

Sistemes electrònics de control

Pràctica de Regulació d'una bola
amb levitació aerodinàmica

12/2/2013

1. Introducció

S'anomena levitació l'efecte pel qual un cos o objecte es troba en suspensió estable en l'aire, sense intervenció d'un altre objecte físic en contacte amb el primer que sustenti al que levita o "flota".

Perquè tingui lloc la levitació en presència d'un camp gravitatori, cal una força que contraresti el pes del cos (la força de gravetat que actua sobre l'objecte que levita); i perquè es trobi en suspensió estable, és necessària una força addicional que contraresti cada petit desplaçament de l'objecte en levitació.

Des del punt de vista científic, la levitació es pot donar a causa dels següents efectes:

Levitació electrostàtica: cal que l'objecte que levita estigui carregat elèctricament, de manera que amb un camp elèctric adequat es produeixi una força igual i oposada a la de la gravetat. Aquest tipus de levitació és el que es dona, per exemple, en l'experiment clàssic de la gota d'oli realitzat per primera vegada per Robert Millikan (http://en.wikipedia.org/wiki/Oil_drop_experiment).

Levitació magnètica: en aquesta forma de levitació es poden agrupar la produïda per imants (per exemple, dos imants travessats per un fil, disposats de manera que s'enfrontin pols iguals; aquesta versió és coneguda també com pseudolevitación, ja que en realitat requereix d'una lligadura addicional, com per exemple el fil comectat), la deguda a la superconductivitat (concretament per causa de l'efecte Meissner), la deguda al diamagnetisme, o la suspensió electromagnètica (la qual, amb l'ajuda de servomecanismes, és aplicada en trens de levitació magnètica <http://www.youtube.com/watch?v=aIwbrZ4knpg&list=LPby-ss7ayOAc&index=1&feature=plcp>).

Levitació aerodinàmica: en aquest cas es juga amb les variacions en la pressió exercida per gasos per mantenir objectes en posició estable, com en el cas dels helicòpters (els avions no es poden considerar objectes en levitació, ja que, amb alguna excepció com el McDonnell Douglas AV-8 Harrier II, necessiten estar en moviment, per la qual cosa no es pot dir que estiguin en posició estable).

Levitació acústica: és possible a causa dels efectes no lineals de les ones sonores intenses, encara que en la pràctica això s'ha realitzat tan sols amb objectes d'uns pocs grams de massa.

Levitació òptica: emprant la pressió de radiació per fer levitar objectes de poca massa, usant el principi de la conservació del moment (l'objecte absorbeix els fotons, amb el que el moment d'aquests és transferit a l'objecte en levitació). En general, en aquest tipus de levitació, s'empren làsers.

Referències: <http://ca.encydia.com/es/Levitaci%C3%B3>, consultada el 05/11/2012

2. Objectius

La realització de les 3 activitats proposades inclou els següents objectius:

- Familiaritzar-se amb la maqueta de treball que consta d'un sistema de levitació aerodinàmica, una targeta d'adquisició de dades que permet comandar el procés des de el PC, i un PC el qual ens servirà com a eina de supervisió i control de la maqueta;

- Saber identificar els components d'un sistema de control;
- Emprant principis físics, ser capaços d'avaluar el comportament de la bola al interior del tub i classificar-ne el seu funcionament;
- Avaluar com les accions de control P+I+D modifiquen el comportament del procés;
- Ser capaços de dissenyar un regulador PID que reguli la posició de bola al interior del tub en funció d'unes determinades especificacions.

3. Descripció del banc de treball

L'esquema en diagrama de blocs del sistema d'estudi es mostra en la figura 3.1.

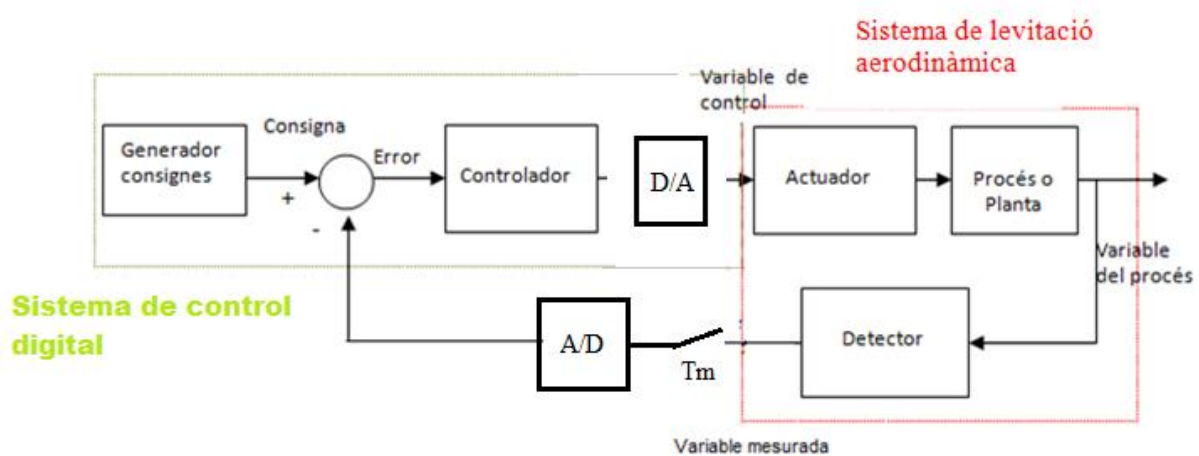


Figura 3.1. Diagrama de blocs

El banc de treball per a realitzar aquesta pràctica consta de dos elements:

- Sistema de levitació aerodinàmica
- Sistema de control

3.1. Sistema de levitació aerodinàmica

La maqueta de treball consta dels següents elements:

- A la part externa (fig. 3.2) hi ha un tub vertical per on circularà l'aire, un ventilador de velocitat variable i un sensor d'ultrasons ubicat a la part superior del tub. També es disposa a la part frontal d'un conjunt de borns de connexió, un selector i un potenciòmetre; i en la seva part posterior d'un interruptor i un endoll.
- A la seva part interna (fig. 3.3) hi ha una font d'alimentació i una placa de potència.

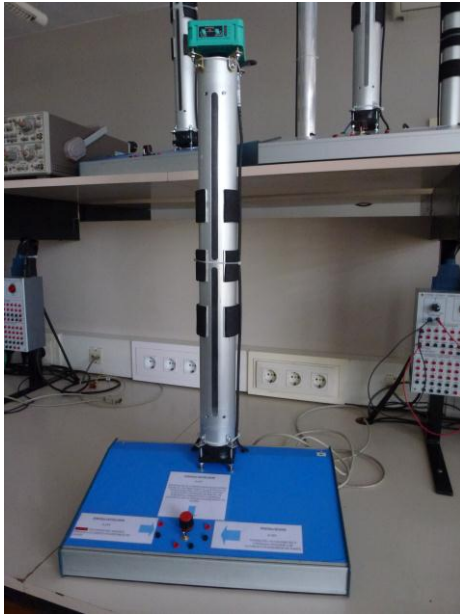


Figura 3.2. Maqueta

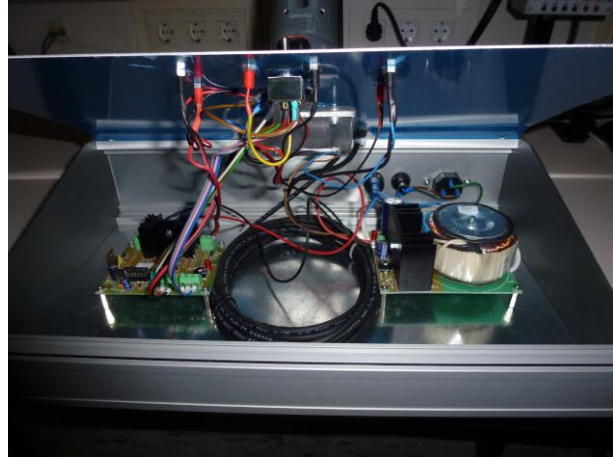


Figura 3.3. Part interna

Es descriuen a continuació tots els components de la maqueta de treball.

Ventilador



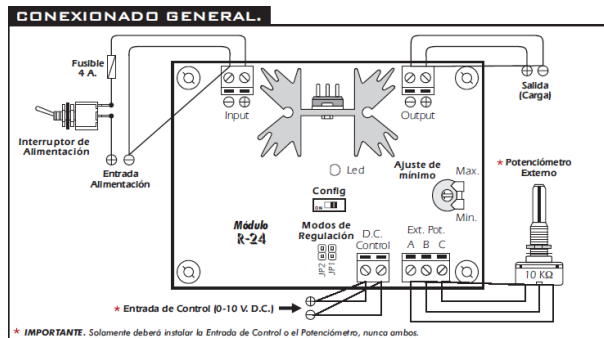
Rated voltatge: 24 VDC
Voltage Range: 10.0~26.4
Current 0.26 A
Speed: 7350 rpm
Max. Airflow: 1.05 m³/min
Noise: 50.0 dB
<http://www.farnell.com/datasheets/1359564.pdf>

Sensor d'ultrasons



Salida analògica 0 ... 10 V
Rango de detección: 30 ... 500 mm
Rango de ajuste: 50 ... 500 mm
Zona ciega: 0 ... 30 mm
Frecuencia del traductor: aprox. 390 kHz
Rango de respuesta: aprox. 50 ms
http://www.pepperl-fuchs.es/spain/es/classid_186.htm?view=productdetails&prodid=24482#overview

Regulador de CC R-24

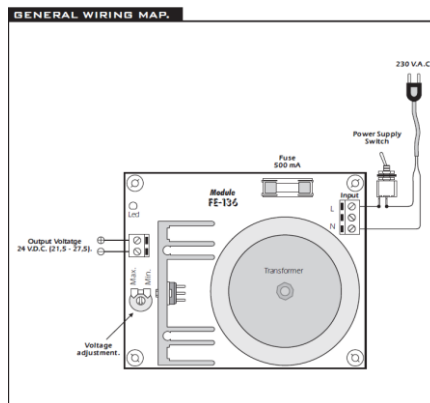


CARACTERISTICAS TECNICAS.

Tensión de Alimentación.	8-30 V. D.C.
Consumo mínimo.	35 mA.
Consumo máximo.	130 mA.
Carga máxima aplicable.	4 A.
Tensión señal de control.	0 a 10 V. D.C.
Potenciometro Externo.	10 K.
Protección contra inversión de polaridad, (P.I.P.).	Si.
Medidas.	87,5 x 72 x 30 mm.

http://www.fadisel.es/cebek-electronica/reguladores/por-potenciometro-o-por-senal-cebek-r-24_r_293_992.aspx

Font d'alimentació FE-136



TECHNICAL CHARACTERISTICS.

Input Voltage.	230. V. A.C.
Output Voltage.	24 V. D.C., (21,5 - 27,5 V.D.C.).
Maximum constant Output Intensity.	(1 A. at 24 V.D.C.).
Maximum Ripple with load.	5 mV.
Answer time against an output short-circuit (With load).	0.3 seg.
Recovering time of Vo after a short-circuit (With load).	1,5 seg.
Fuse.	500 mA.
Moduel's Sizes.	98,75 x 107 x 45 mm.

http://www.fadisel.es/cebek-electronica/fuentes-compactas/fuente-alimentacion-compacta-24-v-2a-cebek-fe-137_r_344_1008.aspx

Descripció del panell frontal



Control ventilador: si el interruptor està a la posició alta, el ventilador es controla amb el potenciòmetre. Si el interruptor indica la part baixa, el ventilador es controla amb el senyal de 0 a 10V connectat als borns de sota el interruptor.

Sortida sensor: permet llegir la tensió subministrada per el sensor d'ultrasons.

Sortida ventilador: permet llegir la tensió aplicada al motor. Aquest senyal té un rang de 0-24 V i no es pot connectar a la targeta d'adquisició de dades.

Descripció de la part posterior



Interruptor general de la maqueta.

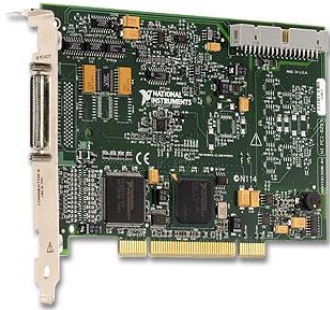
Endoll que permet alimentar la maqueta.

Fusible de seguretat.

3.2. Sistema de control

El sistema de control ha de conèixer l'estat del sistema per poder actuar sobre ell (fig. 3.1). En la maqueta de treball el control es farà mitjançant un PC. Perquè un PC pugui tenir accés a la lectura dels sensors i modificar l'actuador cal un convertidor AD-DA. Per realitzar aquesta conversió cada banc de treball disposa d'una targeta d'adquisició de dades NI PCI-6221 (fig.3.4). Aquesta targeta està connectada al bus PCI del PC i s'accedeix a ella mitjançant el mòdul de connexions que teniu en el banc de treball (fig. 3.5). El mòdul de connexions està dividit en tres part, a la part alta hi ha un generador de consignes que permet generar un senyal de contínua de -10V a 10V. En la part central hi ha els borns de connexió centrals d'entrades i sortides analògiques. Els anomenats AIx^1 , permeten llegir senyals analògiques de 0-10V, sempre que connectem el negre a massa i el vermell la senyal. Cada valor de x correspon a un canal d'entrada de la targeta d'adquisició de dades. Els anomenats AO0 i AO1, son sortides de la targeta d'adquisició de dades, i permeten generar senyals de 0-10V, cada un dels canals té la seva massa (AOGND). A la part inferior hi ha les 24E/S lògiques anomenades P0.x, P1.x i P2.x (aquestes no s'utilitzaran).

¹ x representa un número enter de 0 a 15 en el cas de senyals analògics i 0 a 8 en el cas de entrades/sortides lògiques.



Característiques

- 16 entrades analògiques de 16 Bits a 250 kS/s
- 2 sortides analògiques de 16 bits (833 kS/s),
- 24 E/S digitals,
- comptadors de 32 bits

Figura 3.4. NI PCI-6621

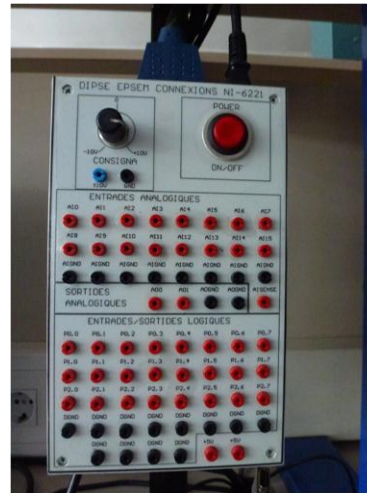


Figura 3.5. Mòdul de connexions

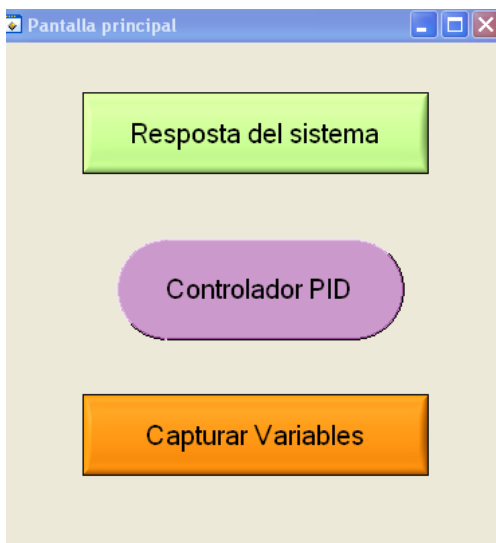



Figura 3.6. Programa Controlador

El programa que utilitzarem que accedir a la informació de la targeta s'anomena **Controlador** (el teniu disponible a Atenea, copieu-lo al vostre PC de treball). La pantalla principal d'aquest programa s'observa en la figura 3.6. Disposa de tres funcionalitats:

- **Resposta del sistema.** Permet variar manualment la tensió d'un dels canals de sortida i llegir una de les entrades;
- **Controlador PID.** Permet variar la tensió d'un dels canals de sortida segons la lectura que arriba per un dels canals d'entrada, la consigna seleccionada i els valors dels paràmetres assignats al PID;
- **Capturar variables.** Permet llegir dues entrades.

En tots ells, la variació de les senyals es mostra en una pantalla gràfica i es guarden en un fitxer amb el nom prèviament seleccionat. Accedirem als valors d'aquest fitxer mitjançant el programa MATLAB.



Per accedir al programa **Controlador** cal prémer la icona: . MATLAB és un programa de càlcul matemàtic que treballa amb matrius, a Atenea hi ha un manual bàsic de funcionament.

ACTIVITATS PRÀCTIQUES

Funcionament:

A continuació es descriuen les tres activitats a realitzar. Les activitats es realitzen en grups de dos però la seva avaluació és individualitzada.

Cada activitat planteja una sèrie de preguntes relacionades amb l'experiment i la teoria de control, les quals cal que treballeu durant la realització de l'activitat. L'avaluació es farà via Atenea amb un **qüestionari individualitzat** de preguntes multi-resposta. Llegiu les condicions abans d'iniciar el qüestionari.

Objectius:

- Reconèixer quines són les variables de control, procés, mesurada i pertorbacions del sistema en estudi.
- Avaluar quines són les no linealitats presents en el sistema d'estudi i determinar el rang de treball.
- Saber valorar si el sistema d'estudi és un sistema lineal invariant en el temps.

Pràctica 1: Determinació de les característiques del sistema en llac obert

Condicionament de la maqueta de treball

Cal deixar la maqueta en les següents condicions:

- Connecteu la maqueta de treball a la xarxa elèctrica.
- Comproveu que la targeta d'adquisició de dades està connectada a la xarxa elèctrica.
- Connecteu la sortida **AO0** de la targeta d'adquisició de dades als borns de control del ventilador, i l'entrada **AI0** als borns de sortida sensor (fig. 4.1).
- Agafeu un multímetre amb el qual mesurar la tensió aplicada al ventilador i la lectura del sensor.

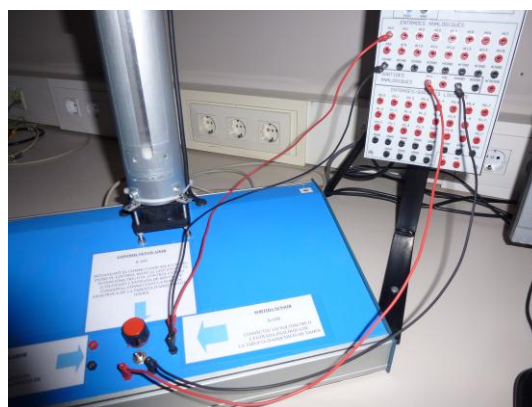


Fig. 4.1 Connexions maqueta i targeta d'adquisició de dades

Experiment 1:

Amb el interruptor a la posició alta i amb ajut del multímetre (el qual podeu connectar al borns del senyal que voleu llegir seleccionant adequadament el tipus de senyal a llegir), varieu el potenciómetre i observeu quin és el comportament de la 'bola' al interior del tub.

Doneu resposta a les següents preguntes:

- Definiu, en el camp de la regulació, que s'entén per zona morta i esbrineu quina és la zona morta de la vostra maqueta de treball;
- Trobeu una raó física que expliqui l'existència d'una zona morta;
- Definiu el concepte saturació i esbrineu quina és la saturació de la vostra maqueta;
- Jugant amb el potenciòmetre, intenteu aconseguir que la 'bola' leviti a una certa alçada del tub, descriuiu com ho heu aconseguit;
- En la vostra maqueta de treball indiqueu quina és la variable de control, la variable de procés i la variable mesurada.

Experiment 2:

Amb el interruptor a la posició baixa, repetirem el experiment 1 però utilitzant el programa **Controlador**.

- Obriu el programa **Controlador**, abans però caldrà descarregar-lo d'Atenea al vostre PC de treball;
- Seleccioneu l'opció **Resposta del sistema**;
- Configureu la pantalla de la següent forma (fig. 4.2):
 - Temps de captura: el temps en segons de durada de l'experiment, podem decidir fer un experiment de **300 segons**.
 - Temps de mostreig: marca els instants de temps en quals s'adquireix una mostra, ja que el sistema és ràpid assigneu el valor per defecte de **0.005** segon.
 - Canal d'entrada 1 / canal sortida 1: **Dev2/ai0** i **Dev2/ao0** respectivament
- Un cop configurat cal prémer: Captura dades;
- Es demana a on volem que es guardin les dades, podem dir: exp2.txt².
- Assigneu un valor a **sortida**, quan es modifica el valor de sortida cal prémer Validar sortida.
- Varieu el valor de **Sortida**, fins aconseguir que la 'bola' leviti.

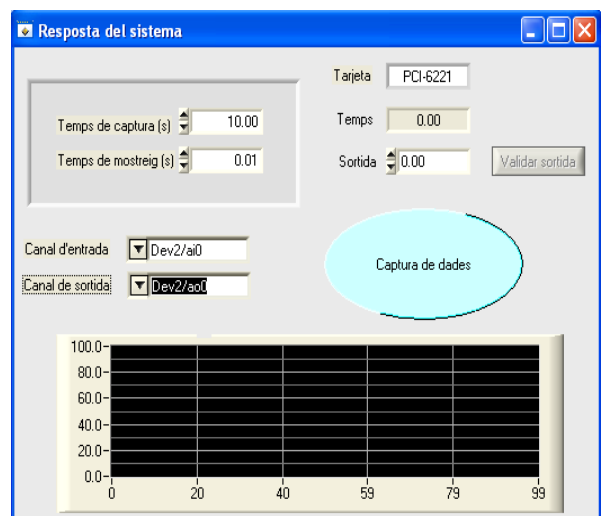


Fig. 4.2 Programa Resposta del sistema

Per accedir a les dades capturades cal:

- Obrir el programa MATLAB, cal fer-ho des de Windows -> Tots els programes -> Matlab -> R2009b -> Matlab R2009b;
- A la finestra de comandes cal escriure el següent codi de programa:

² El nom del fitxer pot ser qualsevol però l'extensió ha de ser .txt

```
load exp2.txt
t= exp2 (:,1);
CO= exp2 (:,2);
PV= exp2 (:,3);
plot(t,CO, 'b',t,PV, 'r'),
title('Resposta a una entrada graó: CO en blau i PV en vermell')
xlabel('temps (seg) ')
ylabel('Amplitud (V) ')
```

Doneu resposta a les següents preguntes:

- Cerqueu la diferència entre un senyal de temps continu i un senyal de temps discret;
- Definiu, temps de mostreig, esbrineu perquè cal mostrejar els senyals;
- Expliqueu el significat del codi `exp2(:,2)`;
- Expliqueu el significat del codi `plot(t,CO, 'b',t,PV, 'r')`,
- Expliqueu com heu aconseguit que la 'bola' leviti;
- El comportament de la 'bola' s'ajusta al comportament d'un sistema de 1r ordre? Justifiqueu la resposta;
- I de segon ordre?
- Sinó es cap de les anteriors indiqueu quin podria ser el seu comportament, per què?
- Definiu el terme sistema estable, diríeu que el vostre sistema és estable?
- A partir de la resposta visualitzada en el programa Matlab, assenyaleu les zones en que el sistema està en estat estacionari i les zones en que es troba en un transitori.
- Definiu el terme *linear time-invariant system* (LTI), en funció dels resultats obtinguts valoreu si la vostra maqueta de treball entraria dins del grup de sistemes LTI o no i en quines condicions.

Pràctica 2: Comportament del sistema en llaç tancat

Objectius:

- Comprendre les diferències entre llaç obert i llaç tancat.
- Avaluar com incideix el guany del regulador amb la resposta del sistema.
- Calcular i avaluar una funció de transferència que defineixi el comportament de la maqueta de treball.

Experiment 3:

Anem ara a treballar en llaç tancat. Situeu la maqueta en les mateixes condicions de treball que en l'experiment 2, però utilitzareu el programa **Controlador PID**.

- El PID el configurarem de forma que el guany (constant) proporcional sigui 1.2 ($k_p=1.2$), el temps derivatiu 0, ($T_d=0$) i el temps integral inf, ($T_i=\text{inf}$).
- Assigneu a la consigna un valor de 8 V;
- Poseu en funcionament l'experiment, guardant les dades en un fitxer de nom, per exemple, exp3.txt.
- En aquest mode de funcionament no cal definir el temps de durada de l'experiment, aquest s'aturarà en prémer **Aturar**.

Si voleu observar els resultat en una figura MATLAB, cal fer:

```
load exp3.txt
t= exp3 (:,1);
SP= exp3 (:,2);
PV= exp3 (:,3);
CO= exp3 (:,4);
plot(t,SP, 'b',t,PV, 'r',t,CO, 'g'),
title('Resposta a una entrada graó: SP en blau, PV en vermell i CO en verd')
xlabel('temps (seg) ')
ylabel('Amplitud (V) ')
```

Doneu resposta a les següents preguntes:

- Compareu el comportament de la 'bola' en llaç obert i llaç tancat;
- Calculeu el senyal error, E, (fig 3.1);
- Comproveu si és certa l'expressió $CO = k_p * E^3$;
- Repetiu l'experiment per altres valors del guany proporcional i altre consignes;
- Hi ha alguna relació entre CO i la zona morta calculada en el exp. 1, determineu quina.
- Cerqueu una relació entre k_p i E, feu una justificació teòrica del resultat.
- Definiu el terme "Guany del sistema".
- Per els diferents valors de k_p , observeu quin és el temps de resposta, el temps d'establiment i, si correspon, calculeu la sobre oscil·lació. Es pot establir alguna relació entre elles i el valor de k_p ?
- Penseu una forma d'analitzar si el guany del sistema en llaç tancat és lineal o no. Proveu i avalueu els resultats.

Experiment 4:

L'objectiu d'aquest experiment és determinar, a partir de la resposta temporal, la funció de transferència del procés estudiant. Per això cal que apliqueu una seqüència de quatre graons deixant entre canvi i canvi el temps suficient perquè la 'bola' s'estabilitzi.

- Fixeu el valor de k_p , per exemple $k_p=1$.

³ Podeu fer aquest càlcul directament amb Matlab, per exemple si $k_p=1.2$ feu $CO1=1.2*(SP-PV)$ i compareu els resultats, fent: `plot(t,CO, 'b',t,CO1, 'r')`.

- Apliqueu una consigna de 6V, espereu com a mínim 30 segons i modifiqueu la consigna a 7V, feu validació. Espereu 30 segons més i feu un nou canvi de consigna a 8V i espereu novament 30 segons. Feu un altre canvi a 9V i espereu 30 segons més i pareu l'experiment.
- Igual que l'experiment 3, visualitzeu la resposta assignant els valors de t, SP, PV i CO.
- Baixeu-vos el programa anomenat FT_cl_subesmorteit.m i deixeu-lo al directori de treball del Matlab⁴. Aquest programa s'executa en l'entorn de Matlab i ens estima una funció de transferència del procés en llaç obert a partir de la resposta en llaç tancat.
- Primer crideu el fitxer de dades nom.txt, el contingut del fitxer queda assignat a la variable nom.
- Executeu el programa fent: FT_cl_subesmorteit. Aquest us demana el nom del fitxer de dades i el valor del guany proporcional.
- Anoteu-vos la funció de transferència del llaç tancat estimada i la funció de transferència del llaç obert.

Doneu resposta a les següents preguntes:

- Expliqueu que fa el programa FT_cl_subesmorteit.m. Podeu accedir al codi fent: File -> Open i seleccionant el fitxer FT_cl_subesmorteit.m.
- Definiu els conceptes: funció de transferència, pols i zeros.
- Esbrineu com s'obté la funció de transferència de llaç obert a partir de la funció de transferència de llaç tancat.
- Si la funció de transferència d'un sistema es coneix, descriu com es pot saber si la resposta a un graó serà sub-esmorteïda o sobre-esmorteïda.
- Avalueu la funció de transferència estimada, de quin ordre és? Té arrels reals o imaginàries?⁵
- Com es pot determinar si una funció de transferència representa a un comportament estable o inestable? Com és el vostre procés?
- Valoreu si la funció de transferència estimada s'ajusta a la resposta real o no, penseu el motius que poden originar discrepàncies.

Pràctica 3: Regulació del sistema en llaç tancat

Objectius:

- Interpretar l'efecte que provoquen les accions proporcional, integral i derivativa sobre el sistema en llaç tancat.
- Ser capaç de dissenyar analíticament un regulador.
- Aprendre a avaluar els resultats.

⁴ El directori de treball de Matlab el teniu a la part superior de la pantalla i s'anomena *Current Folder*.

⁵ En codi MATLAB podeu calcular les arrels d'un polinomi mitjançant la funció roots. Per exemple, donat un polinomi en s: $p(s)=5s^3+4s^2+s+6$, es poden calcular les seves arrels fent: $p=[5\ 4\ 1\ 6]$; roots(p). Observeu que el polinomi s'introdueix com un vector en ordre creixent d'exponent. En aquest cas s'obtenen 3 arrels, una arrel real negativa $s_1=-1.3290$, i dues arrels complexes conjugades de valor: $s_{2,3}=0.2645 \pm 0.9127i$.

Experiment 5:

Amb la maqueta en les mateixes condicions que l'experiment 3,

- Amb $k_p=1$, $T_d=0$ i per diferents valors de T_i , observeu com respon el sistema quan s'apliquen canvis graó a la consigna. Guardeu els resultats en un fitxer per poder comparar.
- Amb $k_p=1$, $T_i=\infty$ i per diferents valors de T_d , observeu com respon el sistema quan s'apliquen canvis graó a la consigna. Guardeu els resultats en un fitxer per poder comparar.

Doneu resposta a les següents preguntes:

- Definiu el terme temps d'acció integral.
- Com calculeu la sobre-oscil·lació a partir de la resposta graó.
- Per els diferents valors de T_i , observeu quin és el temps de resposta, el temps d'establiment, l'error en estat estacionari i, si correspon, calculeu la sobre oscil·lació. Es pot establir alguna relació entre elles i el valor de T_i ?
- Definiu el terme temps d'acció derivativa.
- Compareu les respostes del sistema per diferents valors de T_d , a quina conclusió arribeu.
- En aquesta aplicació, utilitzaríeu l'acció derivativa?, per què?

Experiment 6:

Ajust manual d'un PID,

- Ajusteu primer el valor de k_p fins aconseguir una resposta transitòria amb una sobre-oscil·lació inferior al 20%. La resposta s'observa aplicant canvis graó a la consigna. Enregistreu els resultats per poder comparar i calcular la sobre-oscil·lació.
- Si ho creieu pertinent afegir acció derivada fins a reduir la sobre-oscil·lació.
- Afegir T_i per anular l'error en estat estacionari.
- Si cal, ajusteu de nou les variables per aconseguir que la sobre-oscil·lació sigui inferior al 20%.

Doneu resposta a les següents preguntes:

- Quin valors de PID permeten assolir l'objectiu de disseny? Us a constat trobar-lo?
- Creieu que aquesta metodologia és fàcil d'aplicable a un procés real? Per què?
- Donada una sobre-oscil·lació del 20%, quin seria el coeficient d'esmoreïment del sistema?