

# Pràctiques de Laboratori de Regulació Automàtica

Josep Vehí, Carles Pous, Inès Ferrer, Joaquim Armengol

September 25, 2000



# Index

<b>1</b>	<b>Identificació d'un procés lineal mitjançant la seva resposta temporal</b>	<b>1</b>
1.1	Objectius . . . . .	1
1.2	Introducció . . . . .	1
1.3	Realització pràctica . . . . .	3
1.3.1	Identificació dels processos B i A+B . . . . .	3
1.3.2	Validació del model . . . . .	4
1.4	Càlcul del controlador a partir del model obtingut . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Identificació d'un procés no lineal mitjançant la seva resposta temporal</b>	<b>5</b>
2.1	Objectius . . . . .	5
2.2	Introducció . . . . .	5
2.3	Realització pràctica . . . . .	6
2.3.1	Identificació del procés de llum . . . . .	6
2.3.2	Identificació de la pertorbació de llum . . . . .	7
2.3.3	Validació del model . . . . .	7
2.4	Càlcul del controlador a partir del model obtingut . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Identificació d'un procés de temperatura mitjançant la seva resposta temporal</b>	<b>9</b>
3.1	Objectius . . . . .	9
3.2	Introducció . . . . .	9
3.3	Realització pràctica . . . . .	10
3.3.1	Identificació del procés de temperatura . . . . .	10
3.3.2	Validació del model . . . . .	10
3.4	Càlcul del controlador a partir del model obtingut . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Sintonia empírica de controladors PID</b>	<b>13</b>
4.1	Objectius . . . . .	13
4.2	Introducció . . . . .	13
4.2.1	El controlador PID . . . . .	13
4.2.2	Sintonia del controlador PID . . . . .	14
4.3	Realització pràctica . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Control dels diferents processos</b>	<b>19</b>
5.1	Objectius . . . . .	19
5.2	Introducció . . . . .	19
5.2.1	El controlador PID . . . . .	19

5.2.2	Sintonia del controlador PID . . . . .	20
5.2.3	El controlador industrial PM-5840/C . . . . .	21
5.3	Realització pràctica . . . . .	23

# 1. IDENTIFICACIÓ D'UN PROCÉS LINEAL MITJANÇANT LA SEVA RESPOSTA TEMPORAL

---

## 1.1 Objectius

---

Els objectius de la pràctica són:

1. Adquirir i manipular dades en un entorn pre-dissenyat.
2. Obtenir un model del procés a partir de la seva resposta temporal.
3. Simular el model i validar-lo comparant la seva resposta amb la del sistema real.

## 1.2 Introducció

---

Per a la realització d'aquesta pràctica es disposa d'un hardware bàsic format per un ordinador PC equipat amb una tarja d'adquisició de dades PC-Labcard 812, i un entrenador que emula diferents processos que posteriorment s'han de controlar.

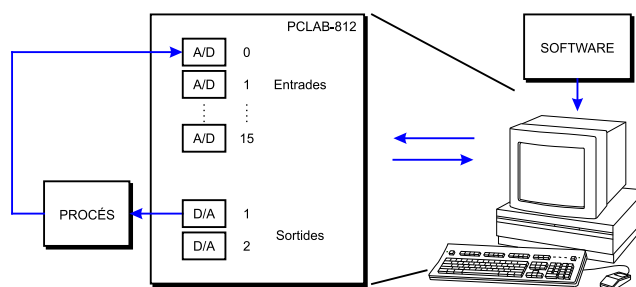


Figura 1-1 Connexió del procés amb el PC.

La tarja PCLAB-812 disposa de 16 entrades i 2 sortides analògiques. L'entrada A/D 0 és la que s'utilitzarà per a efectuar la lectura del senyal que prové del procés, mentre que la sortida D/A 1 serà l'encarregada de proporcionar el senyal de control al circuit. A l'ordinador es disposa d'un software realitzat amb LabWindows per tal de gestionar la visualització de les dades, el controlador i la consigna a aplicar al procés.

La finestra de LabWindows per a visualitzar els senyals i aplicar el controlador desitjat és la que es mostra a la Figura 1-2. Bàsicament consta d'una pantalla que es comporta com un oscil·loscopi en la que es van representant 4 senyals: el senyal que entra pel conversor A/D 0 (senyal sortida del procés), el senyal de control calculat interiorment amb l'algorisme corresponent, el senyal d'error i la consigna seleccionada. El procés començarà a adquirir dades, i per tant a representar-les quan es prem el botó *Go*. La pantalla es va desplaçant i va representant les dades fins que no es prem *Stop*.

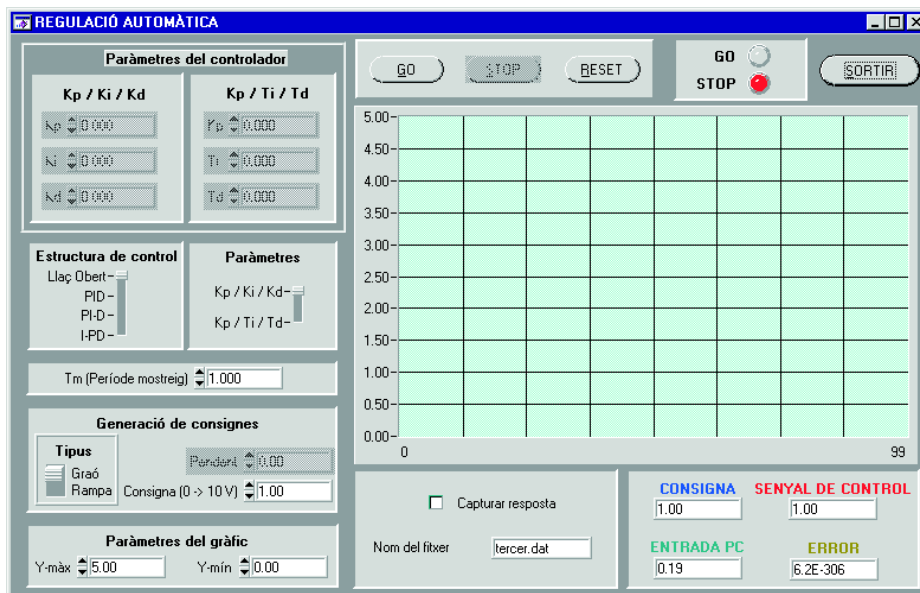


Figura 1-2 Pantalla LabWindows.

A sota de la pantalla de visualització es poden veure els valors numèrics que van prenent els 4 senyals a cada moment: *Consigna*, *Entrada PC*, *Senyal de Control* i *Error*. Si es selecciona el requadre *capturar resposta*, es guarden els valors dels 4 senyals visualitzats des de que comença l'adquisició fins que es para. El fitxer *nom.dat* pot ser analitzat més detalladament amb posterioritat utilitzant Matlab. L'estructura d'aquest fitxer és la següent:

- Columna 1: Temps.
- Columna 2: Resposta del Sistema.
- Columna 3: Consigna.
- Columna 4: Senyal de control.

Per defecte, l'escalat de l'eix d'ordenades és de 0 a 10 V. En cas de que els senyals que es vulguin visualitzar estiguin en un marge molt inferior o bé que prenguin valors negatius, es pot fer ús dels *paràmetres del gràfic*. Aquí es permet escollir un valor de  $y_{màx}$  i un de  $y_{mín}$  per a canviar l'escala i escollir el marge de visualització que es cregui convenient.

La tecla *Reset* permet netejar la pantalla per a que comenci una nova representació. És aconsellable fer una neteja abans de començar una adquisició, d'aquesta manera es podran veure els senyals des del principi de l'adquisició fins que es decideixi parar.

Pel que fa a la consigna es pot seleccionar un graó que pot anar de 0 a 10 V, o bé una rampa amb dos paràmetres: pendent de pujada i valor de saturació final. El temps de mostreig

haurà de ser l'adient per a visualitzar la resposta del sistema.

Per a realitzar el control del procés s'ha de seleccionar l'*estructura de control* que es vulgui utilitzar. Pot ser un controlador  $PID$ ,  $PI - D$  o  $I - PD$ . També hi ha una opció que és *Lla obert*. Amb aquesta última opció seleccionada no es fa un control del procés, sinó que simplement es mira com respon el sistema a una entrada donada. Aquesta opció pot ser utilitzada per a obtenir un model del sistema usant la resposta temporal. Quan es selecciona algun dels tipus de controladors donats, la finestra permet entrar els paràmetres del controlador desitjats. Aquests paràmetres es poden donar com  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$  o bé com  $K_p$ ,  $T_i$  i  $T_d$ .

## 1.3 Realització pràctica

### 1.3.1 Identificació dels processos B i A+B

En els entrenadors del laboratori hi ha dos processos A i B fets a base d'amplificadors operacionals. Aquests dos processos es poden utilitzar individualment o combinar entre ells per a tenir processos més complexes. Cal identificar mitjançant la resposta temporal el procés B (Figura 1-3) i una combinació en cascada dels processos A i B (Figura 1-4), tenint en compte que el punt d'operació dels sistemes serà al voltant de la consigna de 1.

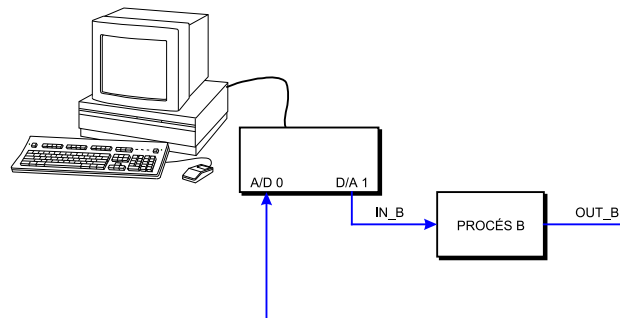


Figura 1-3 Connexió del procés B amb el PC.

Procediment a seguir:

1. Executeu el programa `[pr1.exe]` i apareixerà la pantalla de la Figura 1-2 comentada abans, que permetrà aplicar consignes, adquirir les dades per pantalla i guardar-les en un fitxer pel seu posterior tractament. Fixeu el temps de mostreig  $T_s = 1$  s. Feu les connexions indicades a la Figura 1-3.
2. Observeu la resposta del sistema B a una entrada graó unitari i deixeu que s'estabilitzi. Provoqueu varis salts entorn del punt de treball (Figura 1-5) i guardeu les dades en un fitxer per a la seva posterior anàlisi.
3. A partir de les dades guardades en el fitxer, obtingueu una funció de transferència que approximi el comportament del procés B.

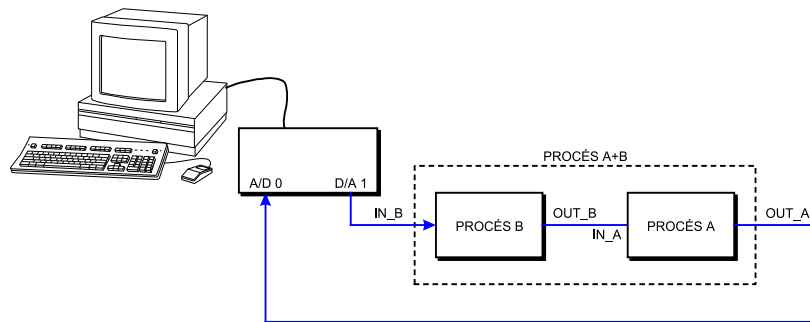


Figura 1-4 Connexió del procés A+B amb el PC.

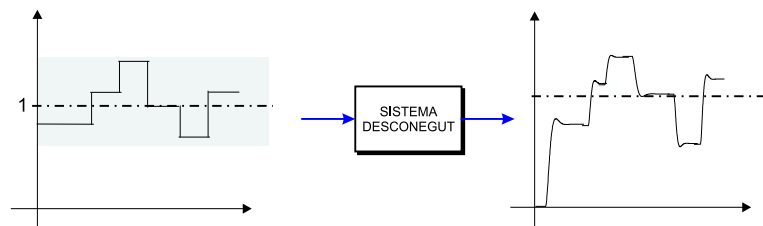


Figura 1-5 Seqüència de graons.

4. Realitzeu les connexions de la Figura 1-4. Repetiu els passos anteriors calculant ara una funció de transferència que approximi el comportament del procés A+B.

### 1.3.2 Validació del model

Simuleu (Matlab/Simulink) la resposta de les funcions de transferència obtingudes anteriorment i compareu aquestes respostes amb les reals (guardades en el fitxer *nom.dat*). Si el resultat de la validació no és satisfactori, repetiu el procés.

## 1.4 Càlcul del controlador a partir del model obtingut

Calculeu un controlador PID per a cada procés que permeti assolir les especificacions següents:

Error de posició:	$e_p(\infty) = 0$
Sobrepic:	$SP \leq 10\%$
Temps d'establiment:	$t_{s\pm 2\%} \leq 20 \text{ s.}$

Comproveu amb Matlab/Simulink que aquestes especificacions s'assoleixen. Ajusteu els paràmetres del controlador si ho creieu convenient.



## 2. IDENTIFICACIÓ D'UN PROCÉS NO LINEAL MITJANÇANT LA SEVA RESPOSTA TEMPORAL

---

### 2.1 Objectius

---

Els objectius de la pràctica són:

1. Trobar la característica estàtica del procés per veure la seva linealitat.
2. Obtenir un model del procés a controlar a partir de la seva resposta temporal.
3. Simular el model i validar-lo, comparant les seves respostes amb les del procés.
4. Calcular un controlador amb unes especificacions a partir del model obtingut i comprovar que les assoleix.

### 2.2 Introducció

---

Per realitzar aquesta pràctica es disposa d'un entrenador on hi ha dos processos per poder treballar: un de temperatura i un de llum. Ambdós processos consten d'una làmpada que dóna calor, mesurada per un sensor de temperatura i alhora es pot mesurar la lluminositat amb un sensor de lluminositat. A més en l'entrenador hi ha un ventilador que pot servir per ajudar en el control de temperatura i una segona làmpada per donar una pertorbació tant al procés de temperatura com al de llum.

En la figura 2-1 es pot veure el frontal de l'entrenador on hi ha situat el ventilador abans esmentat i una sèrie de connectors per a poder fer les connexions d'entrada i sortida als dos processos, l'alimentació al ventilador i dues sortides de tensió variables a través de dos potenciòmetres.

La descripció de les entrades i sortides és la següent:

$V_i(LL)$ :	Entrada de tensió per a la làmpada (0 a 10 V).
$V_o(LL)$ :	Mesura de lluminositat (0 a 10 V).
$V_o(t)$ :	Mesura de temperatura (0 a 10 V).
$V_i(n)$ :	Alimentació del ventilador (0 a 10 V).
A i B:	Tensions variables (0 a 10 V).

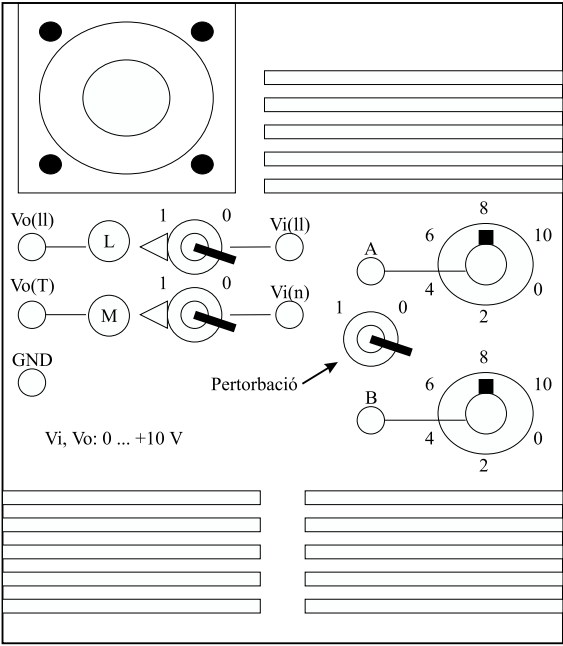


Figura 2-1 Frontal de l'entrenador.

## 2.3 Realització pràctica

### 2.3.1 Identificació del procés de llum

Per a comprovar la linealitat del procés doneu una seqüència de graons partint de 0 V fins a 10 V i retorneu a 0 V amb salts de 1 V. Guardar els resultats pel seu posterior tractament en Matlab.

Repetiu el procés anterior considerant ara salts de 2 V.

Amb les dades obtingudes ompliu la taula següent i calculeu la mitjana de les tensions de sortida:

$V_{in}$	$V_{out}$ ( $\uparrow$ 1 V)	$V_{out}$ ( $\downarrow$ 1 V)	$V_{out}$ ( $\uparrow$ 2 V)	$V_{out}$ ( $\downarrow$ 2 V)	Mitjana ( $V_{out}$ )
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Representeu gràficament  $V_{out}$  en funció de  $V_{in}$ .

És lineal el sistema? Justifiqueu-ho.

Identifiqueu el sistema considerant que el punt de treball serà  $V_{in} = 4 \text{ V}$ .

Aproximeu-lo mitjançant un model de primer o de segon ordre segons creieu convenient.

Representeu la tangent de la corba  $V_{out}/V_{in}$  anterior en el punt de treball i comproveu per a quin marge de tensions d'entrada  $V_{in}$  podríeu considerar que el guany del sistema (pendent de la tangent) es manté constant al voltant de  $V_{in} = 4 \text{ V}$ .

### 2.3.2 Identificació de la pertorbació de llum

Activeu l'interruptor de pertorbació i mesureu la resposta d'aquesta.

Com afectarà aquesta pertorbació a la sortida del sistema quan s'apliqui una entrada  $V_{in}$  determinada?

### 2.3.3 Validació del model

Simuleu (Matlab/Simulink) la resposta de la funció de transferència obtinguda anteriorment pel punt de treball considerat i compareu aquesta amb la real (guardada en el fitxer *nom.dat*).

Mantenint la funció de transferència anterior simuleu la resposta del sistema amb una seqüència de graons com la utilitzada per a la identificació inicial i observeu les apreciables diferències.

Quines són? Per què?

Proposeu un model del sistema que serveixi per a tot el marge de tensions  $V_{in}$ . Comproveu la millora en l'aproximació.

Per a realitzar aquest apartat s'aconsella utilitzar les funcions *Polyfit* i *Polyval* de Matlab.

## 2.4 Càlcul del controlador a partir del model obtingut

---

Calculeu un controlador enllaç tancat que permeti assolir les especificacions següents:

Error de posició:	$e_p(\infty) = 0$
Sobrepic:	$SP \leq 2\%$
Temps d'establiment:	$t_{s \pm 2\%} \leq 200 \text{ ms.}$
Punt de treball:	$V_{in} = 4 \text{ V}$

Comproveu amb Matlab/Simulink que aquestes especificacions s'assoleixen. Utilitzeu el model millorat del sistema per a la simulació. Ajusteu els paràmetres del controlador si ho creieu convenient.

Mantenint el controlador canvieu el punt de treball a diferents  $V_{in}$ .

Respon igual de bé en tots els casos? Per què?

En cas de resposta negativa, per a quin marge de  $V_{in}$  considereu que funciona correctament?  
Comproveu l'efecte de la pertorbació sobre el sistema en llaç tancat.

# 3. IDENTIFICACIÓ D'UN PROCÉS DE TEMPERATURA MITJANÇANT LA SEVA RESPOSTA TEMPORAL

---

## 3.1 Objectius

---

Els objectius de la pràctica són:

1. Obtenir un model del procés a controlar a partir de la seva resposta temporal.
2. Simular el model i validar-lo, comparant les seves respostes amb les del procés.
3. Calcular un controlador amb unes especificacions a partir del model obtingut i comprovar que les assoleix.

## 3.2 Introducció

---

Per realitzar aquesta pràctica es disposa de l'entrenador de la pràctica anterior, del qual es farà servir el procés de temperatura. El procés consta d'una làmpada que dona calor i un sensor de temperatura. A més en l'entrenador hi ha un ventilador que pot servir per ajudar en el control de temperatura i una segona làmpada per donar una pertorbació.

En la figura 3-1 es pot veure el frontal de l'entrenador on hi ha situat el ventilador abans esmentat i una sèrie de connectors per a poder fer les connexions d'entrada i sortida al procés, l'alimentació al ventilador i dues sortides de tensió variables a través de dos potenciòmetres.

La descripció de les entrades i sortides és la següent:

$V_i(LL)$ :	Entrada de tensió per a la làmpada (0 a 10 V).
$V_o(t)$ :	Mesura de temperatura (0 a 10 V).
$V_i(n)$ :	Alimentació del ventilador (0 a 10 V).
A i B:	Tensions variables (0 a 10 V).

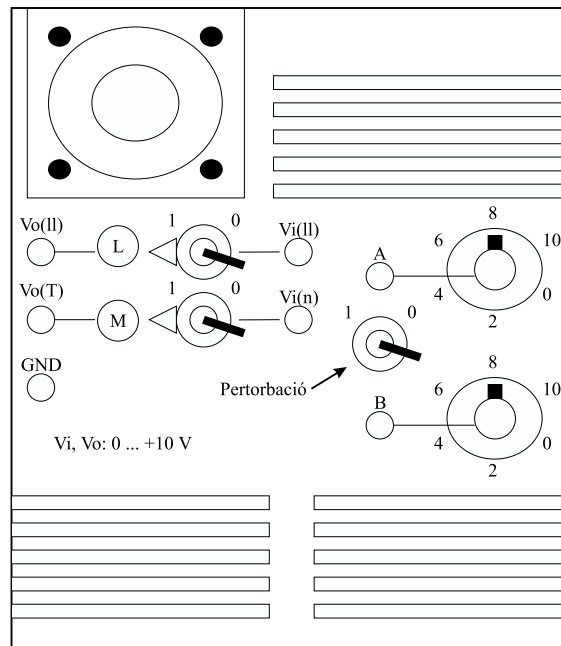


Figura 3-1 Frontal de l'entrenador.

### 3.3 Realització pràctica

#### 3.3.1 Identificació del procés de temperatura

Apliqueu al ventilador una tensió de 10 V.

Doneu un graó de 0 V a 5 V i torneu a 0 V. Guardeu els resultats pel seu posterior tractament en Matlab.

Representeu gràficament  $V_{out}$  en funció de  $V_{in}$ .

Aproximeu-lo mitjançant un model de primer o de segon ordre segons creieu convenient.

#### 3.3.2 Validació del model

Simuleu (Matlab/Simulink) la resposta de la funció de transferència obtinguda anteriorment pel punt de treball considerat i compareu aquesta amb la real (guardada en el fitxer *nom.dat*).

### 3.4 Càlcul del controlador a partir del model obtingut

---

Calculeu un controlador en laç tancat que permeti assolir les especificacions següents:

Error de posició:	$e_p(\infty) = 0$
Sobrepic:	$SP \leq 2\%$
Temps d'establiment:	$t_{s\pm 2\%} \leq 100 \text{ s.}$
Punt de treball:	$V_{in} = 5 \text{ V}$

Comproveu amb Matlab/Simulink que aquestes especificacions s'assoleixen. Ajusteu els paràmetres del controlador si ho creieu convenient.





## 4. SINTONIA EMPÍRICA DE CONTROL-LADORS PID

---

### 4.1 Objectius

---

1. Veure diferents mètodes empírics de sintonia de controladors PID.
2. Seleccionar entre aquests mètodes en funció del procés a controlar.

### 4.2 Introducció

---

#### 4.2.1 El controlador PID

L'esquema global d'un control mitjançant un PID és el que es representa a la Figura 4-1.

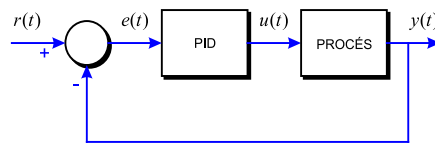


Figura 4-1

on  $e(t)$  representa el senyal d'error sobre el que opera el controlador per a donar el senyal de control  $u(t)$  que actuarà sobre el procés.

L'algorisme bàsic de control PID es pot expressar de la forma següent:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

o bé com:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Com que les dues representacions són equivalents, s'ha de tenir que:

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

$$K_d = K_p \cdot T_d$$

Es pot veure doncs que sobre l'error  $e(t)$  es combinen tres accions per a obtenir el senyal de control  $u(t)$ :

1. Proporcional ( $K_p$ ): La seva principal característica és que produeix un senyal de control proporcional al senyal d'error. En general, com més guany proporcional més ràpid respondrà el sistema, però més oscil·lacions podrà produir. Aplicant només aquest tipus de control, normalment queda un error estacionari.
2. Integral ( $K_i$  o  $T_i$ ): El senyal de control  $u(t)$  i el senyal d'error  $e(t)$  estan relacionats mitjançant una integral. Aquesta part s'encarrega d'eliminar l'error estacionari, encara que s'ha d'anar en compte perquè augmenta la inestabilitat del procés.
3. Derivativa ( $K_d$  o  $T_d$ ): El senyal de control  $u(t)$  produït per aquesta acció de control és proporcional a la derivada de l'error. La seva principal característica és que permet modificar el factor d'esmoreïment del sistema, de manera que es pot posar més part proporcional sense introduir oscil·lacions en el sistema. Això vol dir que es poden aconseguir respostes transitòries molt més ràpides sense perill d'oscil·lacions. Cal dir que aquesta acció de control és molt sensible al soroll, i que en sistemes sorollosos pot produir respostes no desitjades.

#### 4.2.2 Sintonia del controlador PID

L'element PID és un tipus de regulador capaç de fer que la sortida d'una determinada planta segueixi una consigna fixada. Es pot arribar a la consigna de múltiples maneres. Que s'hi arribi d'una forma o d'una altra dependrà del tipus de procés que es tingui i quin és el criteri escollit per arribar a la consigna ( que no hi hagi sobrepics, arribar-hi amb el temps mínim,...) i per a escollir-la s'aconsegueix variant els paràmetres  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$  del PID. El fet d'ajustar aquestes constants a uns valors determinats és el que s'anomena sintonitzar el PID.

Aquesta sintonia es pot fer de diverses formes. Si es disposa del model del procés a controlar, es poden calcular els paràmetres del PID de manera que el sistema global enllaç tancat tingui els pols situats en un lloc del pla complex adient per a produir una resposta transitòria desitjada. Per exemple per al cas de que el sistema amb realimentació sigui de segon ordre, la situació dels pols donarà uns paràmetres  $\zeta$  i  $\omega_n$  que provocaran que la resposta al graó d'aquest sistema tingui un sobrepic, un temps de pujada, etc, determinats. També es poden sintonitzar els PIDs utilitzant mètodes freqüencials. El fet d'incloure el controlador PID, fa que s'introdueixin o es modifiquin les posicions dels pols i zeros del sistema inicial. D'aquesta manera el diagrama de Bode global pot ser modificat de forma adient.

Però no sempre es disposa del model del sistema. En aquests casos es pot fer una sintonització de forma empírica. Tot seguit es mostren alguns dels diferents mètodes que s'apliquen a la pràctica per a sintonitzar els PIDs empíricament i com poden influir aquests en la resposta final.

A grans trets es poden classificar els mètodes de sintonia empírica d'un PID en dos grans grups:

- Sintonia enllaç obert
- Sintonia enllaç tancat

Aquests mètodes són els que s'explicaran tot seguit.

### Sintonia empírica en llaç obert

Aquests mètodes es basen en la resposta que dona un sistema (la planta a controlar) a una entrada que és un graó unitari. Aquesta resposta s'aproxima per la corresponent a la que tindria un sistema de primer ordre amb guany  $K$ , una constant de temps  $T$  i un retard  $L$ .

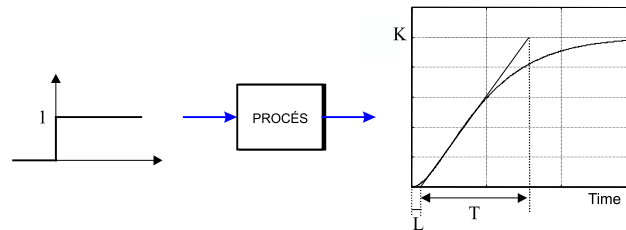


Figura 4-2

Amb aquests valors es poden determinar les constants de disseny del PID fent ús de les taules que es donen més endavant, utilitzant-ne una o altra depenent del mètode que es vulgui aplicar. El fet de seleccionar un mètode concret ve determinat pel criteri de sintonia que s'utilitzi. Per exemple, els mètodes de Ziegler-Nichols, es basen en que els paràmetres que es calcularan produiran un sobrepic de com a molt el 25 %. D'altres es centren en minimitzar per exemple la integral del valor absolut de l'error. Tots aquests mètodes de sintonia segueixen una expressió del tipus:

$$Y = a \left( \frac{L}{T} \right)^b + c$$

on:

$$\begin{aligned} Y &= K \cdot K_p && \text{pel mode proporcional} \\ Y &= T/T_i && \text{pel mode integral} \\ Y &= T_d/T && \text{pel mode derivatiu} \end{aligned}$$

i els paràmetres  $a$ ,  $b$  i  $c$  dependran del tipus de regulador que s'utilitzi (P, PI, PID, PD,...), del criteri de sintonia escollit, etc. Aquests paràmetres són els que es donen a les taules que segueixen:

#### Fórmules de sintonia en llaç obert pel regulador P ( $c = 0$ )

Mètode	Mode	$a$	$b$
Ziegler-Nichols	P	1	-1
Cohen-Coon	P	1.208	-0.956
Lopez, Murril, Smith	P	0.490	-1.084

**Fórmules de sintonia en llaç obert pel regulador PI**

Mètode	Mode	$a$	$b$	$c$
Ziegler-Nichols	P	0.9	-1	0
	I	0.3	-1	0
Cohen-Coon	P	0.928	-0.946	0
	I	1.078	-0.583	0
Lopez, Murril, Smith	P	0.859	-0.977	0
	I	0.674	-0.680	0
Rovira	P	0.586	-0.916	0
	I	-0.165	1.0	1.03

**Fórmules de sintonia en llaç obert pel regulador PID**

Mètode	Mode	$a$	$b$	$c$
Ziegler-Nichols	P	1.2	-1	0
	I	0.5	-1	0
	D	0.5	1	0
Cohen-Coon	P	1.370	-0.950	0
	I	1.351	-0.738	0
	D	0.365	0.950	0
Lopez, Murril, Smith	P	1.357	-0.947	0
	I	0.842	-0.738	0
	D	0.381	0.995	0

Totes aquestes taules han estat obtingudes de forma empírica i per al seu bon funcionament sempre s'ha de complir que:

$$0.1 \leq \frac{L}{T} \leq 1$$

Ara només cal escollir el mètode desitjat i amb les constants  $a$ ,  $b$  i  $c$  obtingudes de les taules junt amb els valors trobats de  $T$  i  $L$ , substituint a l'equació es tenen els valors de  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  buscats.

Cal dir que aquest mètode només serà aplicable sempre que la resposta al graó del procés sigui en forma de S, tal com la donada a la Figura 1. En general, aquesta resposta serà possible per sistemes que no tinguin ni integradors ni pols complexos conjugats dominants.

**Sintonia en llaç tancat.**

Aquest mètode és el proposat per Ziegler i Nichols, i consisteix en fer el muntatge de la Figura 4-3.

Els passos a seguir són:

1. Tanqueu el llaç de control amb el regulador en mode proporcional únicament (fer  $K_i = K_d = 0$ ).

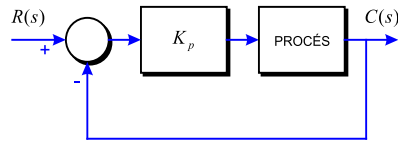


Figura 4-3

2. Amb el guany proporcional en un valor arbitrari, provoqueu diferents canvis en el punt de consigna  $R(s)$  i observeu la resposta del sistema  $C(s)$ .
3. Augmenteu o disminuïu el guany proporcional fins a aconseguir que el sistema oscil·li amb una amplitud constant. Anoteu el valor del guany proporcional ( $K = K_c$ , Guany crític) en aquest instant i mesureu el període de l'oscil·lació ( $T_c$ , període crític).

A partir de  $T_c$  i  $K_c$  s'obtenen els valors pels paràmetres del PID utilitzant la taula següent:

Paràmetres	Tipus de regulador		
	P	PI	PID
$K_p$	$0.5K_c$	$0.45K_c$	$0.6K_c$
$T_i$	—	$\frac{T_c}{1.2}$	$\frac{T_c}{2}$
$T_d$	—	—	$\frac{T_c}{8}$

Aquest mètode només serà aplicable sempre i quan sigui possible trobar un guany proporcional capaç de fer oscil·lar al sistema realimentat.

Cal remarcar que aquests mètodes només proporcionen un punt de partida a l'hora de seleccionar uns paràmetres per al controlador. Per tant és possible que en un principi s'obtinguin valors molt allunyats dels esperats amb pics molt superiors al 25 %. Aquest sobrepic és una mitjana que s'ha obtingut després de fer molts experiments sobre diverses plantes. O sigui que els mètodes en molts de casos simplement proporcionen uns possibles valors dels paràmetres del PID amb els que començar. Per aquest motiu caldrà fer gairebé sempre un ajust fi del controlador fins a obtenir una resposta satisfactòria.

### 4.3 Realització pràctica

1. Calculeu els paràmetres del controlador per al procés A+B utilitzant el mètode de sintonia de Ziegler-Nichols. Quin dels dos mètodes proposats (llaç obert o llaç tancat) escollireu?
2. Comproveu la resposta del sistema amb aquests valors i reajusteu-los si ho creieu convenient.

3. Compareu els resultats obtinguts calculant els paràmetres algebraicament i utilitzant el mètode de Ziegler-Nichols. Comenta les possibles diferències.

# 5. CONTROL DELS DIFERENTS PROCES- SOS

---

## 5.1 Objectius

---

L'objectiu de la pràctica és:

1. Treballar amb controladors PID sobre processos reals.
2. Utilitzar diferents tècniques de sintonia de controladors PID.
3. Realitzar la regulació dels diferents processos amb el PC.
4. Realitzar la regulació del procés de temperatura amb un regulador industrial.

## 5.2 Introducció

---

### 5.2.1 El controlador PID

L'esquema global d'un control mitjançant un PID és el que es representa a la Figura 5-1.

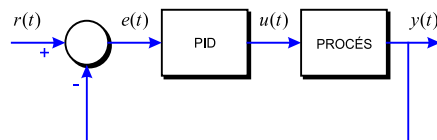


Figura 5-1

on  $e(t)$  representa el senyal d'error sobre el que opera el controlador per a donar el senyal de control  $u(t)$  que actuarà sobre el procés.

L'algorisme bàsic de control PID es pot expressar de la forma següent:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

o bé com:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Com que les dues representacions són equivalents, s'ha de tenir que:

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

$$K_d = K_p \cdot T_d$$

Es pot veure doncs que sobre l'error  $e(t)$  es combinen tres accions per a obtenir el senyal de control  $u(t)$ :

1. Proporcional ( $K_p$ ): La seva principal característica és que produeix un senyal de control proporcional al senyal d'error. En general, com més guany proporcional més ràpid respondrà el sistema, però més oscil·lacions podrà produir. Aplicant només aquest tipus de control, normalment queda un error estacionari.
2. Integral ( $K_i$  o  $T_i$ ): El senyal de control  $u(t)$  i el senyal d'error  $e(t)$  estan relacionats mitjançant una integral. Aquesta part s'encarrega d'eliminar l'error estacionari, encara que s'ha d'anar en compte perquè augmenta la inestabilitat del procés.
3. Derivativa ( $K_d$  o  $T_d$ ): El senyal de control  $u(t)$  produït per aquesta acció de control és proporcional a la derivada de l'error. La seva principal característica és que permet modificar el factor d'esmoreïment del sistema, de manera que es pot posar més part proporcional sense introduir oscil·lacions en el sistema. Això vol dir que es poden aconseguir respostes transitòries molt més ràpides sense perill d'oscil·lacions. Cal dir que aquesta acció de control és molt sensible al soroll, i que en sistemes sorollosos pot produir respostes no desitjades.

### 5.2.2 Sintonia del controlador PID

L'element PID és un tipus de regulador capaç de fer que la sortida d'una determinada planta segueixi una consigna fixada. Es pot arribar a la consigna de múltiples maneres. Que s'hi arribi d'una forma o d'una altra dependrà del tipus de procés que es tingui i quin és el criteri escollit per arribar a la consigna ( que no hi hagi sobrepics, arribar-hi amb el temps mínim,...) i per a escollir-la s'aconsegueix variant els paràmetres  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$  del PID. El fet d'ajustar aquestes constants a uns valors determinats és el que s'anomena sintonitzar el PID.

Aquesta sintonia es pot fer de diverses formes. Si es disposa del model del procés a controlar, es poden calcular els paràmetres del PID de manera que el sistema global enllaç tancat tingui els pols situats en un lloc del pla complex adient per a produir una resposta transitòria desitjada. Per exemple per al cas de que el sistema amb realimentació sigui de segon ordre, la situació dels pols donarà uns paràmetres  $\zeta$  i  $\omega_n$  que provocaran que la resposta al graó d'aquest sistema tingui un sobrepic, un temps de pujada, etc, determinats. També es poden sintonitzar els PIDs utilitzant mètodes freqüencials. El fet d'incloure el controlador PID, fa que s'introdueixin o es modifiquin les posicions dels pols i zeros del sistema inicial. D'aquesta manera el diagrama de Bode global pot ser modificat de forma adient.



### 5.2.3 El controlador industrial PM-5840/C

És un regulador-indicador digital configurable per teclat que s'ha adaptat amb les característiques següents:

Entrada:	0 – 10 V
Sortida de regulació contínua:	0 – 10 V
Temps de mostreig:	$T_s = 5$ s.
Consigna interna ajustable per teclat.	

El seu aspecte físic és el que es veu a la Figura 5-2:

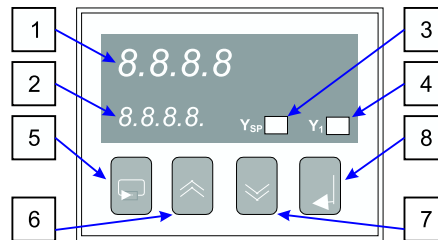


Figura 5-2

On:

1. Indicador de la mesura real i missatges en el mode de programació.
2. Indicador de consigna i valor dels paràmetres en el mode de programació.
3.  $Y_{SP}$  LED indicador de regulació.
4.  $Y_1$  LED indicador alarmes.
5. Tecla de menú.
6. Tecla d'increment.
7. Tecla de decrement.
8. Tecla d'entrada o validació.

Per a la seva configuració disposa d'un arbre de menús compost de tres branques: Parametrització, Configuració i Calibració.

Quan es posa en funcionament, després de fer un auto-test, queda per defecte en el mode de Parametrització. És a dir, que apareix la mesura real de la variable d'entrada a l'indicador 1, i si es prem la tecla Menú, es va passant a les opcions posteriors de la branca de Parametrització. Una explicació detallada del que fa cada una d'aquestes opcions es dona al final de l'enunciat. Cal observar que és aquí on s'introduiran els paràmetres del PID. S'ha de tenir en compte que en lloc de  $K_p$ , al regulador s'ha d'entrar BP, és a dir la Banda Proporcional, que correspon a

$$BP = \frac{1}{K_p} 100$$

Per exemple si s'ha obtingut un  $K_p = 5$ , la Banda Proporcional serà de  $BP = 20$ .

Per a seleccionar el tipus d'entrada que es tindrà, les unitats amb les que treballar, el nombre de decimals que es mostraran, etc, cal passar al menú de Configuració. Per això s'han de

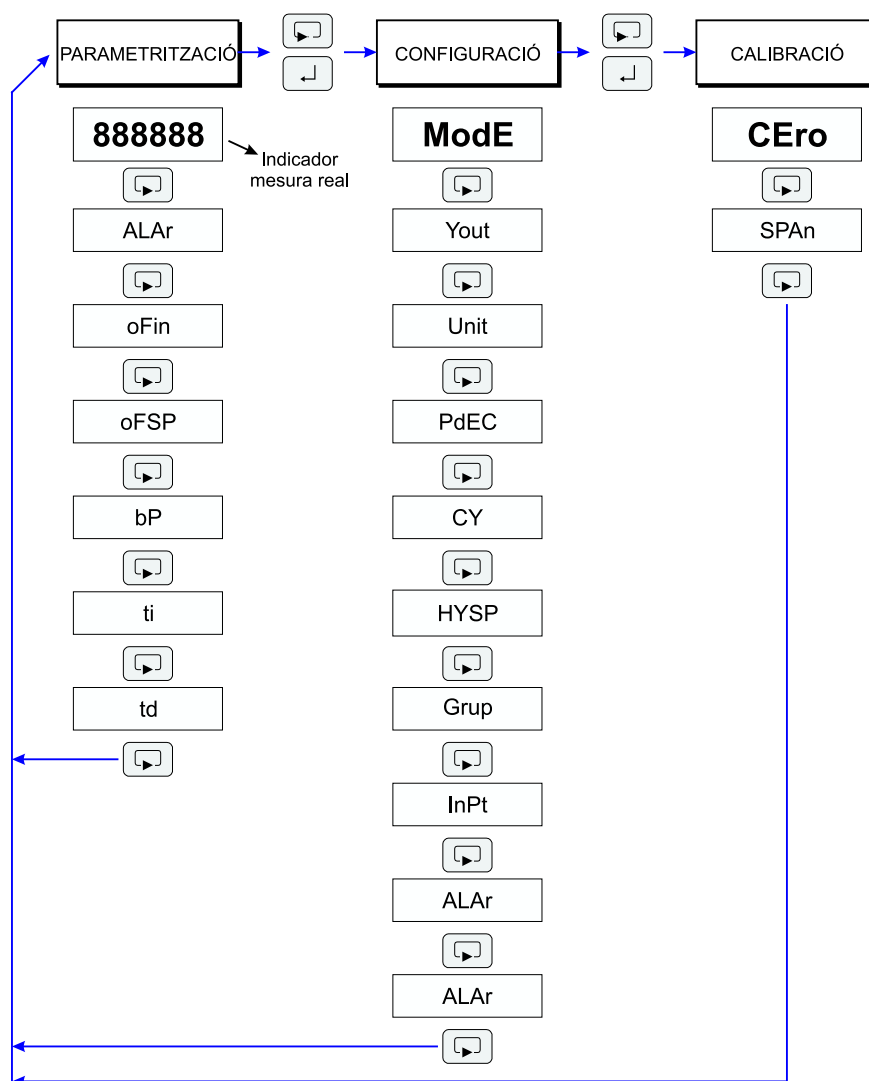


Figura 5-3

primer simultàniament les tecles de Menú i la de Validació. Una vegada aparegui Mode a la pantalla, ja es pot anar desplaçant dins el menú mitjançant la tecla de Menú.

Per a finalitzar, una vegada s'ha passat al menú Configuració, si es torna a prémer simultàniament les tecles de Menú i la de Validació es passa al menú de calibració. Aquesta opció es fa servir al principi per a ajustar el Zero i el Span per a que l'indicació de la mesura correspongui realment amb la magnitud de la mesura que s'està fent. Així el controlador operarà amb els valors adients. Per a veure com ajustar aquests paràmetres, s'explica amb detall als fulls adjunts.

Observeu que degut a que té un temps de mostreig bastant elevat, només es podrà realitzar el control de processos lents, com ara els de temperatura.

## 5.3 Realització pràctica

---

1. Realitzeu un control del procés B de la pràctica 1, mitjançant el PC LabWindows, utilitzant el controlador calculat en la simulació realitzada a partir del model identificat, i amb les especificacions que es proposaven.

Especificacions de disseny de la pràctica 1:

Error de posició:	$e_p(\infty) = 0$
Sobrepic:	$SP \leq 10\%$
Temps d'establiment:	$t_{s \pm 2\%} \leq 20 \text{ s.}$

Ajusteu els paràmetres del controlador si ho creieu convenient.

2. Repetiu l'apartat anterior per al procés A+B.
3. Implementeu amb el PC LabWindows el controlador obtingut a la pràctica 4 pel mètode empíric de Ziegler-Nichols sobre el procés A+B.
4. Realitzeu un control del procés de llum de la pràctica 2, mitjançant el PC LabWindows, utilitzant el controlador calculat en la simulació realitzada a partir del model identificat, i amb les especificacions que es proposaven.

Especificacions de disseny de la pràctica 2:

Error de posició:	$e_p(\infty) = 0$
Sobrepic:	$SP \leq 2\%$
Temps d'establiment:	$t_{s \pm 2\%} \leq 200 \text{ ms.}$
Punt de treball:	$V_{in} = 4 \text{ V}$

Mantenint el controlador canvieu el punt de treball a diferents  $V_{in}$ .

Respon igual de bé en tots els casos? Per què?

En cas de resposta negativa, per a quin marge de  $V_{in}$  considereu que funciona correctament?

Comproveu l'efecte de la pertorbació sobre el sistema.

5. Realitzeu un control mitjançant el PC LabWindows del procés de temperatura utilitzat en la pràctica 3.

Especificacions de disseny de la pràctica 3:

Error de posició:	$e_p(\infty) = 0$
Sobrepic:	$SP \leq 2\%$
Temps d'establiment:	$t_{s \pm 2\%} \leq 100 \text{ s.}$
Punt de treball:	$V_{in} = 5 \text{ V}$

Ajusteu els paràmetres del controlador si ho creieu convenient.

6. Repetiu-ho amb el controlador industrial PM-5840. Ajusteu-lo per a que tingui 2 xifres decimals en la seva representació numèrica i una escala real de 0 a 10 V d'entrada. Per això entreu 0 V per a ajustar el Cero i després entreu 10 V per a ajustar el SPAn. Seguiu el procediment que s'indica en el catàleg del controlador industrial.
7. Compareu els resultats obtinguts en els dos apartats anteriors.