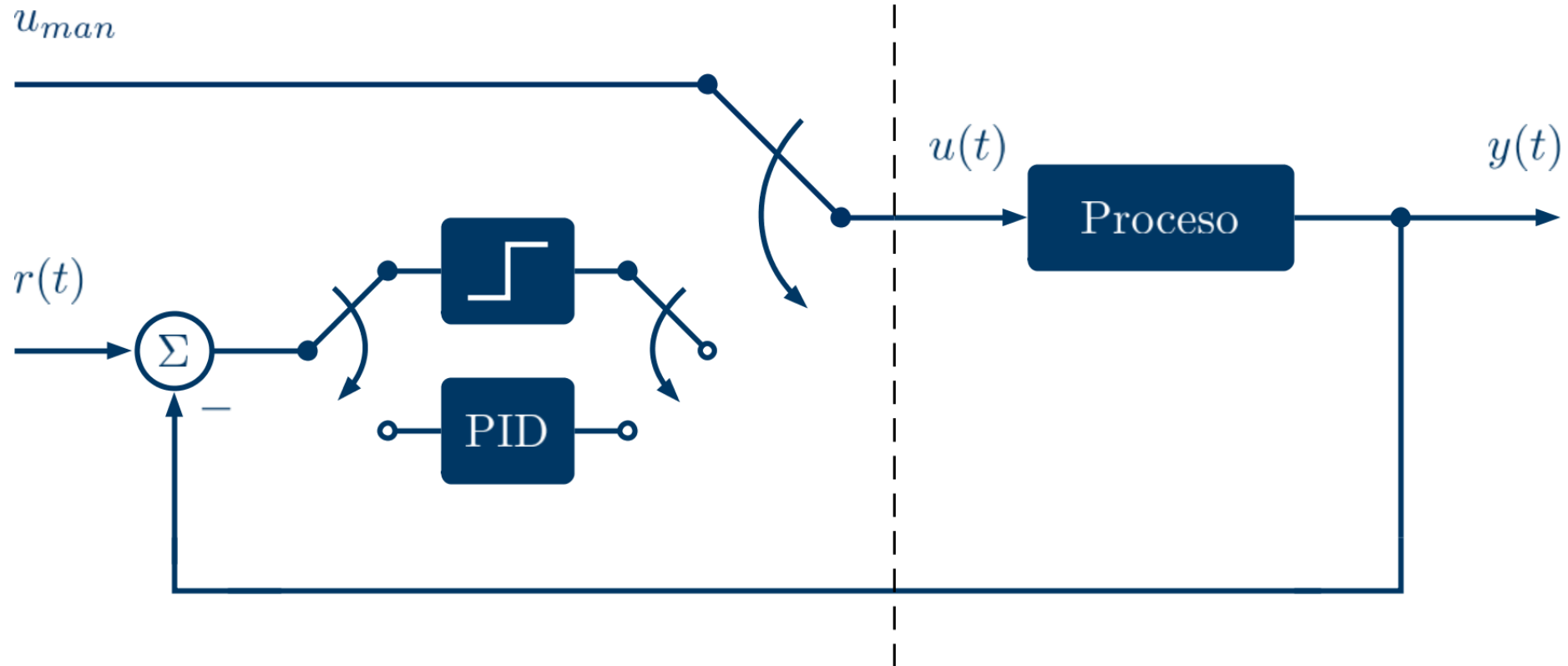
Si se conoce la ganancia del proceso ( $G(0)$ ), satisfaced:

$$\begin{cases} 2 \cdot y_r = G(0) \cdot (u^+ + u^-) \\ u^+ \cdot G(0) > y_r \\ u^- \cdot G(0) < y_r \end{cases}$$

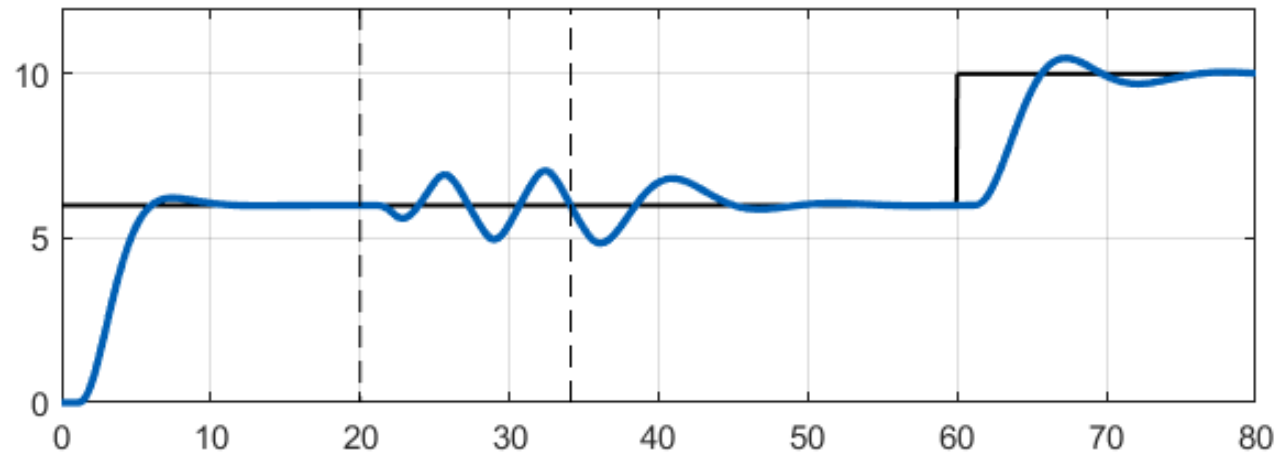
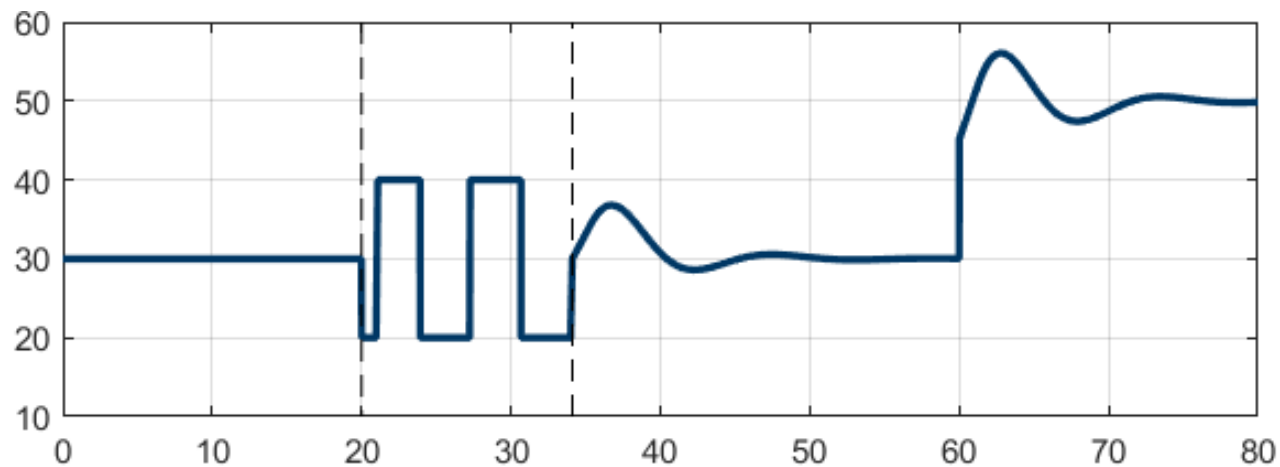
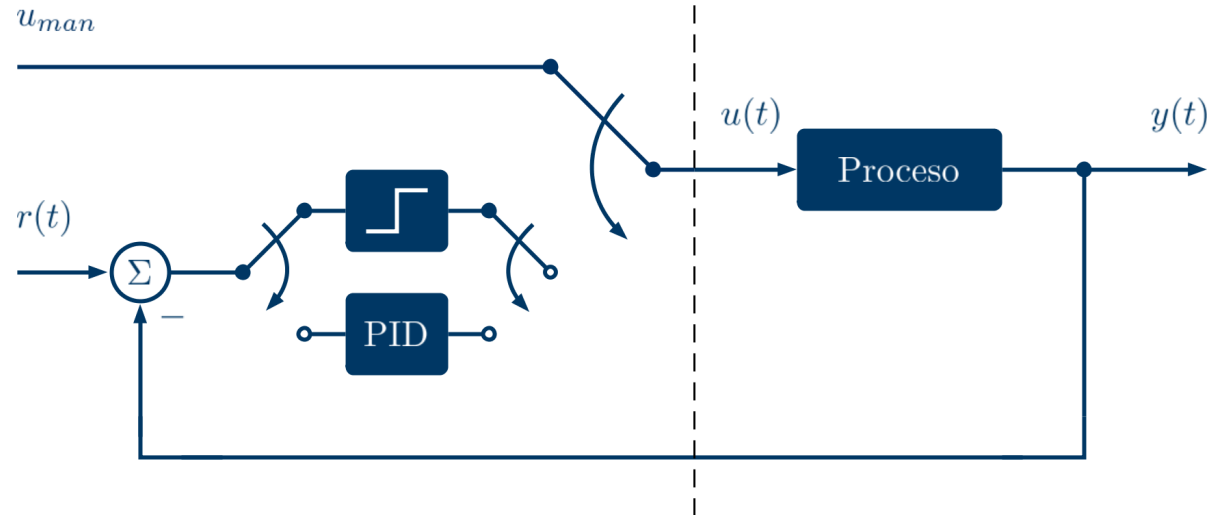


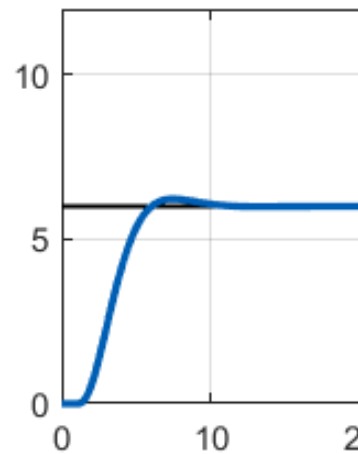
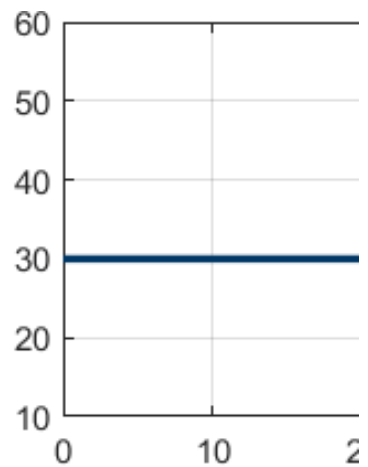
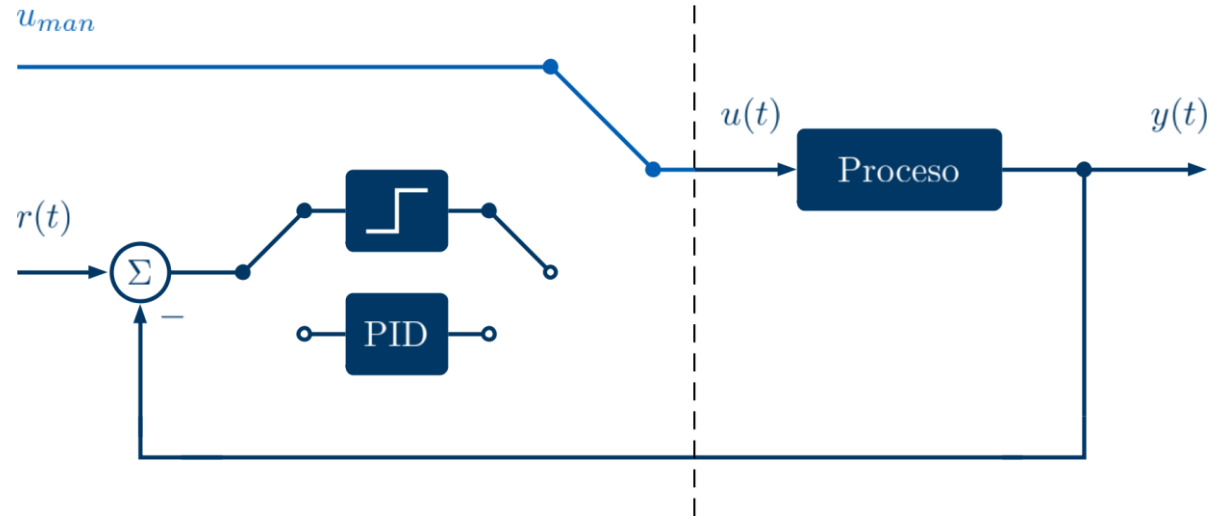
# AUTOAJUSTE

Experimento automático en PID comerciales. Utilizan método BC con relé.

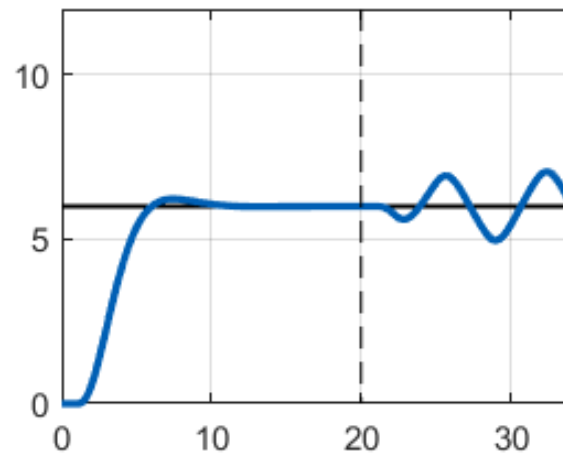
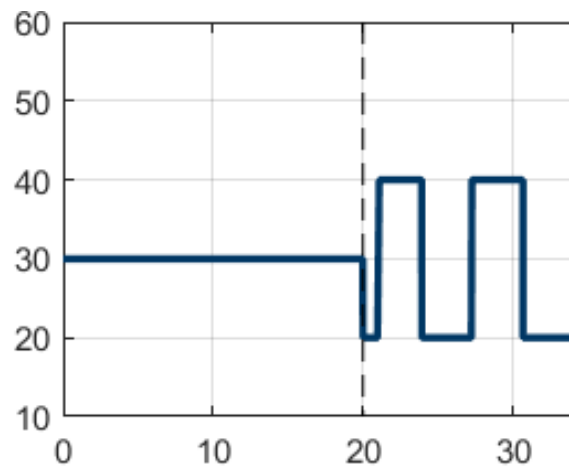
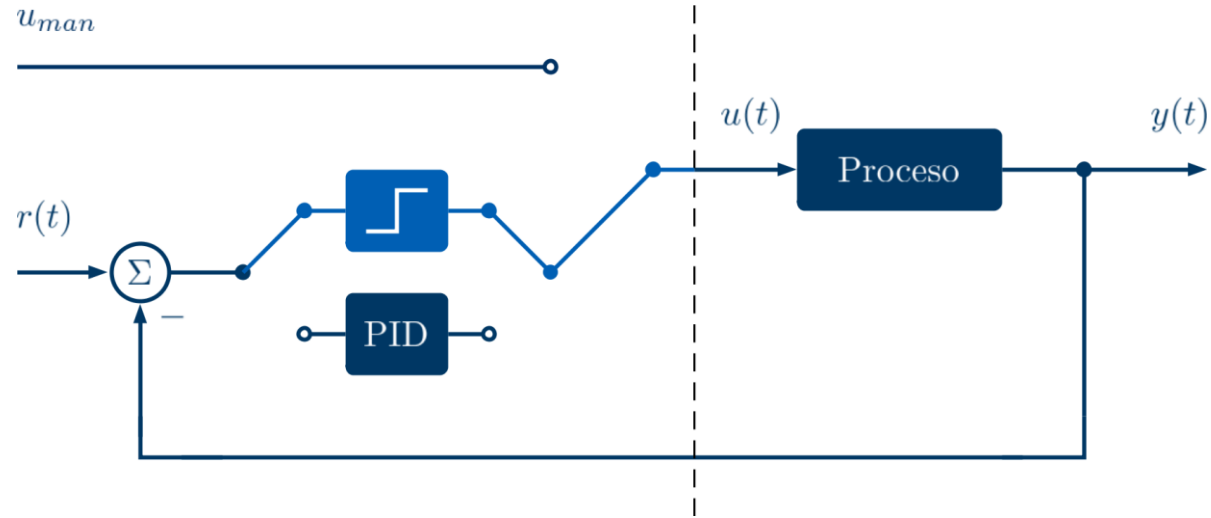


# AUTOAJUSTE



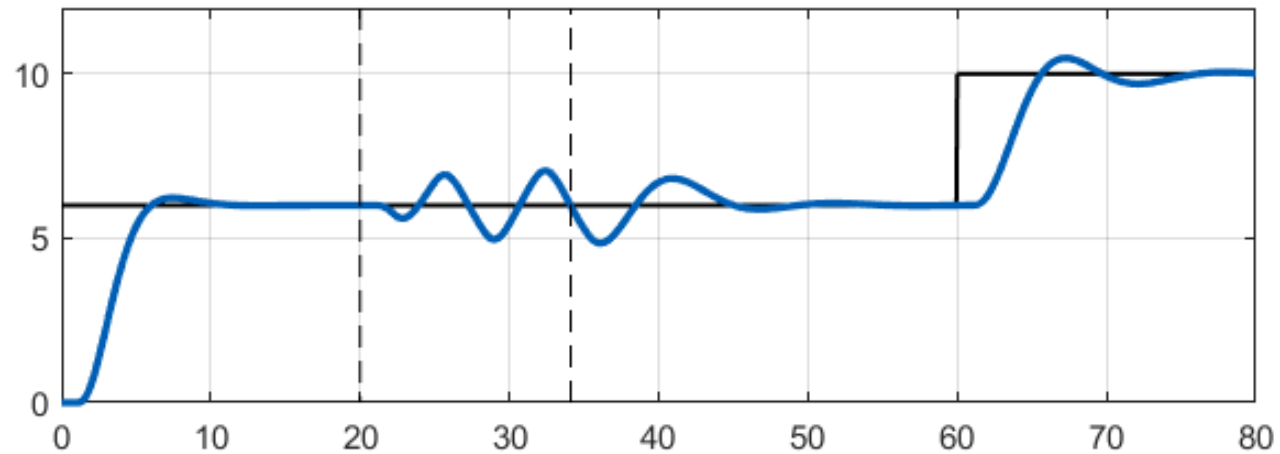
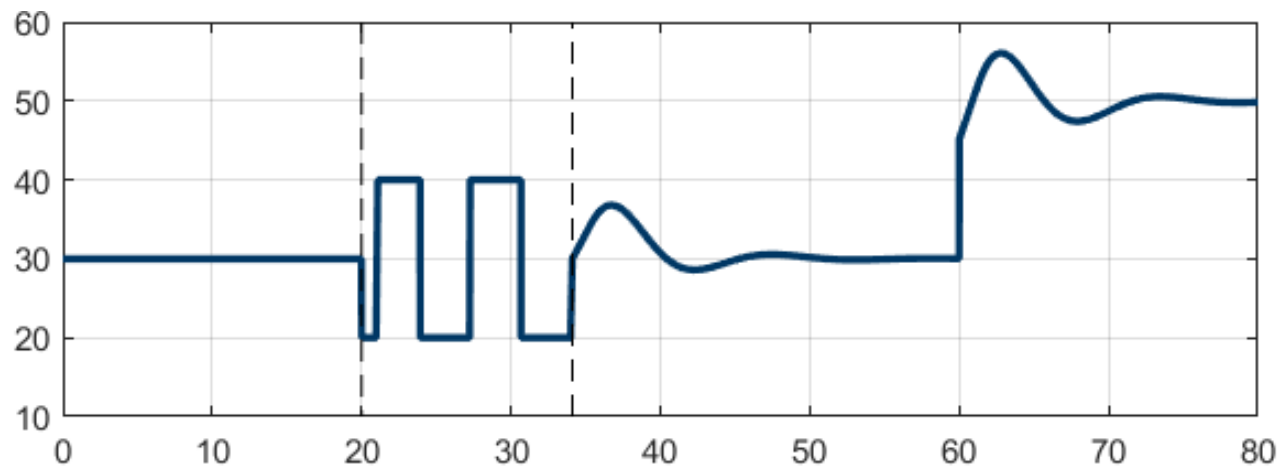
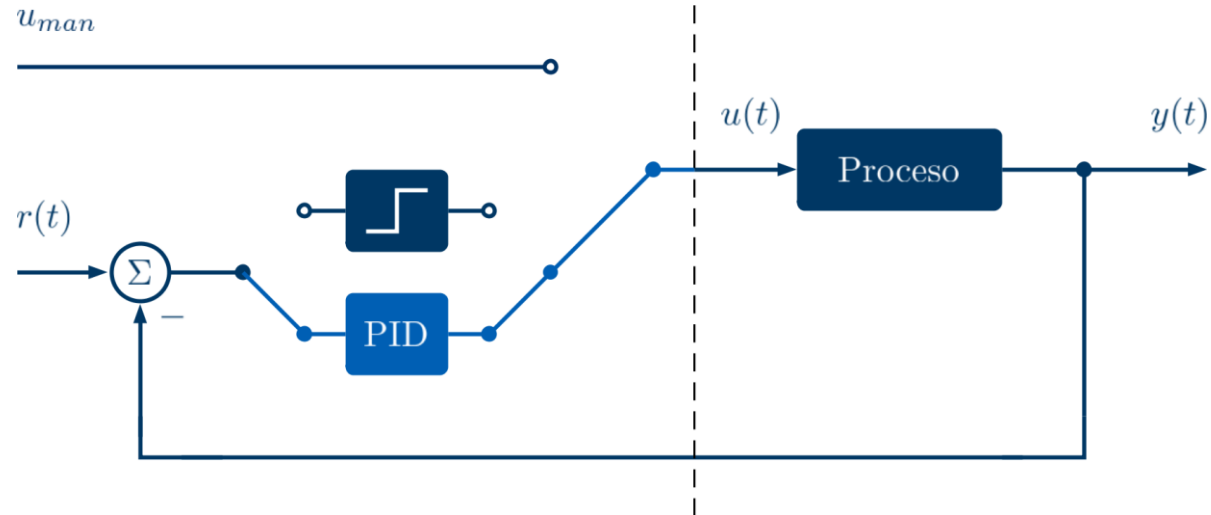


# AUTOAJUSTE



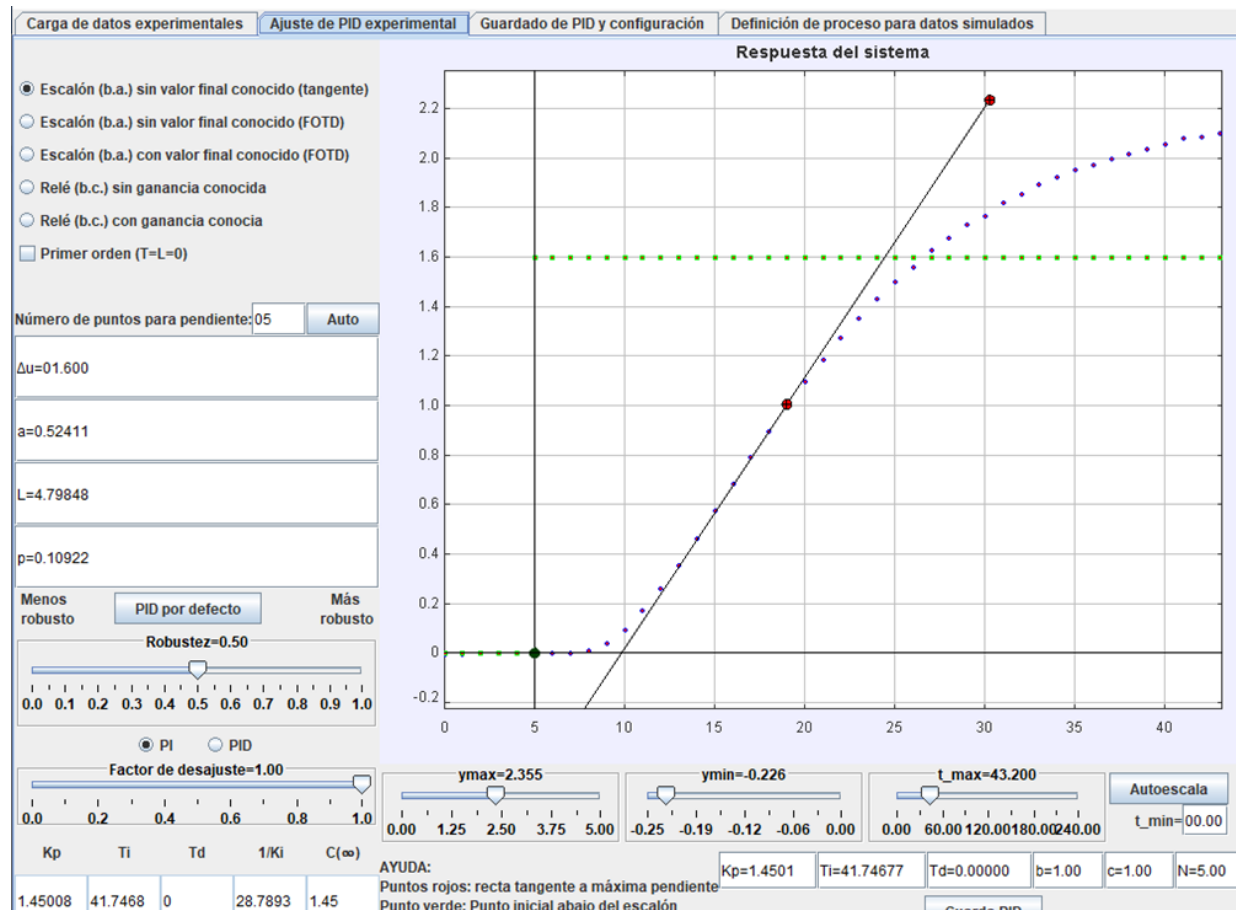


# AUTOAJUSTE



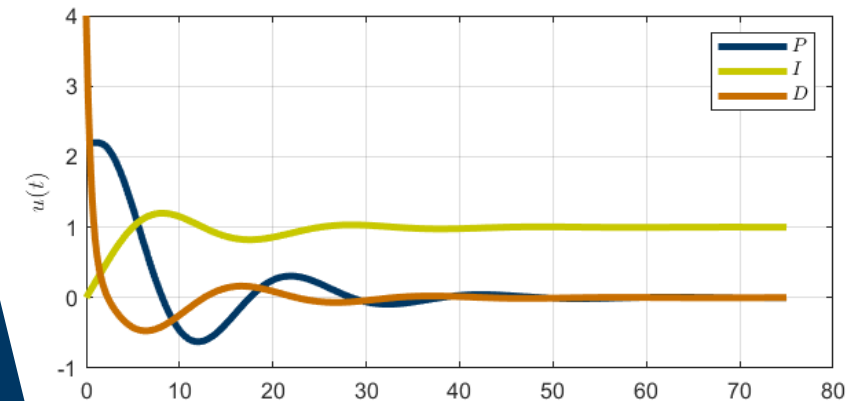
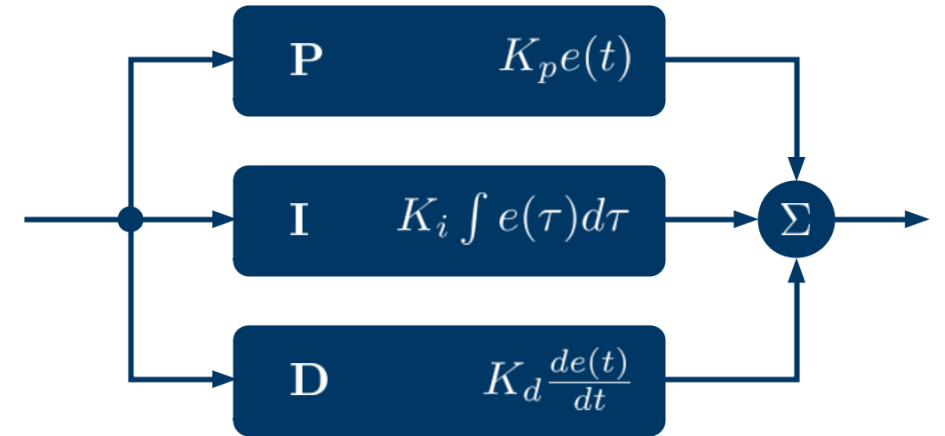
# HERRAMIENTAS DE SOPORTE

# HERRAMIENTAS DE SOPORTE PARA EL AJUSTE



<https://sites.google.com/a/uji.es/freepidtools/home/download-herramienta-de-ajuste-experimental-de-pid>

# CONTROLADORES PID: PRINCIPIOS Y AJUSTE EXPERIMENTAL



CICLO DE CONFERENCIAS DEL MÁSTER UNED-UCM Y DEL PROGRAMA DE  
DOCTORADO EN “INGENIERÍA DE SISTEMAS Y DE CONTROL”

