
Descripció d'un sistema d'instrumentació

PID_00257317

Ferran Domínguez Gros
Jordi Solé Casals

Temps mínim de dedicació recomanat: 4 hores



Ferran Domínguez Gros

Enginyer tècnic de Telecomunicacions (Universitat Politècnica Catalunya). Col·laborador de la UOC des del 2003 en els estudis d'Enginyeria Informàtica, ETTT, grau de Telecomunicació, postgrau i màster de Seguretat Informàtica. Treballa des de fa temps en diferents empreses privades del sector de les telecomunicacions, informàtic i sanitari en diferents projectes de tecnologies de la informació i la comunicació (TIC).

Jordi Solé Casals

Doctor enginyer de Telecomunicacions (Universitat Politècnica Catalunya). Llicenciat en Humanitats (Universitat Oberta de Catalunya). Col·laborador de la UOC des del 2001 en els estudis d'Enginyeria Informàtica, ETTT, grau de Telecomunicació. Actualment, és professor titular al Departament de Tecnologies Digitals i de la Informació de la Universitat de Vic. El seu àmbit de recerca se centra en el processament de senyals biomèdics.

Tercera edició: febrer 2019

© Ferran Domínguez Gros, Jordi Solé Casals

Tots els drets reservats

© d'aquesta edició, FUOC, 2019

Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona

Disseny: Manel Andreu

Realització editorial: Oberta UOC Publishing, SL

Cap part d'aquesta publicació, incloent-hi el disseny general i la coberta, no pot ser copiada, reproduïda, emmagatzemada o transmesa de cap manera ni per cap mitjà, tant si és elèctric com químic, mecànic, òptic, de gravació, de fotocòpia o per altres mètodes, sense l'autorització prèvia per escrit dels titulars dels drets.

Índex

Introducció	5
Objectius	6
1. Aplicacions de mesura i de control	7
2. Senyals i variables	15
3. Característica estàtica	19
3.1. La corba de calibratge	19
3.2. Calibratge	22
4. Característica dinàmica	24
4.1. Caracterització del comportament dinàmic	27
4.1.1. Domini de la freqüència	28
4.1.2. Domini del temps	29
5. Errors i propagació d'errors	31
5.1. Error absolut i error relatiu	31
5.2. Propagació d'errors	33
Resum	35
Exercicis d'autoavaluació	37
Solucionari	38
Glossari	40
Bibliografia	42

Introducció

La instrumentació electrònica, en progrés i evolució constants, interactua en les nostres vides diàriament en qualsevol dels seus àmbits. Enumerem a continuació uns petits exemples en què intervenen, en el nostre dia a dia, diferents aspectes de la instrumentació electrònica:

- Uns grans magatzems oberts en ple estiu o rigorós hivern amb un flux continu de persones que entren als grans espais i en surten.
- Un centre de procés de dades (CPD) ple de maquinari que dissipa calor a ple rendiment a certes hores del dia en les quals ens interessa mantenir, igual que en el cas dels grans magatzems, una temperatura constant.
- Un departament de cardiologia en un hospital qualsevol on ens interessa monitorar l'activitat elèctrica del cor d'un pacient mitjançant un electrocardiograma, en què garantir la seguretat del pacient és de vital importància i, per tant, cal garantir també l'aïllament elèctric entre el sistema de mesura i el pacient.
- Un corredor de fons que, quan fa l'entrenament diari, vol mesurar en temps real el seu esforç, la distància recorreguda en cada instant, la seva velocitat i les calories consumides mentre arriba, pas a pas, al seu objectiu.

La llista amb diferents exemples que podríem enumerar seria interminable.

Els sistemes de mesura i control, els senyals, les variables, els errors derivats de cada component i de cada connexió representen la base, l'anomenada PCB (*printed circuit board*) o targeta de circuit imprès, sobre la que construirem el nostre sistema d'instrumentació electrònic.

Per aquest motiu, l'estudiant ha de prestar un interès especial en aquest mòdul perquè és aquí que començarem a construir els fonaments sobre els quals edificarem la resta de conceptes en què reposa la totalitat del temari d'Instrumentació electrònica.

Objectius

Els objectius que ha d'assolir l'estudiant amb aquest mòdul didàctic són els següents:

1. Conèixer les aplicacions de mesura i control mitjançant la presentació dels diferents conceptes sobre el perquè ens interessa mesurar variables i com aquestes mesures les podem utilitzar per a controlar dispositius.
2. Conèixer els conceptes de *senyals* i *variables* per entendre com podem tenir de manera numèrica l'evolució temporal de variables físiques que volem mesurar i/o controlar.
3. Conèixer els dispositius electrònics, atès que el control es porta a terme amb aquests dispositius i saber quines són les seves característiques estàtiques i dinàmiques més importants, que ens permetran caracteritzar el dispositiu.
4. Entendre el concepte d'*error* en la mesura, per tal de poder minimitzar els errors en les implementacions pràctiques de manera que no afectin negativament els nostres dissenys.

1. Aplicacions de mesura i de control

Els antics grecs utilitzaven la paraula *μετρον* (*metron*) per a referir-se al terme **mesura**.

Els romans es van esforçar a crear un sistema únic de mesura que fos vàlid per a tot el seu vast imperi, tot i que durant l'edat mitjana va tornar a regnar un desordre important en què van proliferar diferents unitats que, si bé podien tenir el mateix nom, diferien en el seu valor moltes vegades d'una manera força significativa.

Finalment, els ideòlegs de la Revolució Francesa van decidir suprimir els drets feudals referents als pesos i mesures i els van integrar en un sistema de mesures únic i uniforme.

L'Acadèmia de les Ciències va tractar d'excloure tots els elements arbitraris o d'interès particular i va apuntar la naturalesa, agafant com a unitat de mesura el **metre**, paraula que com hem vist prové etimològicament del grec i vol dir *mesura*. El valor que es va donar al metre equivalia a la deu milionèsima part d'un quart de meridià terrestre.

Posteriorment, i ja dins de l'àmbit de la ciència moderna, en la XI Conferència General de Pesos i Mesures es va donar una definició del **metre** més exacte amb relació a un fenomen físic natural constant, precís, indestructible i reproduïble en qualsevol lloc:

"Un metre és igual a 1.650.763,73 vegades la longitud de l'ona en el buit de la radiació corresponent a la transició entre els nivells $2p_{10}$ i $5d_5$ de l'àtom de criptó 86".

En qualsevol cas, el metre ha esdevingut la unitat principal de mesura de longitud del sistema internacional d'unitats. Quan mitjançant els sentits mesurem de manera aproximada la mida d'una habitació o un camp de futbol, per exemple, en realitat estem fent una comparació amb l'estàndard definit anteriorment, el qual utilitzem com a referència per a fer les mesures. D'aquesta manera, estem obtenint una magnitud de mesura a partir d'una magnitud concreta, precisa i reconeguda internacionalment que ens serveix com a patró de mesura de longitud.

No obstant això, en l'exemple anterior, en què hem intentat quantificar la mida d'una habitació, tot i que puguem pensar que tenim uns sentits infalibles, no estem fent una mesura objectiva perquè sempre estarà subjecta a errors d'apreciació i a desviacions especialment significatives.

A més, els sentits són incapaços de mesurar certes variables físiques com objectes extraordinàriament petits o, arribat el cas, percebre ones sonores d'una freqüència inferior a 20 Hz o superior a 20 kHz a causa de les nostres limitacions auditives.

Serà per això, per tal de suplir totes les deficiències dels sentits, que utilitzem instruments de mesura. Seria el cas d'una cintra mètrica, un microscopi o un verificador electrònic.

Aquests instruments dels quals ens ajudem són capaços de quantificar d'una manera sistemàtica i precisa les diferents magnituds que podem i no podem percebre amb els sentits, i ens permeten obtenir un coneixement, principalment científic.

Podem, aleshores, definir la **instrumentació** com un conjunt de metodologies basades en el disseny, la construcció i l'aplicació de dispositius físics que permeten optimitzar l'eficiència de les percepcions humanes.

Una de les tecnologies d'instrumentació més avançada és la que utilitza tècniques electròniques per a fer mesures.

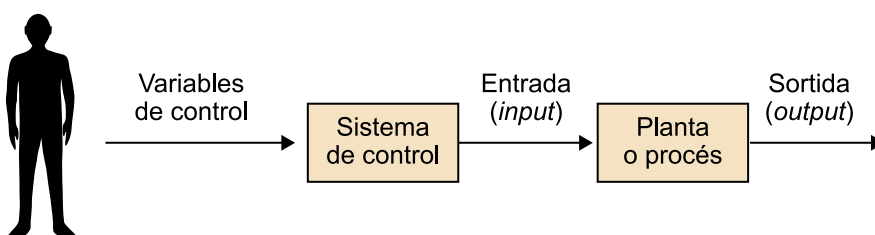
La **instrumentació electrònica** és la tècnica que mesura qualsevol magnitud física, la seva conversió a magnituds elèctriques i el seu tractament per proporcionar informació a un sistema de control i a un operador que la monitora.

Dins dels entorns industrials és on la instrumentació electrònica pren una dimensió i un protagonisme més grans, i més especialment, en el control de processos.

El concepte de *control* és molt ampli i pot estar immers dins d'escenaris de topologia molt diversa i complexa. En una primera definició, i més bàsica, podríem dir que el *control* és el govern d'un sistema per un altre sistema. En la figura 1 podem observar un sistema de control bàsic.

Figura 1. Diagrama general d'un sistema de control de llaç obert

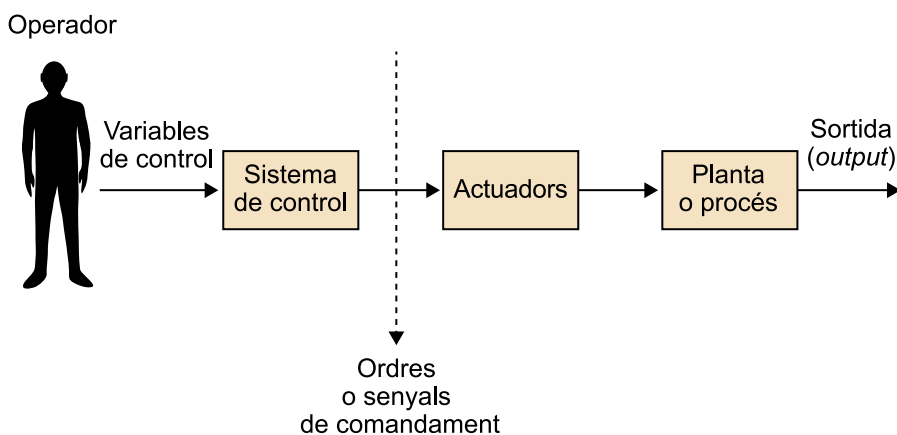
Operador



L'objectiu del sistema de control de la figura 1 és obtenir una sortida concreta. Per aconseguir-ho, l'operador introdueix unes variables en el sistema de control, el qual genera els senyals de comandament que actuen sobre el procés o planta amb l'objecte de modificar-ne la sortida i obtenir-ne la resposta esperada.

Els elements que executen les ordres o els senyals de comandament de l'operador des del sistema de control reben el nom d'**actuadors**. Per tant, veiem que el sistema de control funciona amb senyals que governen els actuadors que executen les ordres donades per l'operador sobre la planta o el procés. Veiem aquesta idea gràficament en la figura 2.

Figura 2. Diagrama general d'un sistema de control de llaç obert



En aquest sistema es detallen les ordres o els senyals de comandament que governen els actuadors.

Aquest sistema de control s'anomena *sistema de control de llaç obert* perquè no obté cap informació sobre el comportament del procés, és a dir, no hi ha cap tipus de realimentació de la sortida del sistema cap a la seva entrada.

Els sistemes de llaç obert s'utilitzen quan es coneix anticipadament la relació entre l'entrada i la sortida i no hi ha perturbacions de cap tipus. La **pertorbació** és un senyal que intervé negativament en la sortida del sistema.

Com que estem parlant d'un controlador en llaç obert, l'acció d'una possible pertorbació no podria ser corregida pel sistema de control en no tenir cap constància del seu impacte en la sortida. Tenint en compte això, com que aquestes perturbacions no són previsible, no poden ser compensades prèviament en el sistema.

És en aquest moment que s'imposa la utilització dels sistemes de control de llaç tancat o realimentats, que ens permeten aconseguir que la sortida mantingui el valor volgut malgrat les perturbacions externes no previstes.

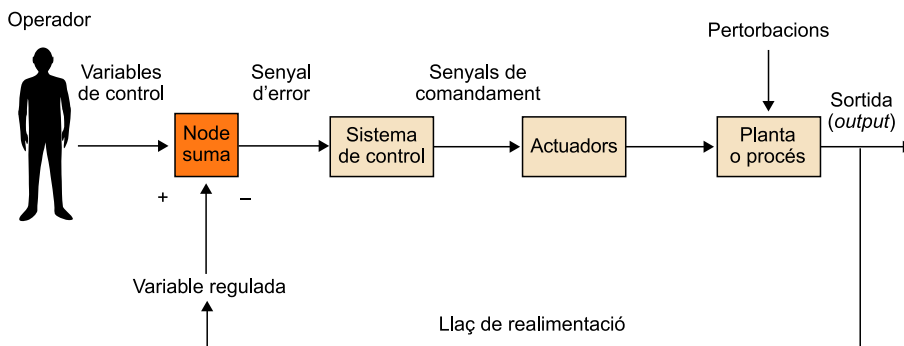
En els sistemes de control de llaç tancat, el senyal d'error¹ obtingut de la sortida es realimenta cap a l'entrada del sistema (figura 3).

⁽¹⁾El senyal d'error és la diferència entre el senyal de referència i el senyal de realimentació.

Un avantatge interessant dels sistemes de control de llaç tancat és que el senyal de sortida obtingut deixa de ser tan sensible a les pertorbacions externes i també davant de les pròpies variacions internes dels elements que conformen el sistema.

En aquest context, l'operador fixa les variables de referència responsables del comportament volgut i el sistema de control genera els senyals de comandament per aconseguir que la variable regulada, o sortida del procés, acabi tenint el valor que volem sense ser modificat per les pertorbacions externes.

Figura 3. Diagrama general d'un sistema de control de llaç tancat



Sistema de control de llaç tancat

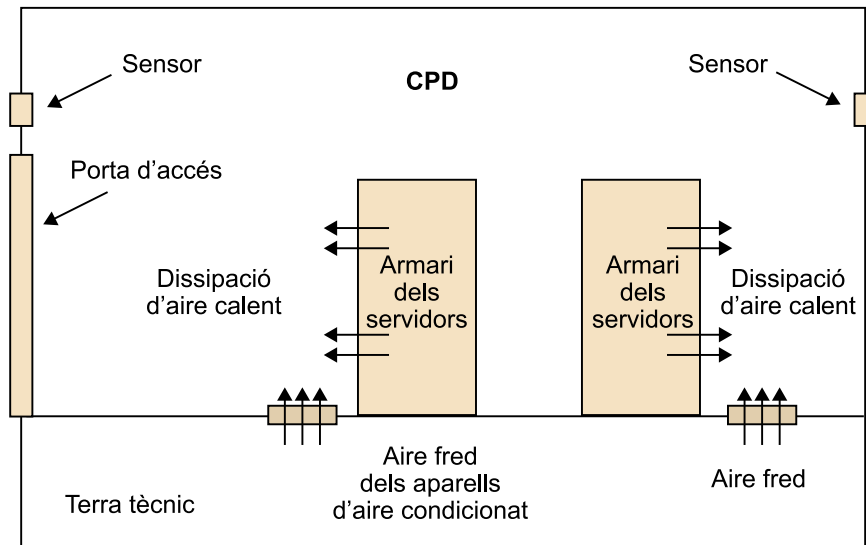
Vegem a continuació un exemple pràctic d'un sistema de control de llaç tancat en què s'apliquen els conceptes que acabem de veure. El sistema realimentat següent, mostrat en la figura 4, està ubicat en un centre de procés de dades² (CPD) en què volem tenir perfectament controlat el clima de la sala (temperatura, humitat i un possible incendi).

Dins d'aquest CPD hi trobem allotjats tots els servidors de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC), en funcionament constant les 24 hores al dia i 7 dies la setmana. El fet que estiguin funcionant permanentment implica que estan dissipant calor les 24 hores del dia i poden provocar, potencialment, que augmenti la temperatura ambiental de la sala. A més a més, aquest CPD és accessible per una porta de grans dimensions que provoca un augment de la temperatura cada vegada que s'obre.

En general, tots els aparells electrònics tenen un marge establert de temperatura a la qual poden funcionar de manera òptima. Superar el llindar mínim o màxim de funcionament pot provocar que els servidors s'aturin, i que quedi interromput el servei. Això és precisament el que volem evitar amb el sistema de control en llaç tancat.

⁽²⁾A partir d'ara abreuïem *centre de procés de dades* amb la sigla *CPD*.

Figura 4. Exemple d'un possible sistema real de control de llaç tancat



L'aire fred dels aparells d'aire condicionat manté la temperatura volguda. La realimentació s'obté dels sensors d'humitat i temperatura.

El sistema de la figura 4 consta d'uns aparells d'aire condicionat que injecten aire fred per unes canalitzacions disposades en l'anomenat *terra tècnic del CPD*, i uns termòmetres o sensors digitals, que mesuren la humitat i temperatura ambiental de la sala i que controlen que no se superi el límit màxim o mínim definit per al funcionament correcte dels servidors.

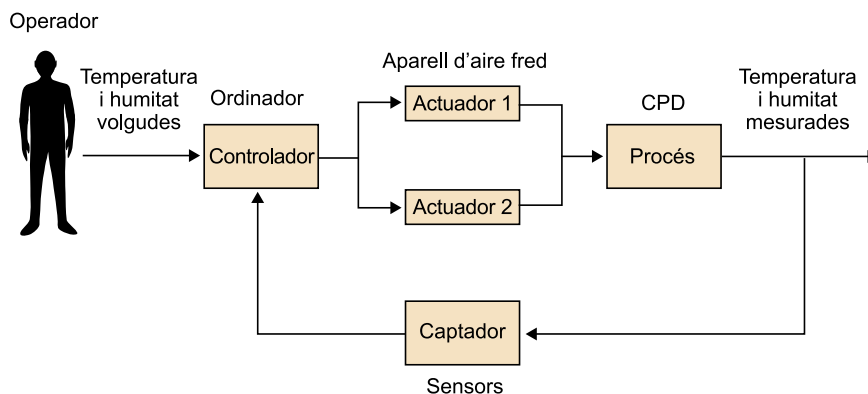
Per a conèixer l'estat del procés (temperatura i humitat de la sala) s'utilitzen, tal com s'ha comentat, un parell de sensors digitals que informen el sistema de control d'ambdues variables.

Els sensors digitals mesuren, per exemple, la temperatura real del CPD i la comparen amb el patró mínim i màxim definit prèviament per l'operador. Si el valor real mesurat supera algun dels límits establerts, el sistema de control rep un senyal d'error i genera, al seu torn, un senyal de comandament que actua sobre l'aparell d'aire condicionat aplicant més aire fred a la sala.

En el cas contrari, quan s'arriba a la temperatura o humitat volgudes, els senyals de control disminueixen la injecció d'aire fred i es produeix també un estalvi energètic.

L'operador pot conèixer i ajustar en tot moment la temperatura i humitat de la sala mitjançant un ordinador (**controlador**) que rep de manera periòdica i constant tota la informació relativa a l'estat ambiental del procés per mitjà del sensor (**captador**), segons podem veure en la figura 5.

Figura 5. Esquema general de blocs que representa el control de llaç tancat del CPD de la figura 4



De l'exemple anterior es pot deduir que la **mesura** és un element fonamental per al control. No obstant això, no sempre és evident establir una frontera entre la instrumentació electrònica de **mesura** i la instrumentació electrònica

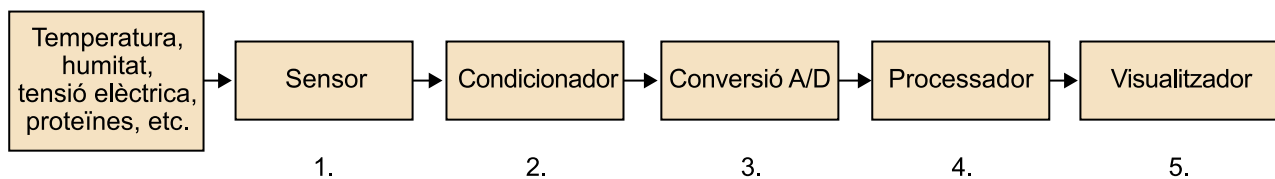
de **control**. Les competències de la primera estarien més referides a la captura i al processament de les dades, mentre que les competències de la segona, a la seva interpretació i presa de decisions.

Els elements d'un sistema de mesura inclouen la captura de les variables físiques (sensors), el procés de condicionament del senyal (amplificació, conversió, filtratge, modulació/desmodulació...) i la seva visualització per part de l'operador.

L'esquema bàsic d'un sistema de mesura, que descrivim a continuació, és el que veiem en la figura 6:

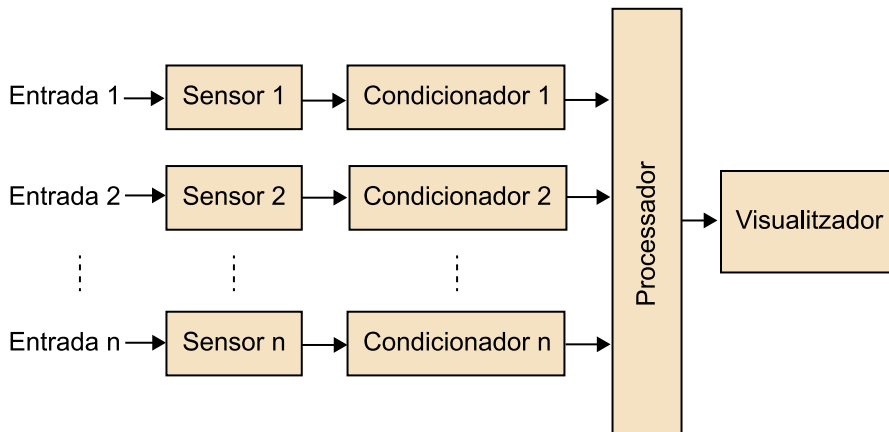
- 1) El sensor captura la variable física i la converteix en un senyal elèctric.
- 2) El condicionador pot fer diverses funcions, com ara incrementar la potència del senyal elèctric, eliminar o filtrar els components del senyal (de tensió a corrent o a freqüència, etc.), modificar la forma del senyal amb la finalitat de transmetre-la a llargues distàncies i reduir-ne la sensibilitat a possibles sorolls (modulació/desmodulació).
- 3) Després del condicionament, el senyal analògic es converteix al domini digital mitjançant un convertidor A/D (d'analògic a digital). Processar digitalment el senyal pot tenir els seus avantatges i permetre una precisió més gran, més flexibilitat de disseny, més facilitat d'emmagatzematge, etc.
- 4) El processador, generalment digital, tracta, selecciona i manipula les dades en funció de l'objectiu del sistema de mesura.
- 5) El visualitzador presenta la informació a la persona que la monitora.

Figura 6. Esquema bàsic d'un sistema de mesura



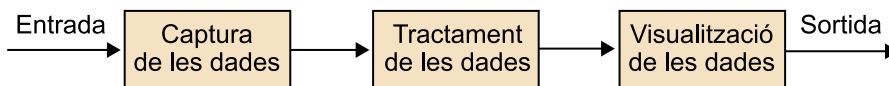
El sistema de mesura que hem vist és d'un sol canal. No obstant això, aquesta estructura no és la més adient quan es fa necessària la captura simultània de diverses variables d'entrada. Per a aquests casos, s'utilitza un sistema de mesura multicanal amb convertidor A/D (d'analògic a digital) independent per cada canal d'entrada. Ho podem veure en l'esquema de la figura 7.

Figura 7. Esquema general d'un sistema de mesura multicanal



Independentment del nombre de variables i canals de mesura que fem servir, les funcions principals d'un sistema de mesura es poden resumir tal com es presenten en la figura 8.

Figura 8. Diagrama de blocs general d'un sistema de mesura



Com hem vist en l'exemple anterior (figura 7), hi ha processos tecnològics que han de processar moltes variables en els seus sistemes de mesura i control.

Aquests sistemes de mesura i control poden presentar dues arquitectures:

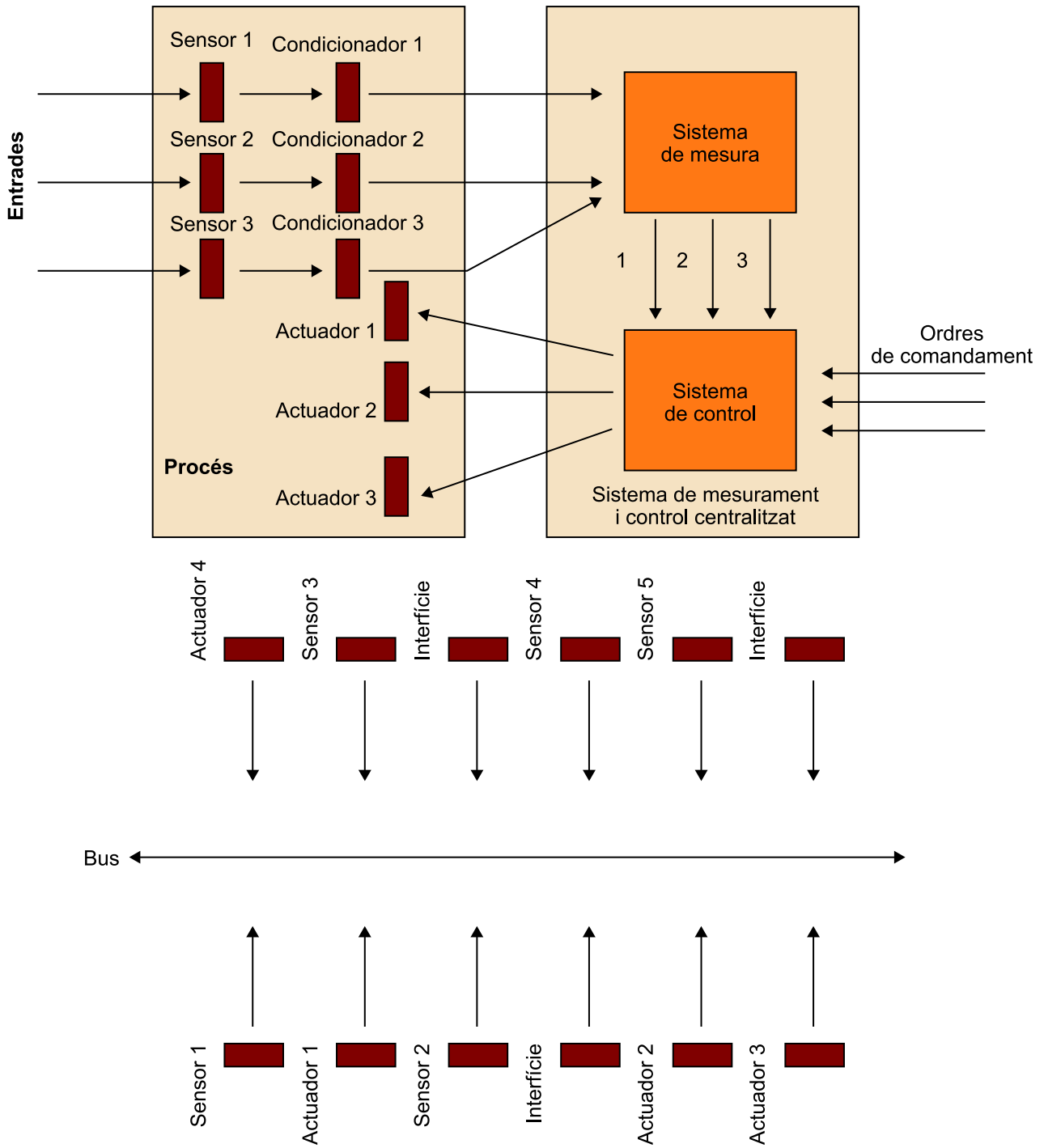
- Centralitzada.
- Distribuïda.

L'arquitectura centralitzada s'utilitza quan es tracta de mesurar poques variables i amb distàncies curtes entre els sensors i el processador. Aquesta arquitectura presenta un alt nivell de cablejat i requereix un sistema de condicionament d'altres prestacions per a evitar possibles sorolls i interferències.

L'arquitectura distribuïda és utilitzada per la mesura d'un nombre elevat de variables disperses geogràficament. Tota la intel·ligència del sistema està repartida entre tots els sensors i actuadors. Utilitzen típicament un cablejat en bus o xarxes sense fil.

En la figura 9 es mostra un sistema de mesura i control centralitzat (a dalt) i un de distribuït (a baix).

Figura 9. Esquema d'un sistema de mesura i control centralitzat (a dalt) i distribuït (a baix)



2. Senyals i variables

En termes d'instrumentació electrònica, un **senyal** és una variació d'una magnitud física, generalment corrent elèctric, que s'utilitza per a transmetre informació o tensió.

Aquesta variació que es pretén capturar és el que s'anomena **variable**, i forma part com a element d'un conjunt concret. D'aquesta manera, els senyals guarden informació sobre variables.

Vegem, a tall d'exemple, diferents tipus de variables en la taula 1.

Taula 1. Exemples de variables, segons la naturalesa

Naturalesa de la variable	Tipus de variable
Biològica	Proteïnes, hormones...
Elèctrica	Resistència, càrrega, corrent, tensió, capacitat, freqüència...
Magnètica	Flux, camp magnètic, permeabilitat magnètica...
Mecànica	Velocitat, acceleració, força, pressió, massa...
Òptica	Microones, raig gamma, raig X, ultraviolat...
Química	Humitat, pH, conductivitat, concentració de gasos...
Tèrmica	Temperatura, entropia, calor...

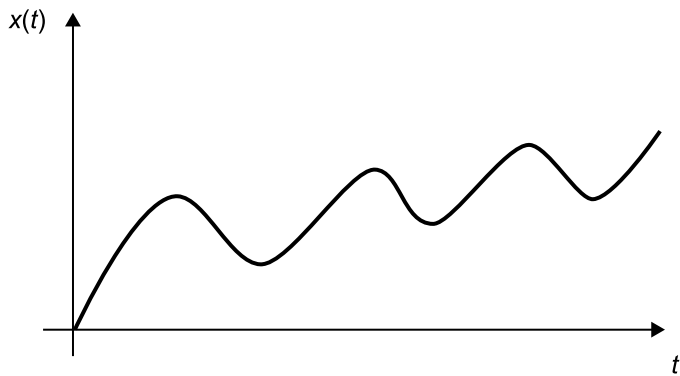
En el nostre àmbit, tant els senyals com les variables es poden classificar seguint un mateix criteri. Per exemple, podem distingir entre les variables analògiques i les variables digitals:

1) Parlem de **variables analògiques** quan dins d'un interval determinat podem tenir qualsevol valor, és a dir, totes les dades constitueixen matemàticament un conjunt dens. Tenim, doncs, un nombre total infinit de valors. En la figura 10 es mostra un exemple de variable analògica.

Conjunt dens de dades

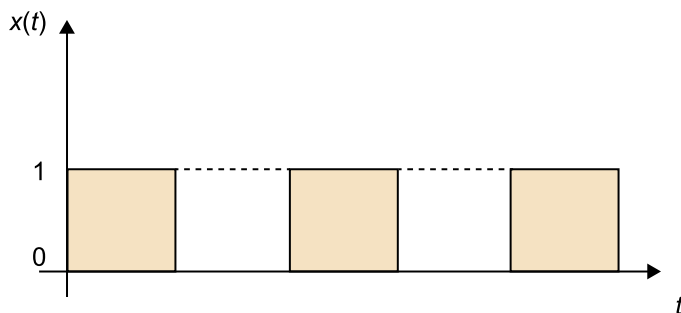
Parlem de *conjunt dens* perquè entre dos valors qualssevol sempre podem incloure un tercer valor del mateix conjunt.

Figura 10. Exemple de variable analògica



2) Per a les **variables digitals**, les dades constitueixen un nombre finit de valors. En el cas del sistema binari, tindríem només dos valors: 0 i 1. Una possible representació la podem veure en la figura 11.

Figura 11. Exemple de variable digital



De la mateixa manera, els senyals es poden classificar en senyals analògics i senyals digitals:

1) Els **senyals analògics** guarden informació, $x(t)$, sobre variables, $v(t)$, com hem vist anteriorment, en qualsevol dels paràmetres que les defineixen. Depenent d'on es guarda la informació es té la classificació següent:

- Instantanis. En aquest cas, la variable continguda coincideix amb el senyal o és proporcional a ell: $v(t) = k x(t)$.
- D'amplitud. Si es tracta d'un senyal periòdic en què la variació es troba en l'amplitud: $v(t) = k x(t) \sin(\omega t)$.
- Freqüència. Agafant el senyal periòdic anterior i fent-ne variar la freqüència: $v(t) = A \sin(k x(t) t)$.
- Fase. Per al mateix cas d'un senyal periòdic en què la variació es troba en la seva fase: $v(t) = A \sin(\omega t + k x(t))$.

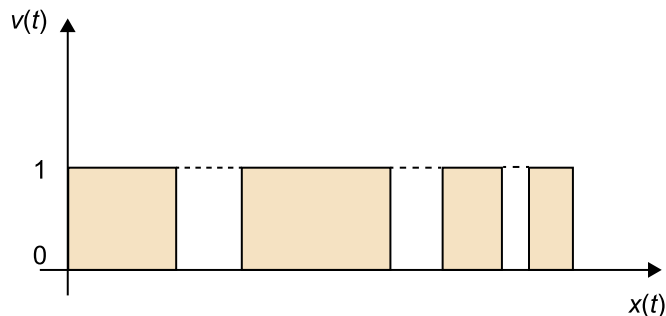
En què,

- k és una constant.
- A és una constant.
- ω es correspon amb la pulsació ($\omega = 2\pi f$, en què f és la freqüència de la sinusoide).
- t representa la dependència temporal.

2) Els **senyals digitals** poden emmagatzemar informació tant digital com analògica en els paràmetres que determinen l'aspecte del senyal:

- Informació en el nivell, amb informació digital i on el senyal haurà de contenir tants nivells com els que es vulguin distingir en la variable original. Si dibuixem un senyal binari, la informació emmagatzemada només podrà tenir dos possibles valors, com podem veure en la figura 12.

Figura 12. Senyal digital de dos nivells (binari)



- En la seva freqüència. Seria un cas particular del senyal analògic però substituint la sinusoide per una ona quadrada com la de la figura 12.
- En la seva fase, similar al cas del senyal analògic.
- La durada dels polsos o cicle de treball del senyal.

Quan un senyal o variable conté factors que en dificulten la lectura diem que *estan contaminats* o que *tenen soroll*; per tant, variables no volgudes i de difícil control.

Si classifiquem els senyals des del punt de vista del **soroll**, tenim:

- **Senyals deterministes:** tenim un senyal pur conegut amb la informació que ens interessa (figura 13).
- **Senyals aleatoris:** tipus de senyal amb soroll aleatori afegit al de la informació que ens interessa (figura 14).

Figura 13. Senyal determinista

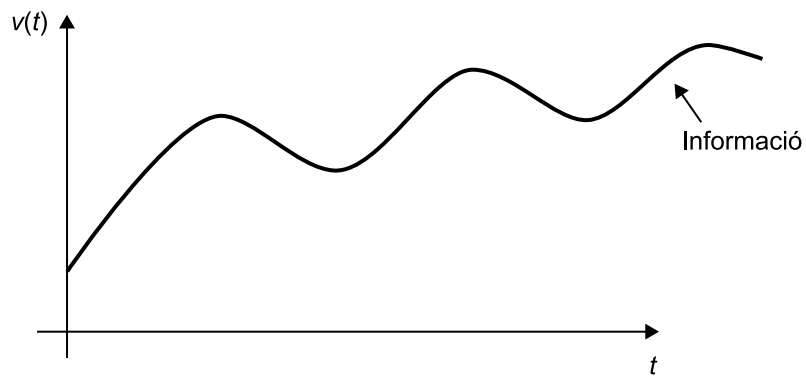
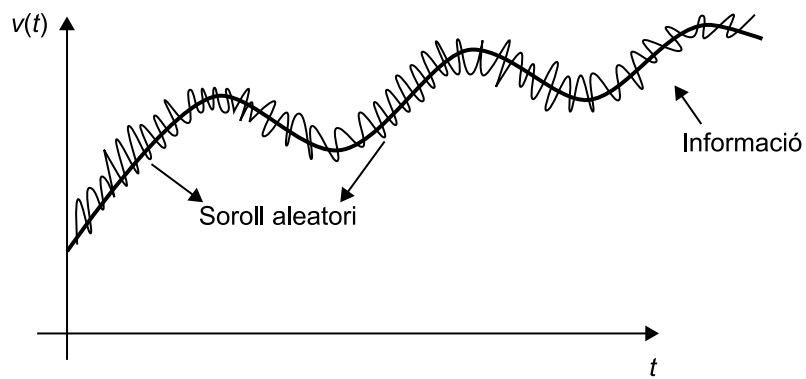


Figura 14. Senyal aleatori



En realitat, no hi ha senyals estrictament deterministes, atès que tots els senyals tenen un cert component d'aleatorietat.

No obstant això, quan el nivell de soroll és baix respecte al senyal que conté la informació que ens interessa, considerem el senyal determinista.

3. Característica estàtica

En línies generals, el comportament d'un instrument de mesura es pot definir mitjançant la seva funció de transferència o la relació que hi ha entre els valors d'entrada i de sortida.

Aquesta funció de transferència ens indica tant el comportament **estàtic** com el **dinàmic**.

El **comportament estàtic** correspon a la relació entre l'entrada i la sortida quan el valor d'entrada és constant o ha passat prou temps perquè la sortida hagi arribat al règim permanent o valor final.

Davant d'un valor variable de l'entrada, i fins que la sortida arriba al valor final, el **comportament dinàmic** analitza l'evolució del sistema o sensor avaluats.

En aquest apartat ens referirem exclusivament a les característiques estàtiques.

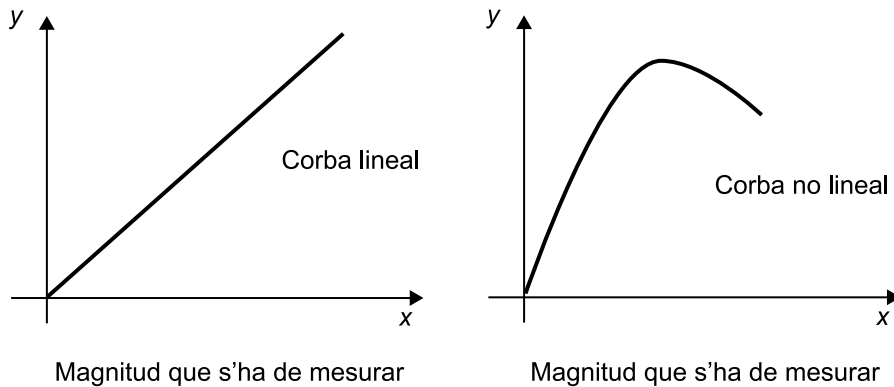
3.1. La corba de calibratge

La **corba de calibratge** o **funció estàtica de transferència** és la relació entre l'entrada i la sortida d'un sistema en règim estàtic i, per ser definida adequadament, cal especificar-ne la forma i els límits.

Pel que fa a la **forma**, molts dels sensors de més interès es poden aproximar a una línia recta, per la qual cosa la corba de calibratge es pot definir mitjançant dos punts de la corba o bé un sol punt i el pendent de la corba.

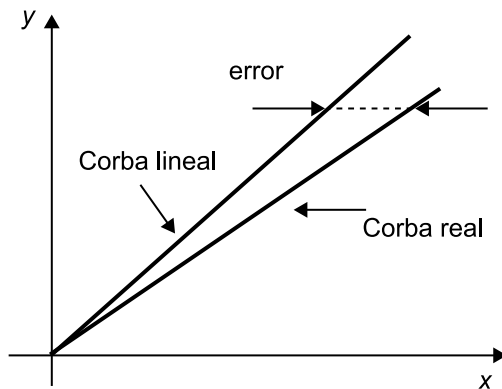
En la figura 15 podem veure exemples de corbes de calibratge, corba lineal i no lineal.

Figura 15. Corba lineal i corba no lineal



En el dibuix de les corbes de la figura 15 s'acostuma a parlar de l'error comès. Com veiem en la figura 16, es tracta de l'error existent en la diferència entre la corba real i la corba linealitzada.

Figura 16. Corba lineal i corba real



Observem que no són iguals i per tant tenim un error comès en la mesura.

La **corba linealitzada** es defineix segons els tres termes següents:

a) Error de linealitat o no-linealitat: màxima desviació de la corba de calibratge respecte a la línia recta per a la qual s'ha aproximat, expressada en tant per cent (%).

b) Sensibilitat: pendent de la corba de calibratge. Per als casos en els quals la corba de calibratge no és lineal, la sensibilitat no resulta suficient per a definir-la i cal algun paràmetre addicional, com ara:

- La **saturació** o el nivell d'entrada a partir del qual la sensibilitat disminueix d'una manera significativa.
- La **resolució** o l'increment mínim de la variable d'entrada perquè la sortida experimenti un canvi mesurable.
- La **zona morta** o regió de la corba de calibratge que presenta una sensibilitat nul·la.

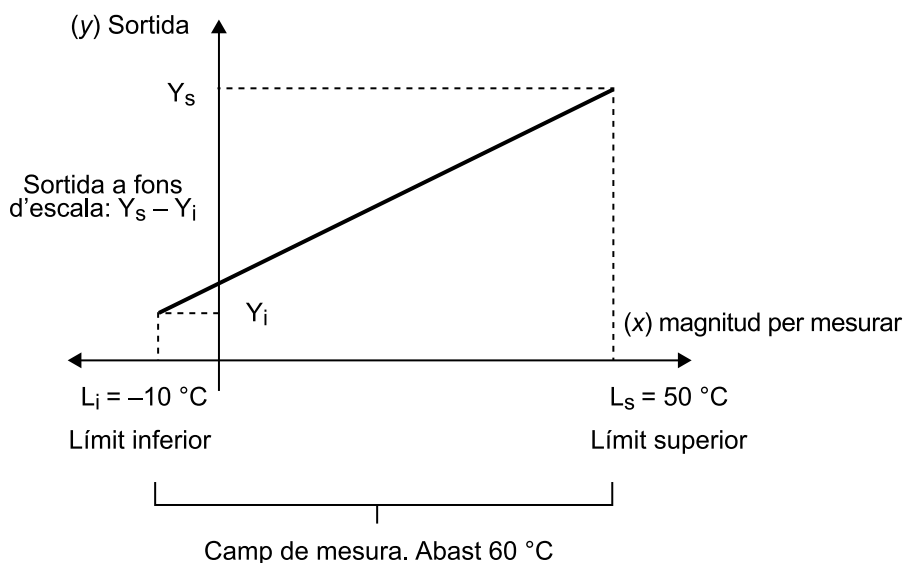
- La **deriva** o variació d'algun aspecte de la corba de calibratge respecte del temps o d'algun paràmetre ambiental (humitat, pressió atmosfèrica, temperatura, etc., sempre que aquests paràmetres no siguin objecte de la mateixa mesura).

c) **Histèresi**: és la diferència en la mesura depenent del sentit en el qual s'hagi mesurat. Per exemple, suposem que ens trobem en un entorn on la temperatura objectiva és de 15 °C i disposem d'un termòmetre que inicialment marcava 0 °C i després de fer la mesura en marca 14. Si ara fem la mateixa mesura amb el mateix termòmetre, però que ara marcava inicialment 30 °C, al final de la mesura ens en marca 16. En aquest cas, la histèresi seria de 2 °C o d'un 7 % aproximadament, mesurada en percentatge.

Pel que fa als **límits** de la corba de calibratge especificuem els tres paràmetres següents:

- **Camp de mesura**, o conjunt de valors entre els quals efectuarem el mesurament, delimitats per un valor superior i un valor inferior. Per exemple, un termòmetre dissenyat per a mesurar entre -10 °C i 50 °C tindria un camp de mesura de -10 °C/50 °C.
- **Abast o fons d'escala**, que és la diferència entre els límits superior i inferior de mesura. De l'exemple del termòmetre anterior tindríem que l'abast o fons d'escala és de 60 °C.
- **Sortida a fons d'escala** o diferència entre les sortides pels extrems del camp de mesura. De l'exemple del termòmetre, podem veure la representació de la sortida a fons d'escala en la figura 17.

Figura 17. Paràmetres sobre els límits de la corba de calibratge



3.2. Calibratge

Les no-idealitats dels circuits electrònics i les toleràncies dels seus components provoquen que dos aparells de mesura aparentment idèntics no tinguin la mateixa corba de calibratge. D'altra banda, la seva corba de calibratge varia amb el temps i el grau d'utilització dels aparells de mesura.

El **calibratge** pretén establir, amb la màxima exactitud possible, la correspondència entre els valors obtinguts amb un instrument de mesura i els valors de la magnitud que mesura.

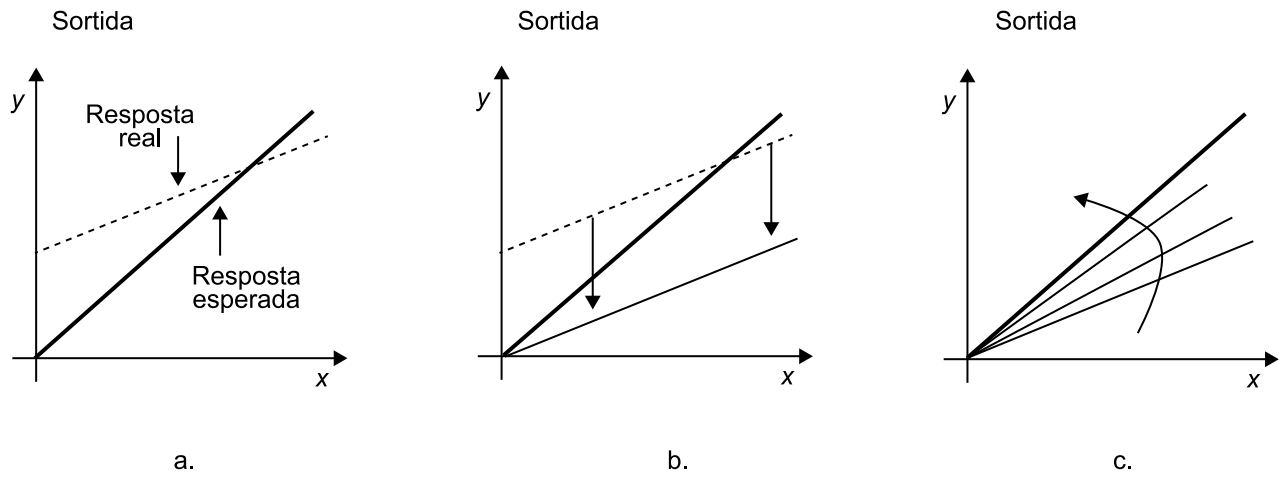
Malgrat tot, en qualsevol procés de calibratge hi ha un problema que no podem obviar. Per a calibrar amb precisió un equip de mesura necessitem un altre equip de referència que presenti una exactitud més gran i més fiable que el primer que pretenem calibrar, o bé disposar de patrons igualment solvents.

De vegades, és fàcil que un usuari final determini un punt de calibratge (per exemple, el zero en una balança domèstica de bany), però la majoria de les vegades no resulta senzill calibrar altres punts i aquest calibratge només es troba a l'abast de grans empreses que disposen de laboratoris habilitats per a dur-lo a terme.

Els mètodes més senzills de calibratge són:

- **El calibratge a un punt**, que consisteix a actuar sobre el sistema de mesura de tal manera que la sortida per aquell punt sigui tan precisa com sigui possible. S'acostuma a efectuar sobre el valor zero de la variable d'entrada, atès que acostuma a ser un valor conegut com a vertader. En l'exemple esmentat anteriorment de la balança de bany domèstica, l'usuari actuaria sobre la roda de calibratge per indicar el zero en absència de pes.
- **Calibratge del zero i de la sensibilitat** o pendent de la corba de calibratge. Per a ajustar amb precisió una corba de calibratge lineal és necessari ajustar dos punts, o bé un punt i el pendent o sensibilitat. Per fer aquest ajust se segueix un procediment que consisteix a ajustar primer el nivell del zero (òfset) i tot seguit el pendent de la corba de calibratge o guany (sensibilitat del sistema). Podem veure aquest procediment en la figura 18.

Figura 18. Procediment de calibratge del zero i de la sensibilitat



A la figura (a), veiem la resposta real i l'esperada, amb la qual cosa amb el pas (b) s'ajusta el nivell del zero. A més, cal mesurar en un altre punt i ajustar el guany (c), de manera que en aquesta segona mesura la sortida sigui la que es vol.

4. Característica dinàmica

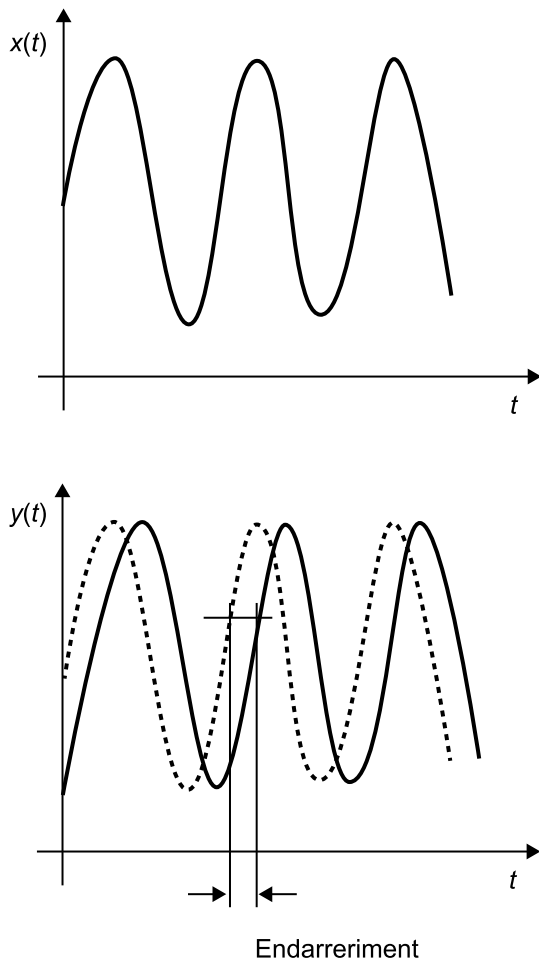
Tal com acabem de comentar, la funció de transferència és una expressió que relaciona les variables d'entrada i les respostes a aquestes entrades o excitacions.

Aquestes sortides o respostes no són immediates. Aquesta *no-immediatesa* introdueix un error momentani en la resposta del sistema, que es tradueix en una diferència entre el que esperem que es produeixi i el que es produeix realment.

En sistemes en els quals l'entrada varia constantment ens trobarem que la sortida també ho farà però amb un cert endarreriment. Aquests efectes introdueixen una desviació momentània o permanent que afecten la mesura i l'**obtenció del valor real** que es pretén mesurar, objectiu de la instrumentació electrònica.

La pregunta de si aquests efectes són o no són importants no té una resposta general, atès que depèn de cada cas. Si el valor per mesurar és la freqüència o l'amplitud, l'efecte de l'endarreriment no tindrà més importància, atès que es pot corregir fàcilment. Un exemple d'aquest cas és el que es presenta en la figura 19.

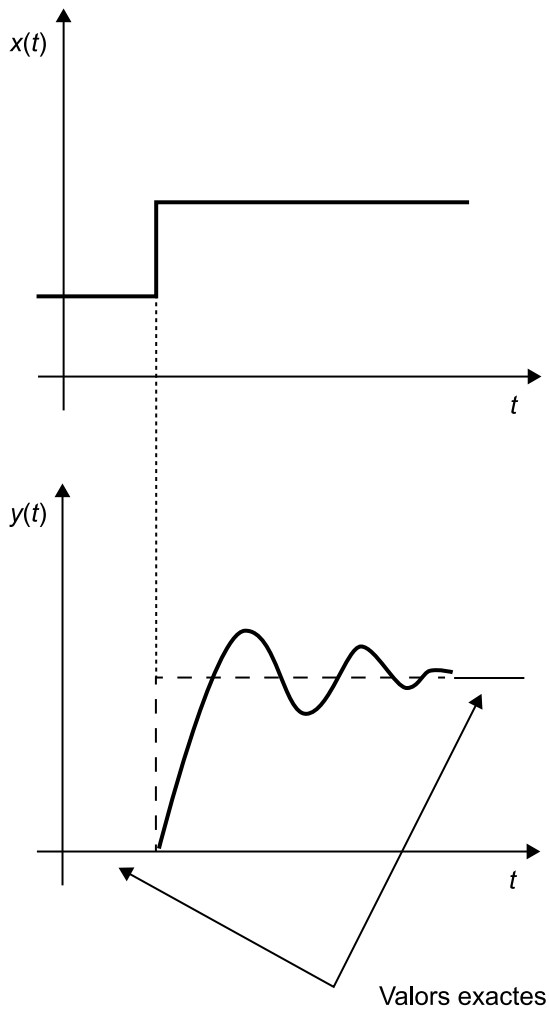
Figura 19. Error produït pel retard del sistema en generar la resposta



Si el que s'està mesurant és un valor instantani o la fase, per exemple, aleshores aquest efecte no es pot ignorar, atès que estem hi afegint un error sistemàtic.

En el cas de la figura 20 la importància de l'efecte està només centrada en el temps que cal esperar fins a obtenir el valor exacte o real després de cada canvi. El senyal es pot considerar correcte la resta del temps.

Figura 20. Efecte del període transitori en un sistema d'instrumentació



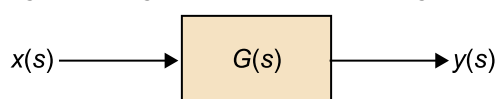
L'anàlisi matemàtica ens proporciona eines útils, basades en transformades de Laplace o de Fourier, per tal de poder modelar un sistema lineal mitjançant una funció de freqüència complexa s (equació (1)) o de freqüència $j\omega$ (equació (2)), com la denominada *funció de transferència* (figura 21).

Així tindriem:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1)$$

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (2)$$

Figura 21. Diagrama de blocs d'un sistema general



Aquest diagrama es caracteritza per la seva funció de transferència ($G(s)$) en l'espai transformat de Laplace.

La funció de transferència dependent de la freqüència $j\omega$ representa el comportament d'un sistema electrònic per a qualsevol freqüència del senyal d'entrada, i és una manera molt habitual de caracteritzar-ne el comportament.

4.1. Caracterització del comportament dinàmic

Es coneix com a *modelatge dinàmic* el fet d'obtenir la funció de transferència de qualsevol sistema electrònic.

Tenim dues maneres de fer aquest modelatge, teòricament i empíricament.

1) **Modelatge teòric:** consisteix a extreure relacions teòriques entre les variables del sistema, la seva linealització entorn d'un punt concret de funcionament i l'aplicació de la transformada de Fourier (o de Laplace) per a obtenir la funció de transferència. És una tasca feixuga i poc exacta.

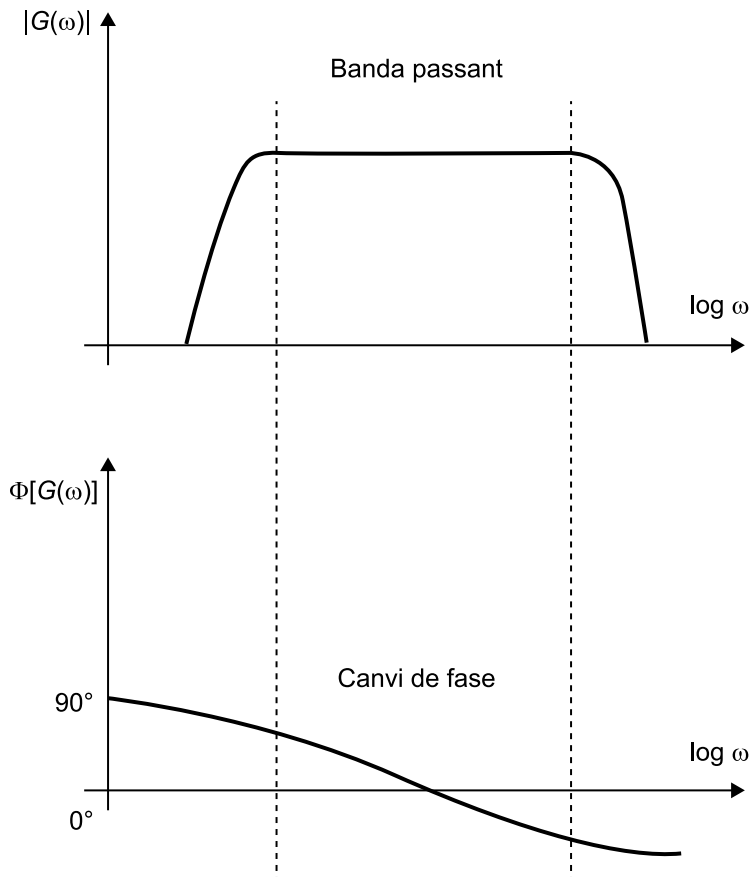
2) **Modelatge empíric:** consisteix a observar la sortida, i per tant bona part del comportament del sistema, a partir de sotmetre el sistema electrònic a un escombratge de freqüències d'entrada. Obtenim, aleshores, punt per punt i per a totes aquestes freqüències, la funció de transferència.

Del que es desprèn de cadascun dels mètodes enumerats anteriorment, cap d'aquests modelatges no resulta una tasca simple de fer.

Un cop obtinguda la funció de transferència mitjançant un dels dos mètodes anteriors, o fins i tot mitjançant una combinació dels dos, la podem representar gràficament amb un diagrama de Bode. El diagrama de Bode és una manera habitual de representació de la funció de transferència dels sistemes electrònics en funció de la pulsació ω .

A continuació, presentem un exemple de representació del diagrama de Bode en un cas habitual d'un sistema electrònic:

Figura 22. Diagrama de Bode



A dalt, el mòdul de la resposta freqüencial $|G(\omega)|$, i a baix la fase $\Phi(\omega)$

El que ens permet definir la resposta dinàmica en un sistema d'instrumentació és la caracterització de la funció de transferència en el **domini de la freqüència** i en el **domini del temps**.

4.1.1. Domini de la freqüència

En el **domini de la freqüència**, les principals característiques dinàmiques són:

- La distorsió harmònica total.
- L'amplada de banda.

El concepte d'*harmònic* prové del teorema de Fourier i defineix que una funció periòdica qualsevol es pot escriure mitjançant una suma de funcions sinusoidals. El primer harmònic, també denominat *senyal fonamental*, té el mateix període i freqüència que la funció original. La resta seran funcions sinusoidals, les freqüències de les quals són múltiples de la fonamental i denominades *harmòniques de la funció periòdica original*.

Quan l'addició d'altres senyals no presents a l'entrada del sistema originen un comportament no lineal, parlem de *distorsió harmònica*, que, quantificada mitjançant un paràmetre globalitzador, denominem **distorsió harmònica total**. El seu valor es calcula com el percentatge de potència interferent respecte de la potència original.

Els canvis d'aspecte del senyal de sortida respecte del senyal d'entrada també poden ser ocasionats per una **distorsió d'amplitud**, efecte que es deu a canvis en l'amplificació de cadascun dels components de sortida respecte de les d'entrada, i per una **distorsió de fase**, canvi introduït en la fase de cadascuna dels components de l'espectre d'entrada en travessar el sistema electrònic.

Considerant un comportament lineal dels sistemes electrònics (sense distorsió harmònica), podem dividir la resposta del sistema en dues zones:

- Una zona plana on tots els senyals són amplificats amb el mateix valor.
- Les zones amb una amplificació més petita.

La zona útil de treball, que coincideix amb el marge de freqüències que concentra la major part de la potència del senyal de manera que no és desitjable un canvi de fase, l'anomenem **amplada de banda útil**.

4.1.2. Domini del temps

La resposta dinàmica d'un sistema també es pot establir des del punt de vista dels conceptes referits directament al temps, considerant i definint tant els aspectes lineals com els no lineals.

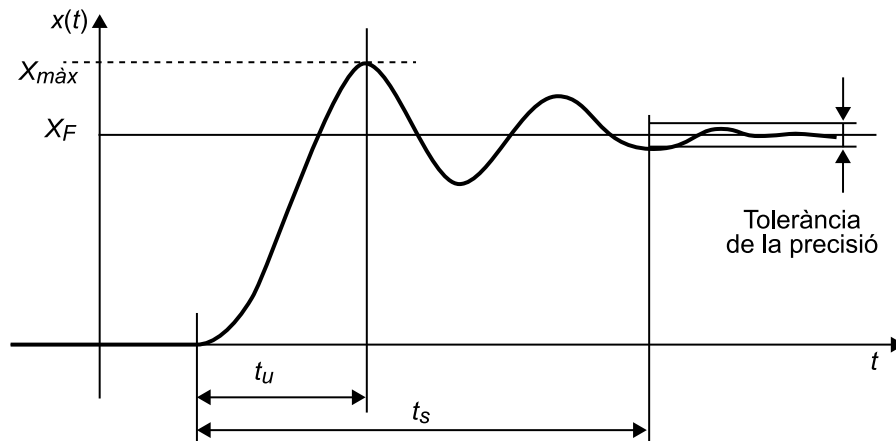
Des del punt de vista dinàmic, allò que ens resulta útil per a dir com es comporta un sistema és la rapidesa en la seva resposta i si presenta o no sobreoscil·lacions.

Aquesta "rapidesa" es refereix al **temps d'establiment**, t_s , definit com el temps que passa fins que el sistema electrònic proporciona una sortida dins del marge de tolerància definit per la seva precisió, és a dir, s'estabilitza el senyal de sortida a un valor concret.

La **sobreoscil·lació** d'un sistema, S_u , es defineix com un quocient entre el valor màxim al qual s'arriba en el temps t_u i el valor final en tant per 1 o en percentatge, segons es mostra en la figura 23 i en l'equació (3):

$$S_u(\%) = \left[\frac{X_{m\grave{a}x} - X_F}{X_F} \right] \cdot 100 \quad (3)$$

Figura 23. Representació gràfica dels paràmetres per a mesurar la sobreoscil·lació



Veiem, doncs, que tant el temps d'establiment com la sobreoscil·lació esdevenen les característiques principals en el domini del temps en un sistema d'instrumentació electrònica.

No acostumen a interessar valors alts de sobreoscil·lació, ja que poden posar en perill els sistemes electrònics per a valors excessius no tolerables del senyal.

En general, i com a resum, és preferible que els equips de mesura tinguin una bona velocitat de resposta amb temps d'establiment curts.

5. Errors i propagació d'errors

Un principi bàsic de la instrumentació electrònica és mesurar una magnitud amb el mínim error possible.

Vivim en un món d'aproximacions que ens fan cometre un cert grau d'errors als quals cal afegir l'envelliment dels aparells de mesura, el soroll i tot un seguit de variables incontrolades.

Una situació tan quotidiana com anar a comprar 300 grams de qualsevol producte alimentari al supermercat ens pot servir com a exemple. A nosaltres mateixos ens sembla suficient obtenir mitjançant la balança un pes aproximat del producte que volem comprar, sense buscar l'exactitud absoluta dels decimals.

També cal considerar que hi ha un grau d'incertesa, amb implicacions filosòfiques i físiques importantíssimes, que no ens interessin en aquest moment, tractades en el principi d'incertesa de Heisenberg, atès que no es fa possible fer una mesura d'una magnitud sense modificar en major o menor grau l'objecte de la mesura.

5.1. Error absolut i error relatiu

Tradicionalment, els errors s'han quantificat en termes d'**error absolut** i **error relatiu**. Les definicions més convencionals dels dos errors són les següents:

- **Error absolut:** diferència entre el valor mesurat i el valor exacte.
- **Error relatiu:** és el resultat de dividir l'error absolut entre el valor exacte.

Quan després de repetides mesures els errors es mantenen constants en signe i error absolut, els anomenem **errors sistemàtics** i, per tant, corregibles.

Si un cop corregits es continuen manifestant més errors, parlarem d'**errors aleatoris**.

Una millor quantificació de l'error, de tal manera que en puguem detectar l'origen, és el definit segons normes UNE 82009, referides a veracitat, precisió i exactitud.

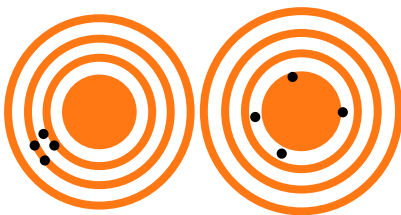
1) **Veracitat:** a partir d'un valor vertader, o acceptat com a valor de referència (per exemple, el patró de metre), la veracitat serà el grau de concordança entre aquest valor de referència i el valor mitjà obtingut d'una gran sèrie de mesures efectuades. La veracitat només la podem calcular si disposem d'una referència millor, ja que s'obté de la comparació directa entre el valor mitjà de les mesures fetes i aquesta referència.

2) **Precisió:** és el grau de concordança entre els resultats. Fixem-nos que precisió no implica veracitat. A partir d'un nombre elevat de mesures efectuades, els valors obtinguts poden ser molt similars entre ells, però diferents respecte del valor de referència o vertader. Normalment, la precisió d'un valor es quantifica mitjançant càlculs estadístics com la desviació estàndard, la variància o l'interval de confiança.

3) **Exactitud:** per a relacionar veracitat i precisió, és a dir, la concordança entre els resultats obtinguts entre ells i el valor vertader. Veiem, doncs, que tot i que s'acostuma a associar precisió amb exactitud, les diferències poden ser sensiblement diferents. Els fabricants acostumen a indicar en percentatge l'exactitud dels aparells de mesura. En realitat, aquest percentatge ens està donant el marge d'error de la major part de totes les lectures en termes estadístics.

En la figura 24 es mostra la relació entre precisió i exactitud: mentre que a l'esquerra tenim alta precisió (som capaços d'obtenir mesures molt similars entre elles en diferents realitzacions) però poca exactitud (som lluny del valor real que representem com el centre de la diana), a la dreta tenim valors molt més exactes (propers al valor real) però amb una precisió molt baixa (els valors són molt diferents entre ells).

Figura 24. Relació entre precisió i exactitud



A l'esquerra, alta precisió però baixa exactitud. A la dreta, alta exactitud però baixa precisió. En els dos casos, el valor real de la mesura el representem amb el centre de la diana.

La manera com es poden quantificar aquests conceptes és mitjançant el càlcul de la **repetibilitat** i de la **reproductibilitat** de les mesures, que es defineixen d'aquesta manera:

- **Repetibilitat:** és la variació de les mesures obtingudes amb un instrument de mesura, utilitzat diverses vegades per un avaluador mentre mesura la mateixa característica. Fixem-nos que ens mesura la precisió d'un instrument.

- **Reproductibilitat:** és la variació de la mitjana de les mesures efectuades per diferents avaluadors utilitzant el mateix instrument per a mesurar una característica. Fixem-nos que ara mesurem el mateix però sense tenir en compte l'operador, el lloc, l'instant de temps, etc.

5.2. Propagació d'errors

En el camp de la instrumentació electrònica, en què els sistemes de mesura són formats per subsistemes que presenten errors, és molt important conèixer la propagació de l'error en tot el procés de càlcul de la mesura.

Càlcul del valor d'unes resistències

Veiem un exemple en el càlcul del valor d'unes resistències. Si suposem que tenim dues resistències en sèrie, una de $750 \Omega \pm 10\%$ i l'altra de $2.000 \Omega \pm 5\%$, quin serà el valor de la resistència final?

Podem suposar que l'error equivalent màxim i mínim serà:

$$R_{\max} = (750 + 0,1 \cdot 750) + (2.000 + 0,05 \cdot 2.000) = 2.750 + 175\Omega \quad (4)$$

$$R_{\min} = (750 - 0,1 \cdot 750) + (2.000 - 0,05 \cdot 2.000) = 2.750 - 175\Omega \quad (5)$$

Per tant, la resistència equivalent seria $2.750 \pm 175 \Omega$ o el que és el mateix en termes estadístics:

$$R_{\text{equivalent}} = 2.750\Omega \pm 6,36\% \quad (6)$$

No obstant això, si continuem parlant en termes estadístics, és molt poc probable que ambdues resistències presentin els seus valors màxims o mínims simultàniament, situació en la qual s'estaria sobreestimant l'error.

Per tant, quan sumem dues variables amb error, el resultat s'hauria de donar en termes estadístics.

En línies generals, una aproximació vàlida, tenint en compte la distribució normal de l'error relatiu, és:

$$(a + b) \pm e_R \quad (7)$$

En què:

a i b són els valors sense error i e_R és:

$$e_R = \sqrt{(K_1 a)^2 + (K_2 b)^2} \quad (8)$$

En el nostre exemple:

$$(750 + 2.000) \pm \sqrt{(750 \cdot 0,1)^2 + (2.000 \cdot 0,05)^2} = 2.750 \pm 125\Omega \quad (9)$$

És a dir:

$$2.750 \pm 4,54\% \quad (10)$$

Per a la resta d'operacions, resta, multiplicació i quocient, el càlcul de la **propagació de l'error** es resumeix en la taula 2.

Taula 2. Càlcul de la propagació de l'error per a les operacions elementals

Suma	$(a + b) \pm \sqrt{(K_1 a)^2 + (K_2 b)^2}$
Resta	$(a - b) \pm \sqrt{(K_1 a)^2 + (K_2 b)^2}$
Multiplicació	$ab \pm ab\sqrt{K_1^2 + K_2^2}$
Quocient	$\left(\frac{a}{b}\right) \pm \left(\frac{a}{b}\right)\sqrt{K_1^2 + K_2^2}$

En què a i b són els valors sense error i K_1 i K_2 són les toleràncies en %. Fixem-nos que les operacions de resta i quocient són les que arrosseguen una propagació més gran de l'error relatiu, ja que en els dos casos el valor sense error resultant de l'operació és més petit que els valors sense error originals.

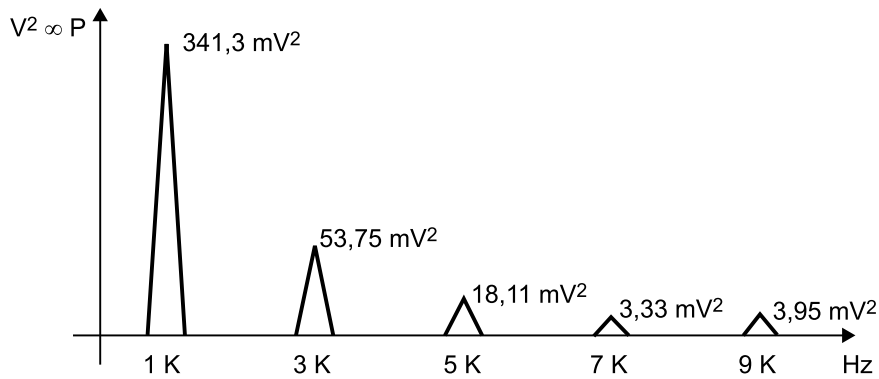
Resum

En aquest mòdul ens hem centrat en la descripció d'un sistema d'instrumentació, especialment en les aplicacions de mesura i control. Hem presentat els senyals amb els quals aquests sistemes treballen, i n'hem vist les característiques principals: les estàtiques i les dinàmiques. Finalment, hem vist els conceptes d'*errors* i la seva propagació en els sistemes de mesura.

Exercicis d'autoavaluació

1. Suposem que tenim l'espectre del senyal de sortida d'un amplificador que es mostra en la figura 25, en el qual podem observar la freqüència original (1 kHz) i els harmònics generats en múltiples senars de la fonamental. Calculeu el valor de distorsió harmònica total.

Figura 25. Espectre del senyal de sortida d'un amplificador



2. Volem comprovar el funcionament d'una balança de cuina capaç de mesurar pesos entre 0 i 5 kg. Per això, duem a terme un conjunt de mesures mitjançant pesos coneguts (patró) i n'anotem el resultat, que podeu observar en la taula següent:

Taula 3. Lectura de pesos

Patró	100 g	500 g	1 kg	2 kg	3 kg	4 kg	5 kg
Lectura	0,102	0,498	1,003	1,985	3,011	4,014	4,989

Si considerem que la incertesa del patró utilitzat és inferior a 1 g, determineu:

- Els errors absoluts de la mesura.
- Els errors relatius en tant per cent.

3. Tres laboratoris diferents duen a terme una sèrie de mesures amb un mateix instrument, utilitzant un patró de valor 100 unitats de mesura. Els resultats obtinguts es mostren en la taula següent.

Determineu quina és la repetibilitat i la reproductibilitat de l'instrument. Feu servir com a criteri la desviació estàndard. Comenteu raonadament els resultats obtinguts.

Taula 4. Valors resultants de la mesura

Mesura	1	2	3	4	5	6	7
Lab 1	115	114	115	116	113	117	119
Lab 2	92	99	105	100	98	96	102
Lab 3	110	109	111	115	113	104	106

Solucionari

Exercicis d'autoavaluació

1. Calculem la distorsió harmònica total com el percentatge de potència interferent sobre el total de la potència del senyal original. Per tant, tindrem:

$$THD = \frac{53,75 + 18,11 + 3,33 + 3,95}{341,3} \times 100 \approx 23,19\% \quad (11)$$

2. a) L'error absolut és la diferència entre el valor real i el valor mesurat, en valor absolut. Com que els patrons tenen una incertesa més petita que la resolució de la bàscula (1 g), podem considerar que els pesos dels patrons són valors reals. Per tant, tindrem:

Taula 5. Càlcul de l'error absolut

Patró	100 g	500 g	1 kg	2 kg	3 kg	4 kg	5 kg
Lectura	0,102	0,498	1,003	1,985	3,011	4,014	4,989
Error absolut [g]	2	2	3	15	11	14	11

b) L'error relatiu es calcula com el quocient entre l'error absolut i el valor vertader. Per tant, tindrem:

Taula 6. Càlcul de l'error relatiu

Patró	100 g	500 g	1 kg	2 kg	3 kg	4 kg	5 kg
Lectura	0,102	0,498	1,003	1,985	3,011	4,014	4,989
Error absolut [g]	2	2	3	15	11	14	11
Error relatiu [%]	2	0,4	0,3	0,75	0,36	0,35	0,22

3. La repetibilitat fa referència a un sol instrument, considerant que les mesures les ha efectuat un mateix operador, en les mateixes condicions i en un interval curt en el temps.

La reproductibilitat del tipus d'instrument fa referència al conjunt de totes les proves (les dutes a terme per tots els laboratoris), i per tant sense tenir en compte quin operador ha efectuat les mesures ni en quin instant de temps.

Atès que ens indiquen que utilitzem com a criteri la desviació estàndard, calcularem aquest paràmetre, juntament amb la mitjana de les mesures:

Taula 7. Càlcul de la mitjana i desviació estàndard

Lab 1	Mitjana = 115,6	Desviació estàndard = 1,99
Lab 2	Mitjana = 98,9	Desviació estàndard = 4,18
Lab 3	Mitjana = 109,7	Desviació estàndard = 3,82
Conjunt	Mitjana = 108,1	Desviació estàndard = 7,82

Si ens fixem en un sol instrument (laboratori), veurem que l'instrument que dona resultats més propers a la realitat (100) és el del laboratori 2, ja que presenta una mitjana de 98,9. Ara bé, també és el que presenta una desviació estàndard més elevada, cosa que indica que té una repetibilitat dolenta. En canvi, l'instrument del laboratori 1 és el que té una repetibilitat millor perquè la seva desviació estàndard és la més petita dels tres. En aquest cas, però, també tenim un problema: el seu valor mitjà és el més allunyat del valor real (115,6 davant de 100).

En termes qualitatius, diríem que l'instrument més veraç és el del laboratori 2 i el més precís és el del laboratori 1.

Si ens fixem en el conjunt de totes les mesures, observarem que la desviació estàndard és elevada, i per tant la reproductibilitat és baixa, ja que l'error que podem cometre és proper a 8 unitats.

Glossari

abast *m* sin. fons d'escala.

actuador *m* Elements que executen les ordres o els senyals de comandament de l'operador des del sistema de control.

amplada de banda d'un sistema *f* Conjunt de freqüències compreses entre una de tall inferior i una de tall superior, caracteritzades perquè l'error de la variable de sortida és dins d'una banda especificada.

camp de mesura *m* Conjunt de valors entre els quals efectuarem la mesura.

captador *m* sin. sensor.

control *m* Govern d'un sistema per mitjà d'un altre sistema.

controlador *m* Dispositiu especialitzat a controlar equips electrònics.

convertidor A/D *m* Dispositiu que converteix un senyal analògic i continu en el temps en un senyal digital i discret en el temps.

corba de calibratge *f* Relació entre l'entrada i la sortida d'un sistema en règim estàtic.

decibel *m* Unitat logarítmica de mesura que expressa la magnitud d'una quantitat física (habitualment la potència) respecte a un nivell de referència.

deriva *f* Variació d'algun aspecte de la corba de calibratge respecte del temps o d'algun paràmetre ambiental, sempre que aquests paràmetres no siguin objecte de la mesura.

error *m* Valor que acota la incertesa d'un sistema determinat.

error absolut *m* Diferència entre el valor mesurat i el valor exacte.

error relatiu *m* Quocient entre l'error absolut i el valor exacte, en valor absolut.

exactitud *f* Capacitat d'un instrument de donar una lectura propera al valor vertader de la magnitud a l'entrada.

factor de soroll *m* Relació entre la potència de soroll a la sortida del quadripol i la que hi hauria si el quadripol no fos sorollós. Aquest paràmetre ens indica la quantitat de soroll que genera un dispositiu.
sigla F

fons d'escala *m* Diferència entre els límits superior i inferior del camp de mesura.
sin. abast

fons d'escala de sortida *m* Diferència entre el màxim i el mínim de la sortida d'un sistema.

instrumentació electrònica *f* branca de l'electrònica que s'encarrega del disseny i maneig dels aparells electrònics i elèctrics per al seu ús en mesuraments.

pertorbació *f* Senyal que intervé negativament en la sortida del sistema.

precisió *f* Grau de concordança entre els resultats d'una mesura.

relació senyal-soroll *f* Quocient entre la potència de senyal i la de soroll en un punt d'un sistema determinat. Normalment s'expressa en decibels.

resolució *f* Increment mínim de la variable d'entrada perquè la sortida experimenti un canvi mesurable.

saturació *f* Nivell d'entrada a partir del qual la sensibilitat disminueix de manera significativa.

sensibilitat *f* Pendent de la corba de calibratge.

sensor *m* Dispositiu capaç de mesurar magnituds físiques o químiques, anomenades *variables d'instrumentació*, i de transformar-les en variables elèctriques.
sin. captador

senyal *m* Variació d'una magnitud física, generalment corrent elèctric, que s'utilitza per a transmetre informació o tensió.

senyal aleatori *m* Senyal amb soroll aleatori afegit al de la informació que ens interessa.

senyal analògic *m* Senyal definit per una variable analògica.

senyal digital *m* Senyal definit per una variable digital.

senyal determinista *m* Senyal pur conegut amb la informació que ens interessa.

soroll *m* Qualsevol senyal que ens altera el nostre senyal d'interès.

sortida a fons d'escala *f* Diferència entre les sortides pels extrems del camp de mesura.

temps d'establiment *m* Temps que tarda el sistema a proporcionar un valor de sortida dins d'una banda d'error determinada entorn del valor final, quan a l'entrada s'hi ha aplicat un canvi en forma de graó.

variable analògica *f* Variable que dins d'un interval determinat pot tenir qualsevol valor.

variable digital *f* Variable que dins d'un interval pot tenir valors d'un conjunt finit. En el cas del sistema binari, tindriem només dos valors: 0 i 1.

veracitat *f* Grau de concordança entre el valor de referència i el valor mitjà obtingut d'una sèrie de mesures efectuades.

zona morta *f* Regió de la corba de calibratge que presenta una sensibilitat nul·la.

Bibliografia

Chen, C. T. (1993). *Analog and digital control system design: Transfer-function, state-space and algebraic methods*. Orlando, Fl.: Saunders College Publishing Electrical Engineering, Oxford University Press Inc.

Riu, P. J.; Rosell, J.; Ramos, J. (1995). *Sistemas de instrumentación*. Barcelona: Edicions UPC.

Webster, J. G. (1999). "Section I: Measurement characteristics". A: *Measurement, instrumentation and sensors handbook CRCnetBASE 1999*. Boca Raton, Fl.: CRC Press.