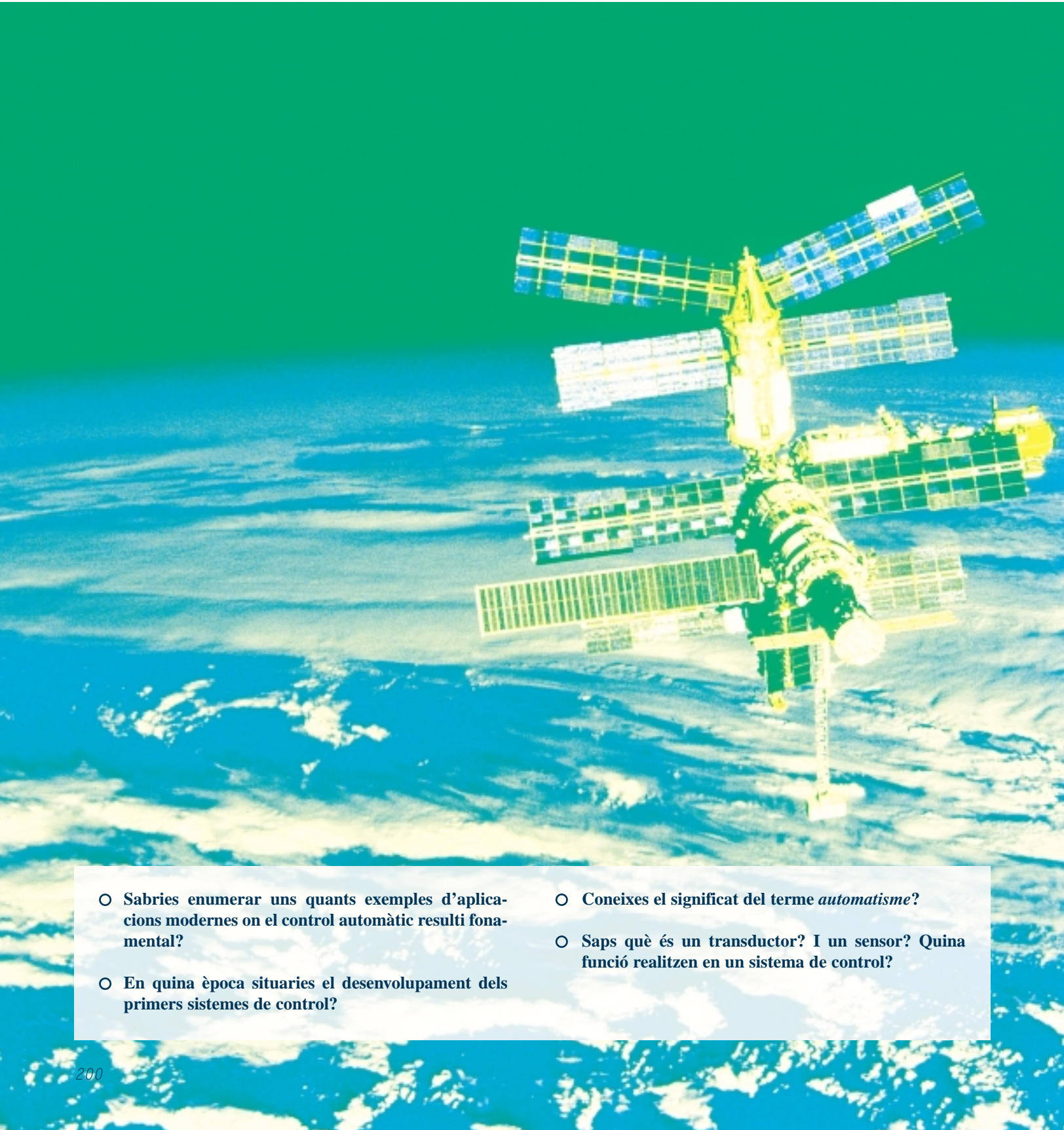


# unitat 9 Sistemes automàtics i de control



- Sabries enumerar uns quants exemples d'aplicacions modernes on el control automàtic resulti fonamental?
- En quina època situaries el desenvolupament dels primers sistemes de control?
- Coneixes el significat del terme *automatisme*?
- Saps què és un transductor? I un sensor? Quina funció realitzen en un sistema de control?

# 9.1. Introducció a la tecnologia de control

**Automatitzar** vol dir *reduir al mínim la participació humana en l'accionament de les màquines o aparells o en la realització dels processos*. Existeixen màquines i processos *automàtics*, en els quals la intervenció de les persones es limita només a la seva posada en marxa, i altres de *semiautomàtics*, on cal la intervenció humana en alguna de les accions que fa la màquina o en alguna de les fases del procés. La *tecnologia de control* es dedica a tots aquests aspectes.

El mot automatització parteix de l'anglès *automation*, que es va començar a emprar l'any 1946 a la companyia General Motors de Detroit, en les seves cadenes de muntatge d'automòbils.

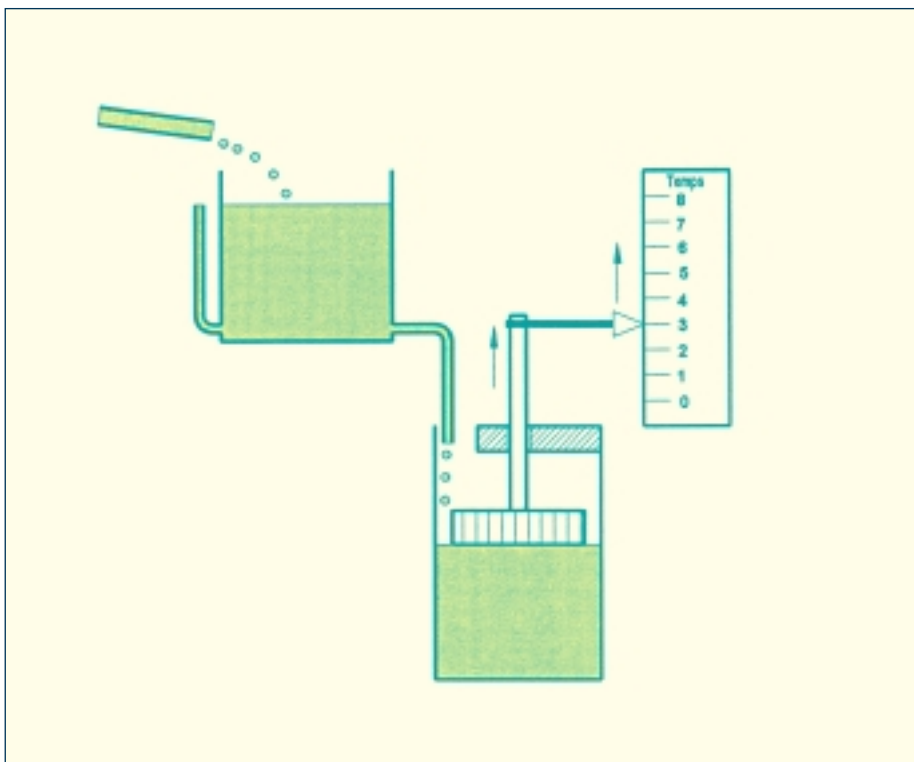
*La tecnologia de control abasta tots els procediments i sistemes que permeten d'automatitzar màquines, aparells i processos de fabricació.*

## Els orígens de l'automatització

Encara que ens sembli que els aparells i ginyes de funcionament automàtic són molt recents i responen a un èxit de la tecnologia actual basada en l'electrònica i la informàtica, la creació d'aparells de funcionament més o menys automàtic és tan vella com l'existència de l'ésser humà. Ja els pobles primitius, en l'inhòspit medi on vivien, van haver d'idear ginyes **automàtics**, en un primer moment aplicats a la caça, com ara l'arc, les trampes amb forats a terra o els paranys amb lloses i pedres per capturar animals, i, més endavant, per fer menys feixugues les tasques quotidianes.

Les civilitzacions antigues també deixaren la seva empremta en aquest procés. A l'Egipte dels faraons, per exemple, es disposava de complexos sistemes **automàtics** aplicats a l'arquitectura, basats en l'obertura i buidatge de dipòsits de sorra, que possibilitaven, entre d'altres coses, el plantament d'obeliscos de proporcions gegantines.

Clepsidra.



Però fou a l'època clàssica, a recer de la tecnologia i la ciència hel·lenística, que van proliferar tota una munió d'invents que podem considerar automàtics. Un exemple n'és la **clepsidra** o temporitzador d'aigua, que consistia en un recipient esfèric amb un forat de sortida molt petit que deixava caure l'aigua molt lentament i s'utilitzava per mesurar el temps en les intervencions dels oradors. Un cas més impactant va ser el que va idear **Heró d'Alexandria**, que, mitjançant un complex sistema de politges i contrapesos, obria automàticament les portes d'un temple.

Cap als segles XVII i XVIII el desenvolupament de les tècniques mecàniques va generar l'aparició dels anomenats *autòmats*, els quals eren figures humanes o animals que es movien i generaven so automàticament. Un dels més famosos va ser l'ànec de **Jacques de Vaucanson**.





Teler de Jacquard.

## La necessitat d'automatitzar

Un impuls decidit cap a l'automatització neix amb la necessitat de produir amb major eficiència i costos menors; en aquest sentit, és a partir de la primera revolució industrial quan els processos d'automatització adquireixen una aplicació pràctica i rendible.

En aquesta línia, un invent que va marcar una fita important va ser el *regulador centrífug de boles*, que servia per controlar l'entrada de vapor al cilindre de la màquina de vapor que va idear **James Watt** l'any 1788 i que ja vam estudiar en el crèdit anterior. El regulador va suposar un avenç essencial en la generalització de la màquina de vapor.

El *teler programable* de **Joseph Marie Jacquard**, enginy realitzat l'any 1801, es pot considerar l'autèntic precursor dels ordinadors moderns. El sistema de *programació* es basava en unes cartolines perforades que contenien la informació sobre el dibuix que havia de tenir el teixit. En funció de si passava o no l'agulla d'un color determinat per la cartolina perforada, s'anaven teixint els dibuixos de colors.

De manera similar, **Hermann Hollerith** va desenvolupar un sistema de targetes perforades per a la recollida d'informació del cens de població dels Estats Units. El sistema consistia a recollir les dades personals en targetes que eren perforades; posteriorment, una màquina de recompte, a través d'un sistema *automàtic*, en treia les dades estadístiques. El sistema va funcionar amb èxit atès que l'any 1890 va aconseguir de realitzar el cens d'una població de 62 milions de persones tan sols en 4 setmanes, mentre que l'anterior, realitzat manualment a partir de l'any 1880 per a 50 milions de persones, va durar set anys. Per al recompte manual s'hi van dedicar 500 persones, i per a l'automàtic només 43 màquines de Hollerith, amb menys personal.

L'any 1822 **Samuel Morse** presentà el telègraf.



## L'impuls definitiu cap a l'automatització

Fins a mitjan segle XIX la major part d'aparells automàtics es van construir bàsicament amb tecnologia mecànica; a partir de llavors l'electricitat i l'electromagnetisme es van començar a introduir de manera efectiva, i és en ple segle XX que les tecnologies elèctrica, electrònica i microelectrònica esdevenen hegemòniques i insubstituïbles per a aquestes funcions.

Al llarg del segle XIX es produeix una innombrable quantitat d'invents que aplanaran el camí cap a l'automatització de processos. Entre els més assenyalats cal destacar la invenció del *relé electromagnètic* per a la seva aplicació a la telegrafia, obra de **Samuel Morse** i **William Fardeley**, que van arribar a la mateixa conclusió, simultàniament i per separat, el 1844.

Ja en ple segle XX es desenvolupa l'electrònica amb l'invent del transistor als *laboratoris Bell* el 1948, i del circuit integrat o *xip* l'any 1958, com a resultat de les investigacions de *Texas Instruments*; d'aquesta manera s'aconsegueix introduir en una superfície molt reduïda milers de transistors i resistències.



Circuit electrònic d'un microprocessador.

Ja en la dècada dels setanta, el desenvolupament dels *microprocessadors* és l'element clau de molts circuits d'automatització. El 1971 la multinacional *Intel* va posar a punt el microprocessador 4004 amb 2 300 transistors, el qual podia executar 60 000 operacions per segon. Vint-i-cinc anys més tard, *Intel* ha comercialitzat el microprocessador *Pentium Pro*, no gaire més gran, que incorpora 5 milions de transistors i que té capacitat per executar 200 milions d'operacions per segon.

El microprocessador és el nucli de la major part dels automatismes programables i dels seus components. Aquest és el cas d'un aparell molt important en l'actualitat: l'*autòmat programable* o *PLC (Programmable Logic Controller)*. La seva funció és gestionar el control d'una màquina o d'una part i permet d'establir la seqüència de funcionament a partir d'un programa introduït externament.

L'últim gran exponent de l'automatització ha estat la **robòtica**. Aquesta tecnologia, resultat de la integració de diferents tecnologies com ara la mecànica, l'electricitat, l'electrònica, la informàtica i la sensòrica, està molt a prop de fer realitat una antiga aspiració amb molts components mítics: l'obtenció d'una màquina capaç de fer els mateixos moviments que l'ésser humà. La gran aplicació d'aquesta tecnologia, juntament amb la de les cèl·lules de fabricació flexible i de la tecnologia *CIM (Computer Integrated Manufacturing)*, que estudiarem més endavant, són avui predominants en el camp de l'automatització industrial.



La robòtica és el màxim exponent de la tecnologia digital. El mot *robòtica*, com a ciència dels robots, és encunyat per l'escriptor de ciència-ficció **Isaac Asimov** en el seu llibre *Jo, robot*, publicat l'any 1942.

## exercicis

1. Fes una relació d'aparells que coneguis i digues quins són d'accionament manual, semiautomàtic o automàtic. Justifica la teva resposta.
2. Fes una línia cronològica amb els fets i personatges que han sortit en el text.
3. Quina relació trobes entre el teler de Jacquard i un ordinador actual?
4. Quina valoració fas sobre els avantatges tècnics i econòmics de l'automatització i la seva repercussió social?

El concepte de *control* és extraordinàriament ampli: comprèn des del comandament d'una aixeta que regula el pas d'aigua en una canonada fins a la manipulació del robot d'una cadena de producció. La tecnologia de control es du a terme mitjançant els anomenats *sistemes de control*.



La sincronització perfecta del semàfors d'una gran ciutat és una de les múltiples aplicacions dels sistemes de control automàtic.

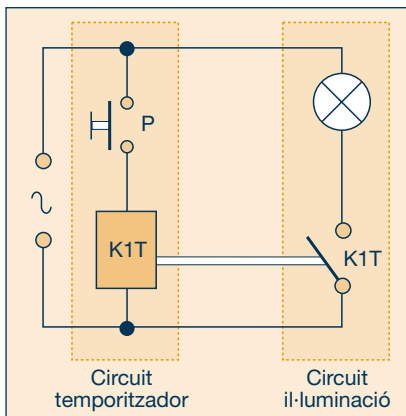
Entenem per **sistema de control** un conjunt d'elements que actuen coordinadament per aconseguir una acció de govern dins d'un procés, a través de la manipulació directa o indirecta de les magnituds que hi intervenen.

Si agafem l'exemple de l'aixeta d'aigua, veurem que el seu funcionament és molt senzill; mitjançant l'accionament manual podem regular el cabal d'aigua que desitgem tan sols girant més o menys l'aixeta: en aquest cas estarem parlant d'un **sistema de control manual**. Però també podríem automatitzar aquest procés substituint l'aixeta per un *pol-sador*, que, en prémer-lo, deixaria sortir l'aigua, per exemple, durant 20 segons; o per un *rellotge temporitzador*, que permeti d'obrir i tancar l'aigua en unes hores determinades. Aquests processos, també molt senzills, ja formen part dels *sistemes de control automàtics*, que estudiarem a partir d'ara.

En aquest sentit, podem afirmar que l'automatització d'un control no és més que un element extern afegit a una màquina o procés, que no altera les seves característiques de funcionament, però que, com veurem més endavant, els aporta unes millores en costos i qualitat gens menyspreables.

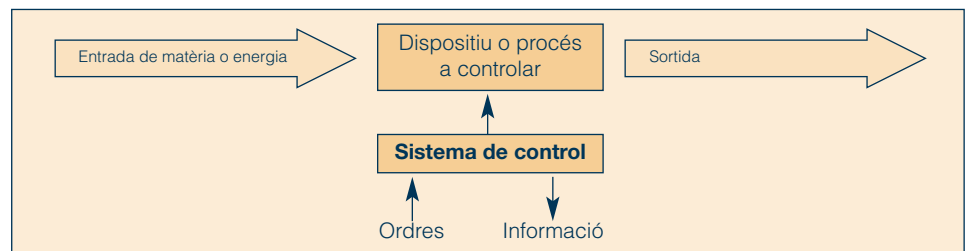
## Sistemes de control automàtic

Un **sistema de control automàtic** és un procés que té per objectiu aconseguir que una màquina o un procés realitzi les seves funcions amb una intervenció humana mínima.



En prémer el pulsador *P*, el temporitzador *K1T* s'activa, i es tanca el circuit d'il·luminació a través del contacte *K1T* comandat pel temporitzador. La bombeta s'encendrà durant un temps determinat, depenent del valor que haguem ajustat en el temporitzador. Quan ha transcorregut el temps programat, es desconnecta automàticament el circuit d'il·luminació. Aquesta aplicació simplifica a l'usuari el procés d'encesa i d'apagada d'un llum.

La intervenció humana consisteix a introduir les ordres de funcionament al **sistema de control** perquè executi de manera adequada les fases de treball. El sistema de control ha de presentar, en alguns casos, les informacions significatives de l'estat del procés a la persona encarregada de tenir-ne cura.



Posem com a exemple el funcionament d'un llum *temporitzat*, com ara el de l'escala d'un bloc de pisos. L'objectiu d'aquest automatisme és substituir l'operació d'apagar el llum, ja que l'acció d'encesa és la que es fa manualment i alhora la que posa en funcionament l'automatisme. El circuit bàsic d'il·luminació essencialment és el mateix que sense l'automatisme: connexió a la xarxa, unes bombetes i uns pulsadors, però en aquest cas el circuit és controlat per un dispositiu, el **temporitzador**, aparell capaç de connectar o desconnectar un circuit en funció del temps.



## Tecnologies cablades i programables

Les tecnologies emprades en els sistemes de control automàtic poden classificar-se en dos grans grups: tecnologies cablades i tecnologies programables.

La **tecnologia cablada** s'aplica a dispositius pneumàtics, hidràulics, elèctrics i electrònics. Es du a terme a partir d'unions físiques dels elements que constitueixen el sistema de control. La tecnologia cablada ha estat, i encara és, molt emprada en l'àmbit industrial, tot i que presenta alguns inconvenients:

- És poc flexible davant de futures modificacions o ampliacions.
- En general ocupa molt d'espai.
- No permet d'efectuar funcions de control complexes.
- Resulta difícil localitzar i resoldre avaries.
- És poc adaptable, ja que l'única manera d'alterar la funció de control és modificant-ne els components o la manera d'interconnectar-los.

La **tecnologia programable**, atès que no presenta els inconvenients anteriors, gaudeix de gran quantitat d'avantatges. Per aquesta raó és molt adaptable i pot realitzar diferents funcions de control sense alterar la seva configuració física, únicament canviant el programa de control.

## Els senyals en els sistemes de control

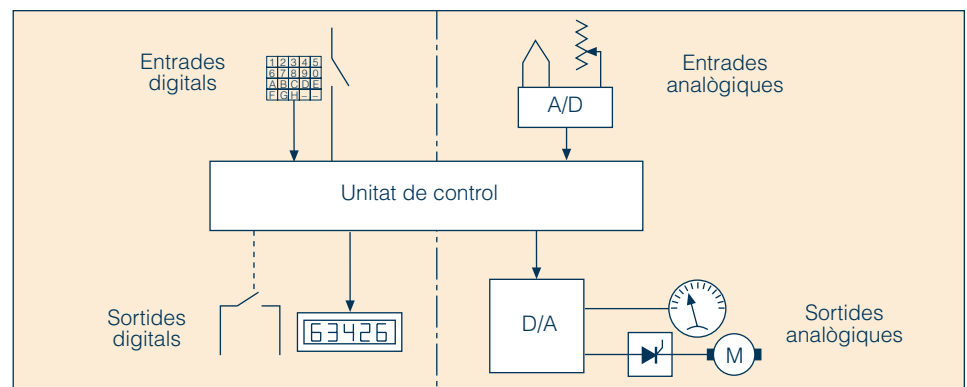
La majoria de sistemes de control treballen amb senyals elèctrics, els quals, atenent a la naturalesa d'aquests senyals, poden dividir-se en tres grups:

- **Sistemes analògics.** Treballen amb senyals de tipus continu, amb un marge de variació determinat. Aquests senyals solen representar magnituds físiques del procés, com ara temperatura, pressió, velocitat, etc., mitjançant una tensió o corrent proporcionals al seu valor (0 a 10 V, 4 a 20 mA, etc.).

- **Sistemes digitals.** Treballen amb senyals **tot o res**, anomenats també *binaris*, els quals només poden representar dos estats o nivells: obert o tancat, activat o desactivat, condueix o no condueix, major o menor, etc. Aquests nivells o estats solen representar-se per variables lògiques o **bits**, el valor de les quals pot ser 1 o 0, emprant la notació binària de l'Àlgebra de Boole, que veurem més endavant.

- **Sistemes híbrids analogicodigitals.** Els sistemes de control actuals, amb un cert grau de complexitat, són majoritàriament **híbrids**, és a dir, són sistemes que processen senyals analògics i digitals alhora. Tanmateix, es tendeix que la unitat de control sigui totalment digital, basada en un microprocessador, ja que aporta una gran capacitat de càlcul i de processament.

**Diagrama de senyals E/S de la unitat de control.** Atès que molts dispositius utilitzats habitualment subministren senyals de tipus analògic, cal efectuar conversions, anomenades generalment *conversions analogicodigitals (A/D)*, perquè puguin ser tractades pels dispositius de control. Així mateix, en ocasions és necessari també disposar de senyals analògics de sortida per aplicar-los a cert tipus d'indicadors o al control de sistemes externs. En aquests casos, el sistema de control ha de disposar d'interfícies per a la conversió digitalanalògica (D/A), capaces de subministrar aquests senyals analògics a partir dels valors numèrics digitals obtinguts als dispositius de control.



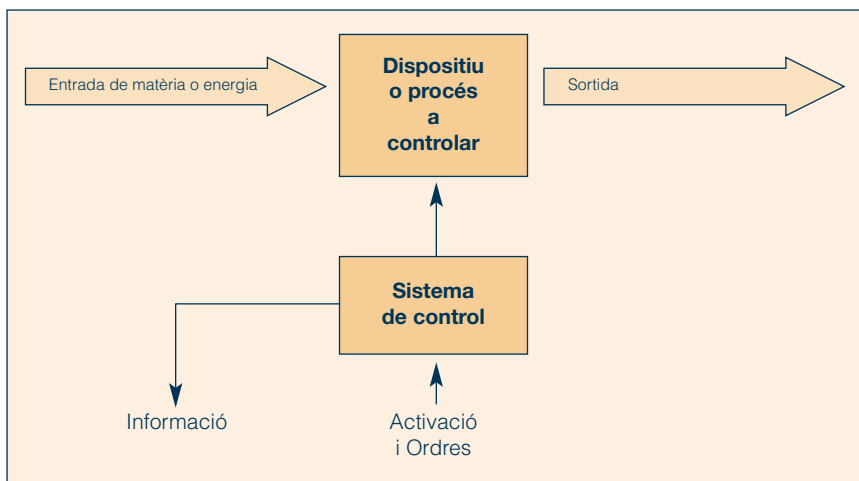
5. Posa uns quants exemples de màquines, dispositius o processos que coneguis i digues si el seu control és automàtic o manual.
6. Què entenem per sistema de control?
7. Compara els avantatges i els inconvenients existents entre les tecnologies cablada i programada emprades en automatització.
8. Comenta breument les principals característiques dels sistemes de control analògics, digitals i híbrids.

## 9.3. Sistemes de control de llaç obert i llaç tancat

En funció de la tecnologia cablada o programada i del tipus de senyal elèctric que utilitzen, els sistemes de control solen pertànyer a dos grans grups, depenent de la manera com treballa l'automatisme: sistemes de control de llaç obert i sistemes de control de llaç tancat.

### Sistemes de control de llaç obert

*Els sistemes de control de llaç obert es caracteritzen perquè, un cop activats, executen el procés durant un temps prefixat, independentment del resultat obtingut. Per tant, el resultat no afecta el dispositiu de control, és a dir, el sistema no supervisa el resultat de la sortida.*



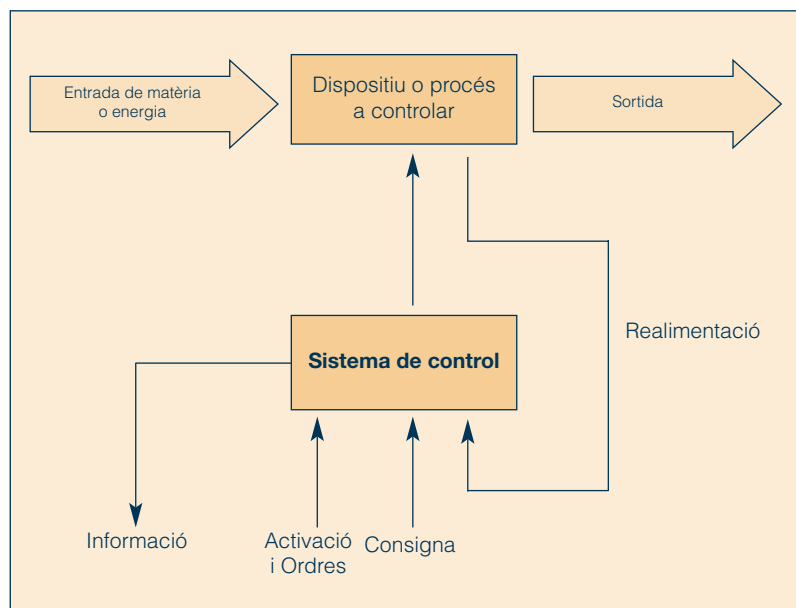
Esquema de funcionament d'un sistema de llaç obert.

Un exemple d'aquest tipus és el llum temporitzat d'escala que hem comentat abans. El temporitzador és el **dispositiu de control** que té programat el temps durant el qual els llums estaran encesos; i els llums de l'escala són els **dispositius a controlar**. En el cas que el temps programat sigui menor del que necessiti un veí de l'últim pis per arribar a casa seva, el llum s'apagarà igualment. Això és així perquè el temporitzador compleix les ordres per a les quals ha estat programat. És en aquest sentit que diem que el resultat no afecta el dispositiu de control, o que el sistema no supervisa el resultat de la sortida.

Tot i que l'exactitud del sistema depèn de la programació o calibratge, cal dir que el valor desitjat de sortida pot estar alterat a causa de perturbacions externes que poden influir significativament sobre la sortida. Posem per cas una torradora de pa o una rentadora; en ambdós casos el sistema de control no supervisa el resultat de la sortida. En el primer exemple, programem el temps a través del selector i una vegada passat aquest temps, la torradora es dispara sense avaluar si la llesca de pa està més o menys torrada; en canvi, apreciem que els resultats poden ser divergents a causa de perturbacions externes com ara la temperatura inicial a què es trobi la torradora (no es torrará igual la primera llesca de pa que la número 10), el tipus de pa, el grau d'humitat d'aquest, etc. El mateix passarà en el cas de la rentadora; el sistema de control no analitza el resultat de la sortida, és a dir, si la bugada està més o menys neta. En aquest cas les perturbacions de tipus extern seran el grau de brutícia inicial de la roba, la temperatura de l'aigua, el tipus i la quantitat de detergent, etc.

## Sistemes de control de llaç tancat

La majoria de processos de control són molt més complexos i sovint responen a situacions canviants, alhora que per exigències de qualitat no poden dependre de la influència de perturbacions externes que influeixin sobre la sortida. En aquests processos serà necessari aplicar sistemes de llaç tancat.



Esquema de funcionament d'un sistema de llaç tancat.

El control de sistemes de llaç tancat es pot realitzar manualment mitjançant una persona que llegeixi les alteracions que es produeixen en el procés i que intervingui adequant-lo a les condicions de sortida. Tanmateix, aquest mètode presenta nombrosos inconvenients, com ara precisar l'atenció permanent d'una persona, a més de ser insegur, poc precís, costós i lent. En aquestes circumstàncies la incorporació de sistemes de control automàtics de llaç tancat es presenta com una veritable solució.

En els sistemes de control de llaç tancat, un cop donada l'ordre per iniciar el procés, el resultat o sortida del procés és analitzat, i si no compleix una determinada consigna el dispositiu de control n'és informat i manté el procés actiu fins a assolir allò que estableix la consigna.

El que caracteritza un sistema de llaç tancat, per tant, és l'acció de la sortida sobre l'entrada, a través d'un procés continu de **realimentació**, que consisteix a *comparar l'estat de la sortida amb el de consigna per modificar la resposta de l'automatisme d'acord amb aquest últim valor*. La **consigna** pot ser un valor com ara la temperatura d'una habitació, o una condició qualsevol, com ara la presència d'un objecte en un punt determinat, etc.



En l'exemple del llum temporitzat d'escala, en un sistema de llaç tancat, el dispositiu de control rebria informació de la presència de veïns a l'escala i mantindria els llums encesos mentre aquests hi fossin. La consigna seria, llavors: *presència de veïns*.

Un exemple molt freqüent del sistema de control de llaç tancat és el control de temperatura d'un estatge mitjançant un termòstat. Aquest element compara la temperatura indicada pel selector de referència amb la temperatura ambient de l'estatge; en el cas que no siguin iguals, proporciona un senyal que actua sobre la caldera per posar-la en marxa, fins que la diferència entre la temperatura de consigna i la temperatura ambient sigui zero. També la majoria dels processos existents a la indústria utilitzen el control de llaç tancat, ja que aquest permet un control més precís i continu d'acord amb uns determinats paràmetres d'entrada.

Tant en la indústria com en la llar són habituals i nombrosos els sistemes de control automàtics de llaç tancat: escalfadors elèctrics d'aigua, refrigeradors, calefacció mitjançant termòstat, control de nivell de dipòsits d'aigua, mecanisme d'emplenat d'una cisterna d'aigua, control de temperatura de forns, sistemes de control de nivells de líquids i sòlids, etc.



## La funció de transferència

Dins d'un sistema de control, ja sigui de llaç obert o de llaç tancat, els components o subsistemes poden ser tractats com a blocs que proporcionen un cert senyal de sortida davant determinades excitacions o senyals d'entrada. Cada bloc, doncs, està caracteritzat per una sèrie de relacions entre les seves magnituds de sortida i les d'entrada, expressades habitualment mitjançant funcions de transferència.

La funció de transferència o transmitància és l'expressió matemàtica que en un bloc relaciona la variable de sortida amb la variable d'entrada.

La funció de transferència constitueix un model matemàtic del comportament del bloc que representa. Així doncs, dos blocs amb idèntica funció de transferència es consideren equivalents des del punt de vista del control, amb independència de com i amb quina tecnologia estiguin construïts (mecànica, elèctrica, pneumàtica, hidràulica...).



Representació gràfica d'un bloc.

Un exemple senzill de funció de transferència el podem trobar en un bloc constituït per una resistència elèctrica o resistor. Així doncs, definim la intensitat  $i(t)$  com a variable d'entrada i la tensió en borns  $v_R(t)$  d'aquest resistor, com a variable de sortida. La funció de transferència del bloc,  $G(s)$ , serà la relació entre les variables de sortida i d'entrada. Així doncs, tindrem que:

$$G(s) = \frac{v_R(t)}{i(t)} = R$$

on la transferència d'aquest bloc és la resistència  $R$ . La sortida o resposta serà, doncs, el resultat de multiplicar la funció de transferència, que en el nostre cas és igual a  $R$ , per la variable d'entrada:

$$v_R(t) = G(s) i(t); \quad \text{en el nostre cas: } v_R(t) = R i(t)$$

## exercicis

- Quines diferències hi ha entre un sistema de control de llaç obert i un de llaç tancat?
- De què depèn l'exactitud d'un sistema de control de llaç obert?
- Un torradora de pa s'acciona mitjançant un pulsador i es pot programar el temps durant el qual la resistència calefactora torrarà. Aquest sistema de control és de llaç obert o de llaç tancat? Per què?
- El sistema de control de la calefacció d'un habitatge mitjançant termòstat és de llaç obert o de llaç tancat? Raona la resposta i fes el diagrama de blocs del procés.
- Explica com es du a terme la realimentació en l'exemple de sistema de control de l'activitat anterior.
- Per què la majoria dels processos existents en la indústria utilitzen el control de llaç tancat?
- Classifica els aparells següents en dues llistes, d'acord amb el sistema de control que incorporin (de llaç obert o de llaç tancat): rentadora, rentavaixelles, forn microones, torradora de pa, nevera, ascensor, forn elèctric, comandament a distància del televisor, llum automàtic d'escala, control de la velocitat d'un automòbil, calefactor, porta automàtica d'un supermercat, escales automàtiques, mecanisme d'emplenat d'una cisterna d'aigua.
- Què és la funció de transferència? Quina seria la funció de transferència d'un bloc constituït per una resistència elèctrica o resistor, en el qual definim la tensió en borns d'aquest resistor com a variable d'entrada i la intensitat com a variable de sortida?

En els sistemes de control és necessari utilitzar tot un conjunt de components o dispositius tecnològics que permetin de fer la funció de control necessària, independentment del tipus de tecnologia emprada en aquests dispositius. Són diversos els elements que intervenen en un dispositiu o procés que s'ha d'automatitzar, cadascun dels quals realitza una funció específica. Els principals dispositius que intervenen en un procés automàtic són els següents:

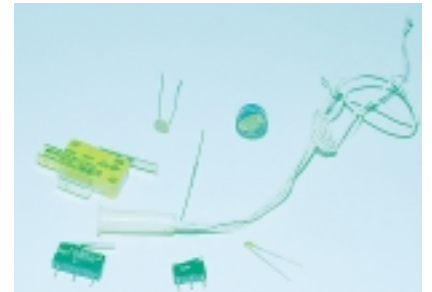


Dispositius d'entrada d'ordres.

- **Dispositius d'entrada d'ordres.** Són els que permeten a l'operador l'entrada de dades i ordres al sistema. Podem classificar-los en binaris i numèrics (o alfanumèrics).

- Els **elements binaris** són els que permeten entrar ordres del tipus activat/desactivat, cert/fals, sí/no, etc.; entre aquests podem destacar els pulsadors, els interruptors, els commutadors, etc.
- Els **elements numèrics** permeten l'entrada de números i els **alfanumèrics** permeten d'introduir números i lletres; entre aquests podem destacar els teclats numèrics i els preselectors digitals (rodes numerades, habitualment del 0 al 9, que es poden fer girar).

- **Dispositius d'entrada d'informació.** Estan constituïts bàsicament per **sensors**, que són dispositius que prenen dades de la situació del procés o de les variables de sortida i les transmeten a la unitat de control perquè, d'acord amb aquesta informació, realitzin les accions corresponents sobre els actuadors. Es poden classificar segons el tipus de senyal que faciliten (binaris, numèrics i analògics) o segons la magnitud que indiquen (temperatura, pressió, cabal, posició, velocitat, etc.).



Dispositius d'entrada d'informació.

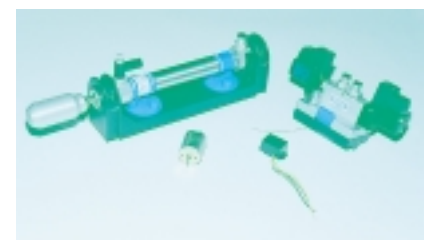


Dispositius de sortida d'informació.

- **Unitat de control o controlador.** Constitueix el sistema de tractament de la informació del procés, i estableix la manera com s'han de combinar les entrades d'informació per tal d'activar les sortides del procés. Moltes vegades són necessàries les **interfícies**, que són també dispositius que adapten els senyals dels sensors a les entrades de la unitat de control.

- **Dispositius de sortida d'informació.** S'encarreguen de la comunicació amb l'operador. Poden classificar-se en binaris (pilot visualitzador, timbres, sirenes, etc.), numèrics i alfanumèrics (*displays* de 7 segments, pantalles de cristall líquid, monitors, impressores, etc.).

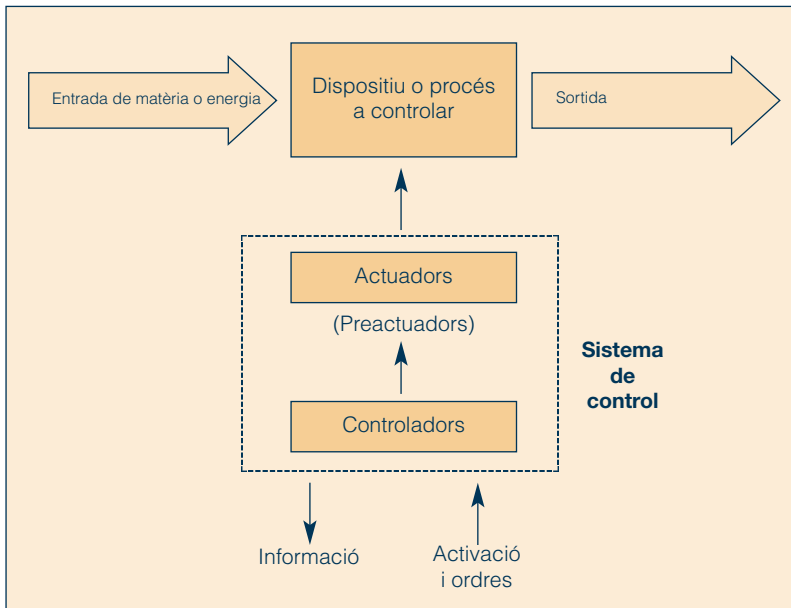
- **Actuadors i preactuadors.** Els actuadors (motors, cilindres, resistències calefactores, etc.) són els encarregats d'operar sobre el procés. Sovint els actuadors no són directament connectables al controlador i requereixen preactuadors (contactors, relés, vàlvules distribuïdores, variadors de tensió, etc.).



Actuadors i preactuadors.

## Elements del control de llaç obert

El sistema de control de llaç obert està format, principalment, per dues parts: el controlador i els actuadors.



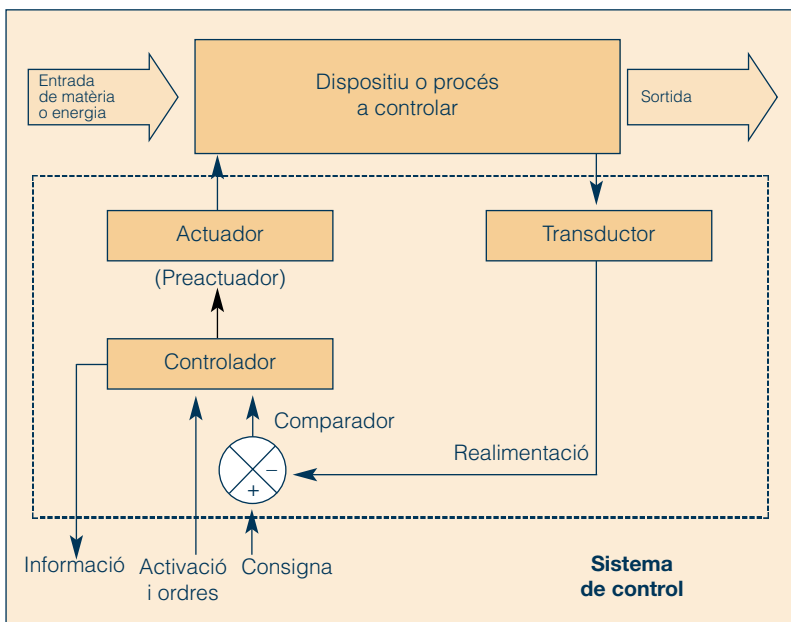
Components del sistema de control de llaç obert.

El **controlador** és el dispositiu característic del sistema que determina i executa el procés per al qual està preparat. Disposa dels sistemes de regulació o ajustament, així com dels senyals indicadors o visualitzadors del seu estat. En el cas del llum temporitzat de l'escala d'un edifici, el controlador és el temporitzador. En una rentadora el controlador és el programador i en una torradora de pa és el termòstat.

L'**actuador** o **accionador** és l'element final que fa una acció sobre el procés. En el cas del llum temporitzat, l'element final o actuador és la làmpada. Sovint els actuadors o accionadors (motors, resistències calorífiques, cilindres, etc.) no són directament connectables al sistema de control i requereixen preaccionadors (interruptors, contactors, variadors de velocitat, vàlvules distribuïdores, etc.).

## Elements del control de llaç tancat

La composició d'un sistema de control de llaç tancat és més complexa i hi intervenen més components, gràcies principalment a la realimentació, que, com hem vist és la característica principal d'aquests tipus de sistemes. El sistema de control de llaç tancat funciona seguint l'esquema de sota.



Components del sistema de control de llaç tancat.

Per poder efectuar la realimentació necessitem disposar d'uns elements de captació de les magnituds del procés, que anomenem genèricament *sensors* o *transductors*, i d'uns circuits adaptadors anomenats *interfícies*. Igualment, també són necessaris uns accionadors o actuadors, elements que actuen sobre la part de potència del procés.

La potència requerida per operar sobre aquests accionadors pot ser considerable i, en ocasions, no pot ser subministrada directament per la unitat de control, per la qual cosa cal disposar d'uns elements intermedis, anomenats *preaccionadors* (també *preactuadors*), que fan la funció d'amplificadors. A més, en un sistema automàtic de llaç tancat seran necessaris uns dispositius que s'encarreguin de comparar i generar el senyal d'error quan entri en dissonància amb el senyal de consigna. D'això se n'encarregaran el generador de valor de consigna i el comparador.

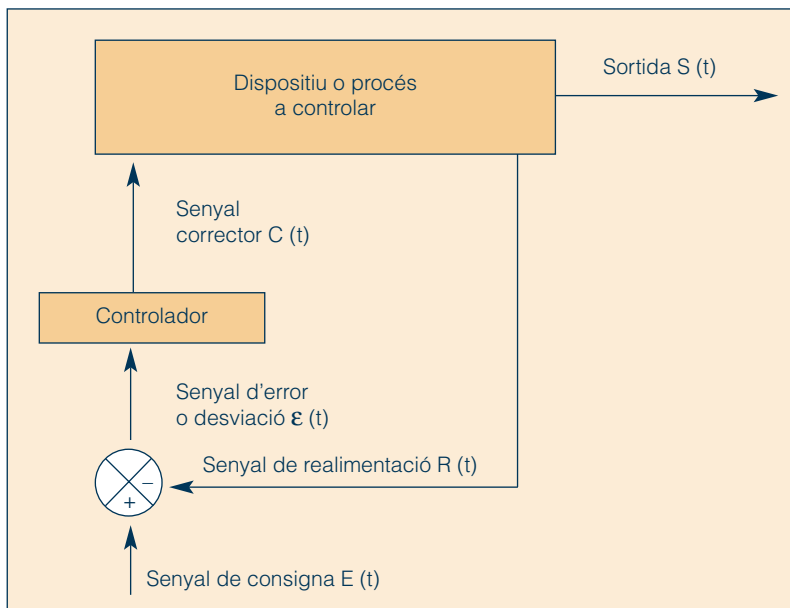


# exercicis

17. Enumera els principals dispositius que intervenen en un procés automàtic.
18. Quina diferència hi ha entre els dispositius d'entrada d'ordres i els dispositius d'entrada d'informació?
19. Assenyala les diferències entre els actuadors i els preactuadors. Cita un quants exemples de cadascun d'ells.
20. De quins elements es compon principalment un sistema de control de llaç obert?
21. Quins elements podem distingir en un sistema de control de llaç tancat?

## 9.5. Controladors

El **controlador** és el dispositiu responsable d'elaborar el senyal corrector que constantment és enviat a l'element final de regulació del procés, amb la finalitat d'aconseguir, restablir o mantenir les condicions de regulació desitjades, pròximes al valor de consigna.



Senyals d'un sistema típic de llaç tancat.

La sortida del controlador (senyal corrector) és funció del senyal d'error, anomenat també *desviació*, proporcionat pel comparador. És, per tant, missió del controlador comparar el valor de consigna amb el valor real de la magnitud de sortida del procés i generar el senyal de control més adient per minimitzar els errors i obtenir una resposta al més ràpidament possible davant variacions de consigna o perturbacions exteriors. L'acció de control que haurà d'exercir el controlador per aconseguir aquestes prestacions dependrà del dispositiu o procés a controlar.

La funció de transferència del controlador també hauria d'escollir-se segons de quin procés es tracti; no obstant això, totes les funcions de transferència normalment obeeixen uns quants models bàsics de comportament, anomenats també *accions bàsiques de control*, o combinacions simples entre ells.

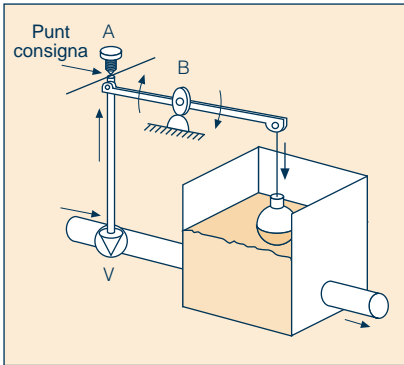
Les accions bàsiques de control que estudiarem en aquest apartat, i que porten incorporades els controladors industrials, són les següents:

- Acció proporcional (*P*)
- Acció integral (*I*)
- Acció derivativa (*D*)

Per obtenir les prestacions requerides del sistema de control, aquestes accions bàsiques de control, basades en funcions lineals, no solen emprar-se en forma pura, sinó combinades entre elles.

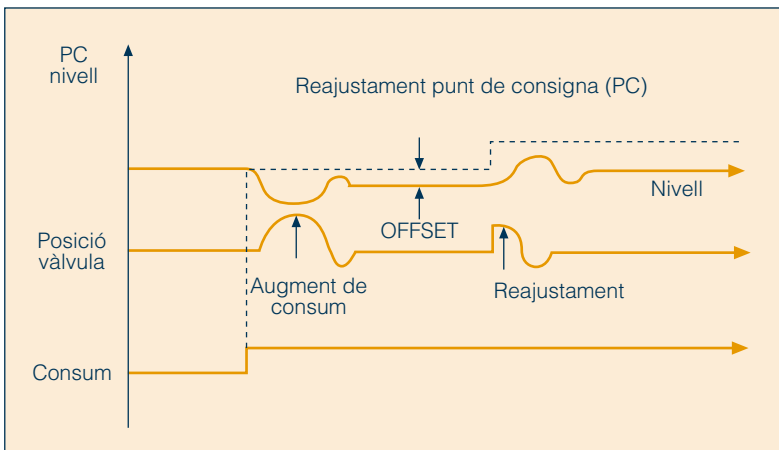
## Control proporcional (P)

Vegem a continuació un senzill exemple de control proporcional que ens permeti d'entendre millor el seu funcionament. Suposem un controlador de nivell per boia com el de la figura. Mitjançant la vàlvula de control  $V$  pretenem controlar el nivell del dipòsit de manera que romangui constant, fent que el cabal d'entrada al dipòsit sigui igual al cabal de sortida.



Amb el caragol d'ajust  $A$  fixem el punt de consigna per al nivell desitjat. Si es produeix un augment de cabal en la sortida, disminuirà el nivell del dipòsit i llavors la boia, a través d'una articulació mecànica  $B$ , actuarà sobre la vàlvula  $V$  obrint-la i fent augmentar el cabal d'entrada fins que s'iguali amb el cabal de sortida. Però durant aquest temps el nivell inicial haurà baixat un cert valor.

Això significa que, si partíem d'un error o desviació nul·la en el nivell del dipòsit, llavors en les noves condicions d'equilibri hi haurà una desviació residual o permanent, anomenada *OFFSET*. És a dir, en el nou règim d'equilibri (igualtat en els cabals d'entrada i de sortida) el nivell serà més baix que al principi.



Gràfica de funcionament de control proporcional.

Aquest tipus de regulació, anomenada proporcional, pot produir una acció correctora exacta (sense desviació permanent), només en una condició específica de funcionament; en la resta persistirà una desviació.

En el nostre exemple hem vist que el regulador estava ajustat per unes determinades condicions de consum d'aigua. Si les condicions canvien, l'acció proporcional actuarà contra la desviació obrint la vàlvula i fent entrar més aigua al dipòsit, però no és capaç de portar-lo a l'anterior valor de consigna, sinó que el nivell romandrà en un punt més baix, i produirà una desviació permanent.

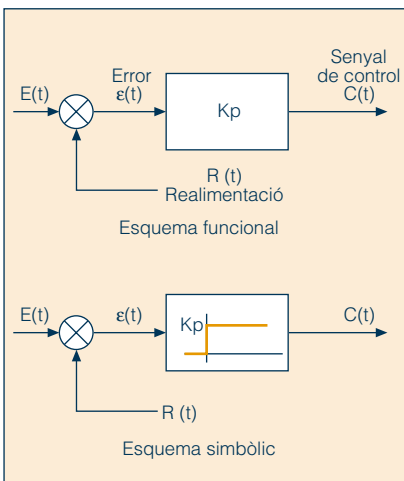
Per eliminar aquesta desviació residual i portar la sortida (el nivell del dipòsit) al valor exacte de consigna desitjat, haurem de reajustar manualment el punt de consigna, desplaçant-lo en el sentit contrari a la mesura, una quantitat que dependrà, entre altres coses, del guany del controlador, que és una constant que determina la sensibilitat del controlador. Amb això aconseguirem que la sortida se situï realment en el valor desitjat.

El principal inconvenient d'un control proporcional és que treballa amb una desviació permanent, el valor de la qual canviarà quan es modifiqui el règim de funcionament del procés.

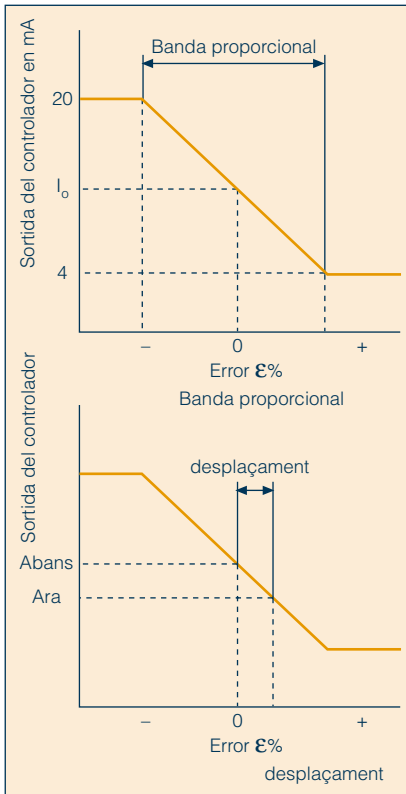
En un **control proporcional (P)** pur, l'acció de control  $C(t)$  depèn proporcionalment del senyal d'error  $\epsilon(t)$ , és a dir, es modifica en una quantitat proporcional a la desviació entre el punt de consigna i el valor real mesurat, segons l'expressió següent:

$$C(t) = K_p \epsilon(t)$$

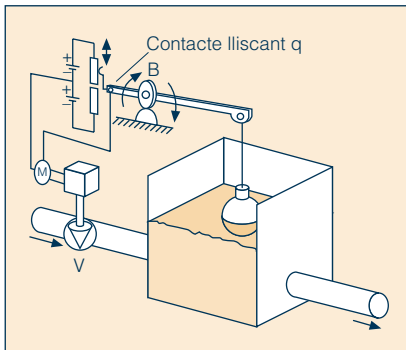
on  $K_p$  és una constant anomenada *guany* o *constant proporcional*. Si l'error és petit, el controlador generarà un petit canvi a la sortida del senyal corrector; ara bé, si el senyal d'error és gran, el canvi també serà significatiu a la sortida del senyal corrector.



Bloc de control proporcional.

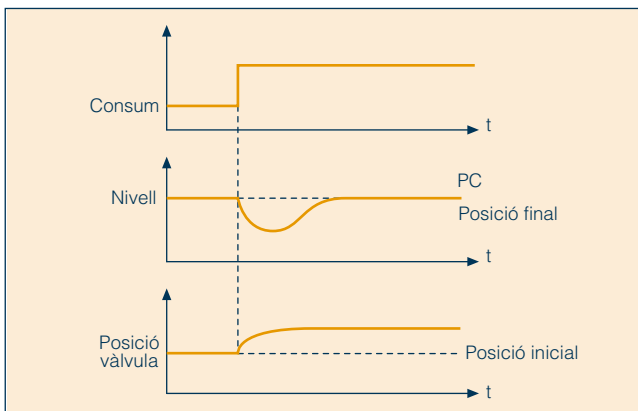


Comportament del control proporcional.



Símil de regulador integral.

Gràfica del comportament del dipòsit.



Aquest tipus de controladors se'ls anomena habitualment *controladors* o *reguladors de tipus P*. Es caracteritzen pel fet que és necessària l'existència d'un senyal d'error perquè es dugui a terme l'acció de control. La funció de transferència d'aquest regulador proporcional serà la següent:

$$G(s) = K_p$$

L'invers del guany ( $K_p$ ), s'anomena habitualment *banda proporcional (BP)*; això significa que l'error del controlador  $\varepsilon(t)$  és directament proporcional a la seva banda proporcional, que és una característica pròpia de cada controlador.

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{K_p} C(t) = BP C(t)$$

## Control integral (I)

Com hem comentat anteriorment, el principal inconvenient d'un control proporcional pur és que sempre hi ha una desviació permanent, la qual depèn directament del valor de la banda proporcional. L'acció integral permet anul·lar aquest error, fent que el senyal de control variï d'acord amb la desviació i el temps en què aquesta es manté.

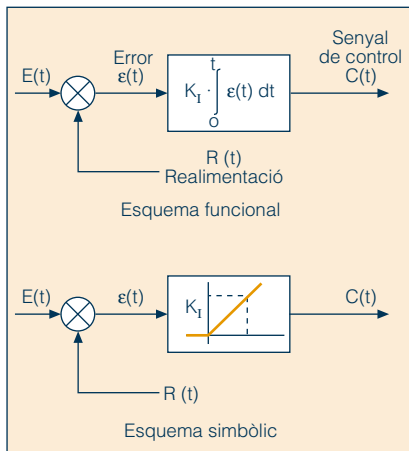
Parlem de **control integral** quan la velocitat de canvi de la sortida de control és proporcional al senyal d'error d'entrada.

Si el controlador de l'anterior exemple del dipòsit fos d'acció integral, la sortida aniria modificant-se mentre es mantingués la desviació i, si no fos capaç de corregir-la, portaria l'element final (vàlvula) fins a la seva màxima posició d'obertura. El controlador d'acció integral fa que l'element final de control es mogui a una velocitat que és proporcional al senyal d'error. En el nostre exemple, com més gran fos la desviació, més gran seria la velocitat de desplaçament de la vàlvula per evitar que el nivell baixés al mínim possible.

Vegem ara un símil de regulador integral aplicat a l'exemple anterior del dipòsit d'aigua. En aquest cas la vàlvula està accionada per un motor de corrent continu que gira a una velocitat proporcional a la tensió aplicada. Suposem que la boia està acoblada mecànicament a un potenciòmetre, el qual forma part d'un circuit electrònic, que, d'acord amb la desviació existent entre la mesura proporcionada pel potenciòmetre i el valor de consigna, subministra una tensió positiva  $V+$  d'obertura o negativa  $V-$  de tancament de la vàlvula amb una velocitat proporcional al valor de tensió aplicat.

Si el nivell del dipòsit descendeix a causa d'un augment del consum, el potenciòmetre associat a la boia subministrarà un senyal d'error i el controlador generarà un senyal de control (tensió de signe positiu) que, aplicat al motor de la vàlvula, farà que aquesta s'obri i se subministri aigua al dipòsit per fer augmentar el nivell fins al valor desitjat. L'obertura continuarà fins que el nivell no hagi aconseguit el valor prefixat, ja que durant aquest temps el motor anirà rebent tensió. Si el nivell del dipòsit sobrepasa el valor de consigna, llavors el controlador realitzarà la funció inversa, és a dir, aplicarà al motor una tensió de signe negatiu perquè faci tancar la vàlvula. Si això succeeix repetides vegades, ens trobem davant d'un funcionament inestable del sistema. Podem, aleshores, augmentar el temps d'integració per fer que la resposta del controlador sigui més lenta i evitar, així, la inestabilitat del sistema.





Bloc de control integral.

La característica principal d'aquest tipus de regulació és que mentre hi hagi senyal d'error persistirà l'acció correctora, i serà menys enèrgica com menor sigui la desviació. L'acció correctora respon, doncs, tant a la magnitud com a la durada de la desviació. Per consegüent, per a qualsevol pertorbació, l'acció correctora persisteix fins haver aconseguit la compensació precisa per restablir en el procés les condicions d'equilibri, i anul·la totalment l'error.

Al contrari que la regulació proporcional, que presenta una resposta enèrgica i instantània des de l'instant en què es produeix una desviació, la regulació integral té l'inconvenient de ser poc enèrgica en els instants immediats a l'aparició brusca d'una desviació, ja que el seu efecte és progressiu.

El seu comportament pot expressar-se mitjançant l'equació següent:

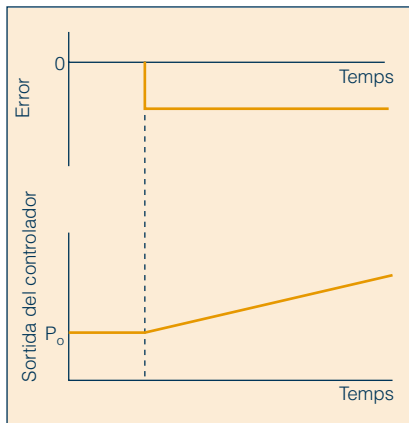
$$C(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t \epsilon(t) dt = K_I \int_0^t \epsilon(t) dt$$

on  $C(t)$  = Senyal de control o sortida del controlador.

$T_I$  = Temps d'integració (factor de proporcionalitat invers).

$\epsilon(t)$  = Error o desviació.

$K_I$  = Constant integral.



Gràfica de control integral.

Aquesta equació ens indica que mentre existeix error entre la consigna i la realimentació, el sistema augmenta el senyal de control intentant corregir l'error. Quan l'error és nul, el controlador manté constant el valor de sortida. El factor  $K_I$  o  $1/T_I$  és la velocitat de canvi de la sortida del controlador quan el senyal d'error val la unitat, o el que és el mateix, és el factor de proporcionalitat de la velocitat de moviment de la vàlvula amb relació a la desviació.

També podríem haver-ho expressat d'aquesta altra manera:

$$\frac{\Delta C(t)}{\Delta t} = \frac{1}{T_I} \epsilon(t)$$

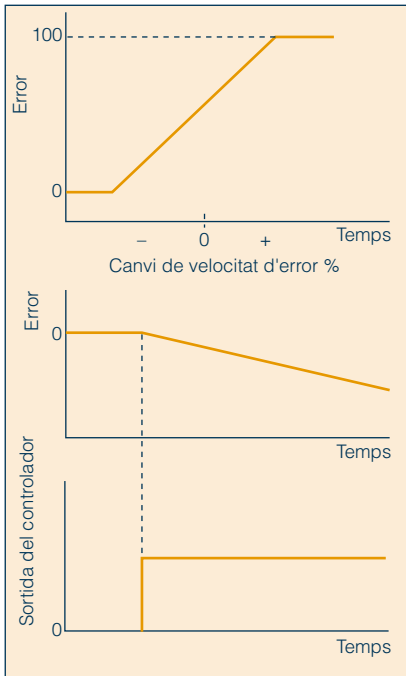
on  $\Delta C(t)$  = Variació de la sortida o canvi en la posició de la vàlvula.

$\Delta t$  = Variació del temps.

$\Delta C(t) / \Delta t$  = Velocitat de la variació de la sortida o de canvi de la posició de la vàlvula.

- Si  $\epsilon(t) = 0$ , la vàlvula no es mourà.
- Si  $\epsilon(t) > 0$ , el senyal de sortida augmenta amb el temps, és a dir, la vàlvula s'anirà obrint o tancant fins que  $\epsilon(t) = 0$ .
- Si  $\epsilon(t) < 0$ , el senyal de sortida disminueix amb el temps, la vàlvula s'obrirà o tancarà fins que l'error sigui nul.

A la pràctica no existeixen controladors que portin implementada només l'acció integral pura, sinó que també porten incorporada una acció proporcional, ja que en determinats processos es pot donar un funcionament inestable. La primera acció a actuar és la proporcional, que ho fa instantàniament, mentre que la integral actua durant un interval de temps. Així, i per mitjà de l'acció integral, eliminem la desviació residual permanent (OFFSET) que, com ja hem comentat, és el principal inconvenient del control proporcional.



Gràfica de control derivatiu.

## Control derivatiu (D)

Les accions proporcional i integral estudiades anteriorment no permeten de resoldre satisfactòriament tots els problemes de control. L'acció proporcional té una resposta ràpida i enèrgica però deixa sempre un error permanent. L'acció integral, en canvi, pot provocar inestabilitat en el sistema o una resposta excessivament lenta si es vol corregir la inestabilitat. L'objectiu de l'acció derivativa (*D*) és precisament complementar les dues anteriors, i permetre d'obtenir una resposta dinàmica més ràpida, és a dir, aconseguir un temps de resposta menor.

*El control derivatiu es caracteritza per generar un senyal de control proporcional a la velocitat amb què varia la magnitud d'error amb el temps.*

O el que és el mateix, l'acció derivativa s'oposa a les desviacions amb una acció que és proporcional a la rapidesa d'aquestes. Això pot expressar-se mitjançant l'equació següent:

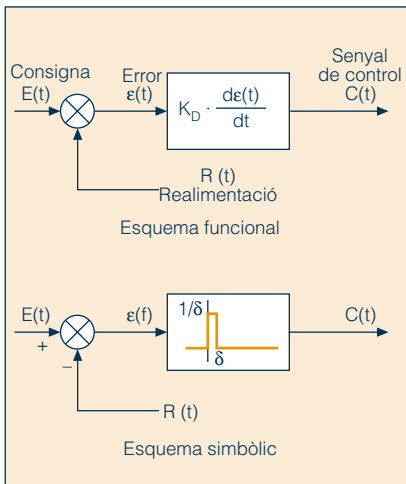
$$C(t) = T_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = K_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

on  $K_D$  s'anomena *constant d'acció derivativa* i és igual a la constant de temps derivativa  $T_D$ .

Una altra manera d'expressar l'anterior equació, en forma d'increments, és la següent:

$$C(t) = T_D \frac{\Delta\varepsilon(t)}{\Delta t}$$

Si la desviació o error es produeix de manera instantània en forma d'esglaió, és a dir, en un temps molt petit, la velocitat de variació es fa infinita i, per consegüent, l'acció derivativa provoca moviments bruscos en la regulació. Aquest comportament no és desitjable i, per tant, a la pràctica no s'usa de forma pura, sinó associada a una acció *P* o a una acció *PI*.



Bloc de control derivatiu.

## Control proporcional-integral-derivatiu (PID)

Els controladors industrials presents en el mercat solen combinar els tres tipus d'accions bàsiques estudiades (*P*, *I*, i *D*); són els anomenats reguladors de tipus *PID*. L'objectiu d'aquest tipus de control és obtenir tots els avantatges dels altres tres i superar els seus inconvenients.

Recordem breument les característiques i el comportament de cadascuna de les tres accions, referides al nostre exemple del dipòsit d'aigua:

- **L'acció proporcional** corregeix la posició de la vàlvula en una quantia proporcional a la desviació. És d'efecte instantani i enèrgic, encara que sol presentar desviació permanent.
- **L'acció integral** mou la vàlvula a una velocitat proporcional a la desviació o senyal d'error. És d'efecte lent i progressiu, però continua actuant fins a anul·lar la desviació permanent.
- **L'acció derivativa** corregeix la posició de la vàlvula en un valor proporcional a la velocitat de canvi de la desviació. Això produeix un efecte d'anticipació si tenim en compte la tendència de la variable controlada.

El comportament d'un controlador *PID* correspon a la superposició d'aquestes tres accions. El comportament temporal s'expressa amb l'equació següent:

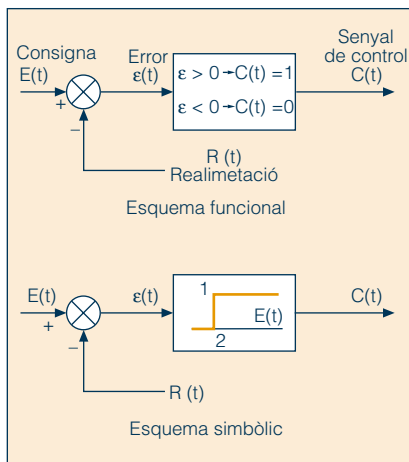
$$C(t) = K_p \left\{ \varepsilon(t) + K_I \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt + K_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right\}$$

Es pot observar que l'acció proporcional actua sobre el total de la resposta, d'aquesta manera les constants integral i derivativa representen el pes relatiu de cadascuna d'aquestes accions per a una acció proporcional unitària.

En la indústria, la major part dels controladors s'implementen mitjançant un *hardware* estàndard, ja sigui regulador específic o bé autòmat programable. Per consegüent, l'usuari només ha d'ajustar o programar les constants  $K_p$ ,  $K_I$  i  $K_D$ . Tanmateix, malgrat que l'execució d'aquesta operació resulta senzilla, l'elecció del valor adequat dels paràmetres  $K_p$ ,  $K_I$  i  $K_D$  no és tan fàcil, ja que poden aparèixer problemes d'inestabilitat o de lentitud en la resposta.

El comportament òptim d'un bucle tancat de control s'aconsegueix quan el controlador reacciona tan ràpidament que la variable controlada no resulta influenciada per les perturbacions del sistema i segueix sense cap retard ni oscil·lació els canvis de la variable de consigna. Encara que aquestes condicions, en la pràctica, són gairebé impossibles, el **controlador òptim** serà aquell que s'hi approximi més.

En l'actualitat, molts reguladors *PID* solen portar incorporada una funció d'autoajust, anomenada també *autotuning*, que s'encarrega d'ajustar automàticament aquestes constants d'acord amb el comportament del procés o dispositiu a controlar.



Bloc de control tot o res.

## Control tot o res

Un **sistema de control tot o res** és aquell la sortida del qual només adopta dos estats: connectat i desconnectat o, el que és el mateix, màxima i mínima sortida.

Les equacions que expressen el comportament del sistema de control són les següents:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= E(t) - R(t) \\ C(t) &= 1 \quad \text{si } E(t) > R(t) \\ C(t) &= 0 \quad \text{si } E(t) < R(t) \end{aligned}$$

on  $E(t)$  = Consigna.

$C(t)$  = Senyal de control o sortida del controlador.

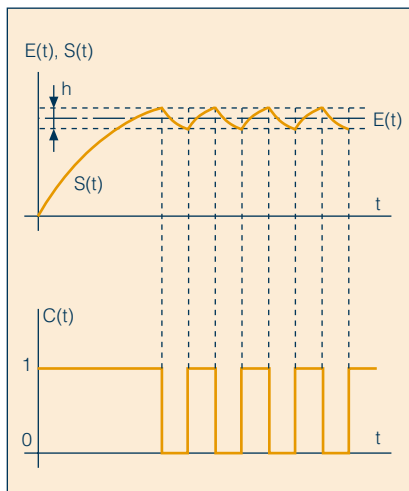
$R(t)$  = Realimentació o valor real mesurat.

Aquest tipus de control és aplicable, en general, quan el procés o dispositiu a controlar es comporta amb un retard anomenat de primer ordre, és a dir, amb una constant de temps molt gran. Un exemple típic el constitueix el termòstat d'alguns sistemes de climatització ambiental que no disposa d'una regulació contínua de la potència calorífica o frigorífica, sinó simplement d'un interruptor automàtic (termòstat) que connecta o desconnecta tota la potència disponible.

En la pràctica aquests sistemes tenen una certa histèresi o banda morta en la qual no actuen. Això significa que, realment, les equacions que expressen el seu comportament són les següents:

$$\begin{aligned} C(t) &= 1 \quad \text{si } E(t) > R(t) + h/2 \\ C(t) &= 0 \quad \text{si } E(t) < R(t) - h/2 \end{aligned}$$

on  $h$  és la banda morta o error lliandar, per sota del qual el sistema no reacciona. La figura de l'esquerra mostra l'evolució temporal típica del senyal de control i de sortida del sistema.



Evolució dels senyals en un sistema tot o res amb histèresi.



# exercicis

22. Quin tipus de control proporciona una resposta ràpida i enèrgica davant una variació de la variable de sortida?
23. Si en un regulador *PID* el temps de pujada és alt, l'acció integral és.....
24. Si en un regulador *PID* el temps de retard és petit, l'acció derivada és .....
25. Quin tipus de control és capaç d'anul·lar desviacions permanents?
26. Per què els controladors industrials solen combinar les tres accions de control? Raona la resposta.
27. Quins problemes pot presentar la utilització d'un control proporcional pur?
28. Quins avantatges i inconvenients presenta la utilització d'un controlador tot o res en un sistema de regulació de la temperatura d'un dipòsit d'aigua?

## 9.6. Transductors

El desenvolupament tecnològic en el camp industrial no hauria estat tan gran i espectacular en les darreres dècades si, malgrat els sofisticats circuits de processament de senyals, no es disposés d'elements encarregats de captar, traduir i convertir en senyals elèctrics les diferents magnituds físiques que intervenen en els processos industrials. Aquests elements són els anomenats *transductors*.

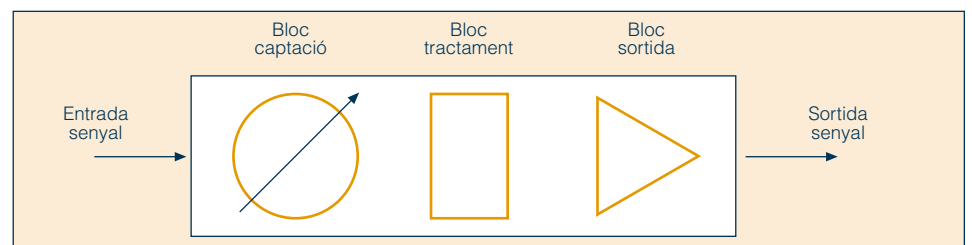
Encara que no tots els transductors proporcionen una sortida de tipus elèctric, el terme *transductor* s'associa a dispositius que proporcionen a la seva sortida alguna magnitud elèctrica o magnètica. En aquest apartat ens centrarem en aquest tipus de transductors.

*Els transductors són dispositius que transformen una magnitud física en una altra magnitud física, sovint un senyal elèctric, entre les quals hi ha una relació determinada.*

### Estructura d'un transductor

En un transductor podem distingir les parts següents:

- **Element sensor o captador.** Converteix les variacions d'una magnitud física en variacions d'una magnitud elèctrica o magnètica, anomenada comunament *senyal*.
- **Bloc de tractament de senyal.** Quan hi és present, té com a funció filtrar, preamplificar, etc. i, en general, tractar el senyal obtingut pel captador per acoblar-lo a l'entrada de l'etapa de sortida.
- **Etapa de sortida.** Comprèn els amplificadors, relés, convertidors de codi, transmissors i, en general, tots aquells circuits que adapten el senyal a les necessitats de la càrrega exterior.



Estructura genèrica d'un transductor.

Un transductor ideal serà aquell en què la relació entre la magnitud de sortida i la variable d'entrada sigui proporcional per a tots els règims de funcionament. Una altra característica important serà que absorbeixi el mínim d'energia durant el procés de mesurament, amb l'objectiu de no influir sobre la magnitud a mesurar.

## Classificació de transductors

Els transductors poden ser de caràcter actiu o passiu, segons si són ells els que generen directament el senyal captat o necessiten una alimentació externa per captar el senyal. També es poden classificar tenint en compte la manera de codificar la magnitud mesurada; en aquest sentit podem classificar-los en **analògics**, **digitals** i **tot o res**.

Una altra classificació que podem fer dels transductors, segons la magnitud física a detectar, és la que es mostra a la taula següent, la qual contempla un resum dels més freqüents emprats en automatismes industrials.

Magnitud detectada	Tipus de Transductor	Característica
Posició	Final de cursa	Tot-res
	Microruptor	Tot-res
Proximitat	Inductiu	Tot-res
	Capacitiu	Tot-res
	Òptic	Tot-res
	Magnètic	Tot-res
Desplaçament lineal o deformacions	Potenciòmetre lineal	Analògic
	Làser	Analògic
	Ultrasònics	Analògic
	Galgues extensomètriques	Analògic
Desplaçament o posició angular	Potenciòmetres circulars	Analògic
	Encoder absolut i incremental	Digital
	Sincro i resolvent	Analògic
Velocitat lineal o angular	Encoder incremental	Digital
	Dinamo tacomètrica	Analògic
	Detector inductiu o òptic	Digital
Temperatura	Termòstat	Tot-res
	Termoparell	Analògic
	Termoresistència Pt100, PTC i NTC	Analògic
	Piròmetre de radiació	Analògic
Pressió	Mecànic (Pressòstat)	Tot-res
	Membrana + detector desplaçament	Analògic
	Piezoelèctrics	Analògic

### Transductors de posició

Els **transductors de posició** són fonamentalment elements d'acció *tot o res*, els quals detecten la presència o posició d'un objecte en un punt concret, determinat per la col·locació física de l'element detector. Dins d'aquest apartat podem incloure els **finals de cursa** i els **microruptors**.



Finals de cursa i microruptors.

- **Finals de cursa.** Se'ls anomena també *interruptors de posició*. Són dispositius que activen i desactiven els seus contactes mitjançant l'acció mecànica sobre l'actuador que porten incorporat (polsador, palanca, rodets, vareta elàstica, etc.).

- **Microruptors.** Són funcionalment idèntics als finals de cursa industrials, però constructivament diferents: actuen amb menor força d'accionament, són més petits, els seus contactes tenen menor capacitat de tall, el grau de protecció és menor i són molt menys resistents a ambients agressius.

### Transductors de proximitat

Els **detectors de proximitat** fan, bàsicament, la mateixa funció que els detectors de posició, és a dir, detecten la proximitat o presència d'un objecte i donen, normalment, una resposta tot o res, encara que també hi ha models amb sortida analògica. Es diferencien, bàsicament, dels transductors electromecànics de posició en el fet que capten l'objecte sense necessitat que s'exerceixi un contacte físic o esforç mecànic. Això els confereix interessants avantatges, com ara un menor desgast, una major vida útil, resistència a ambients agressius i la possibilitat de poder realitzar major freqüència d'operacions.



Transductors de proximitat.

Aquest tipus de transductors estan basats en diferents tipus de captadors, però els més freqüents són els **detectors inductius**, els **detectors capacitius**, els **detectors òptics** i els **detectors magnètics**.

- **Detectors inductius.** Es basen en els efectes que causa un objecte metàl·lic en ser introduït en un camp magnètic altern, el qual és generat per una bobina inductora, implicada elèctricament en un oscil·lador (aparell electrònic destinat a produir oscil·lacions) *LC*.

- **Detectors capacitius.** Són capaços de detectar qualsevol objecte, metàl·lic o no (líquids conductors i no conductors, objectes metàl·lics, substàncies en pols o en gra, etc.), que s'introdueixi en el camp d'actuació del detector. El principi de funcionament i les característiques són anàlogues a les descrites per als detectores inductius, però en aquest cas s'utilitza un camp elèctric com a fenomen físic perquè reaccioni davant l'objecte a detectar. L'element sensible és un condensador.

- **Detectors òptics.** Aquests tipus de detectores empren fotocèl·lules com a elements de detecció. Se'ls coneix també com a *detectores fotoelèctrics* o *fotocèl·lules*. L'element sensible detecta l'objecte per absència o presència d'un feix lluminós. Al mercat hi ha una gran varietat de detectores òptics. Els de fibra òptica permeten detectar objectes molt petits, com ara marques d'1 mm sobre peces que es mouen a gran velocitat (30 m/s) o objectes estàtics de 20 micres de diàmetre.

- **Detectors magnètics.** Es basen en l'efecte que provoca un camp magnètic d'un imant permanent sobre un parell de llengüetes enfrontades i introduïdes en un petit tub de vidre amb un determinat gas. Les llengüetes, construïdes amb materials magnètics, s'uneixen o se separen depenent de si és present o no l'imat. Aquest tipus de contactes magnètics s'anomenen *contactes Reed*.

### Transductors de desplaçament

Dins d'aquest apartat de **transductors de desplaçament** considerem els indicadors de posició lineal o angular per a grans distàncies, coneguts també com a sistemes de mesurament de coordenades, i els detectores de petites deformacions o detectores de presència d'objectes a una certa distància que donen un senyal analògic o digital proporcional a aquesta distància. Poden complir una funció similar a la dels transductors de proximitat, només que la informació subministrada no sol ser de tipus binari, tot o res. Els tipus més característics dins d'aquesta categoria són els potenciòmetres, els codificadors, els sensors ultrasònics, els sensors làser, els síncrons i resòlvers i les galgues extensomètriques.

### Transductors de velocitat

En el sector industrial, la mesura de la velocitat forma part d'un gran nombre de sistemes de control. Els transductors de velocitat poden ser analògics, si es basen en generadors de CC (com les dinamos tacomètriques), i digitals, si es basen en la detecció de freqüència d'un generador de polsos amb captadors òptics o inductius (codificadors, etc.).

### Transductors de temperatura

La temperatura és un dels paràmetres que més sovint cal mesurar en processos industrials. Els transductors tèrmics més importants són els termòstats, els termoparells, les termoresistències i els piròmetres de radiació.



Transductors de temperatura.

## Transductors de pressió

La pressió és una altra de les magnituds, la regulació i control de la qual es realitza amb més freqüència dins dels processos industrials. Els transductors de pressió solen estar basats en la deformació d'un element elàstic (membrana, diafragma, molla, etc.), el moviment del qual sota l'acció del fluid és detectat per un sensor de petits desplaçaments (galga extensomètrica, element piezoelèctric, etc.) del qual s'obté un senyal elèctric proporcional a la pressió.

A vegades la deformació produïda per la pressió es fa servir per activar i desactivar uns contactes elèctrics; és el cas dels **pressòstats**, components tot o res emprats en sistemes de subministrament de fluids mitjançant bombes elèctriques i en sistemes d'acumulació de pressió.

Malgrat això, algunes vegades desitgem obtenir un senyal elèctric proporcional a la magnitud de pressió mesurada, per a la qual cosa es mesura indirectament la força o la deformació de l'element elàstic fent servir diferents sistemes de transductors: piezoelèctrics, galgues extensomètriques, inductius, capacitius, etc.



Transductors de pressió.

Els transductors **piezoelèctrics** són sensors de deformació o indirectament de força, parell o pressió. Es basen en la propietat que tenen alguns elements cristal·lins, com ara el quars, la turmalina i altres materials sintètics, que són capaços de produir electricitat per l'efecte d'una pressió.

Els transductors de pressió poden ser emprats per mesurar pressions absolutes, diferencials i relatives i, fins i tot, per mesurar magnituds diferents de la pressió, com ara el cabal o el nivell de líquids.

## exercicis

29. Quins són els elements encarregats de captar, traduir i convertir en senyals elèctrics les diferents magnituds físiques que intervenen en els processos industrials?
30. Quines característiques principals hauria de reunir un transductor ideal?
31. D'acord amb la manera de codificar la magnitud mesurada, com podem classificar els transductors? Explica breument els aspectes més rellevants de cada tipus.
32. A quins tipus de transductors pertanyen els finals de cursa, d'acord amb la magnitud física a detectar? Com activen i desactiven els seus contactes?
33. Quin tipus de transductor empraries per detectar cereals?
34. Quin tipus de transductor faries servir per detectar la presència d'un objecte a 20 metres?
35. Per efectuar mesures de temperatura, quins transductors utilitzaries?
36. En un sistema de subministrament d'aire comprimit, per mitjà d'un compressor i un acumulador, quin transductor de pressió faries servir per mantenir constant la pressió?



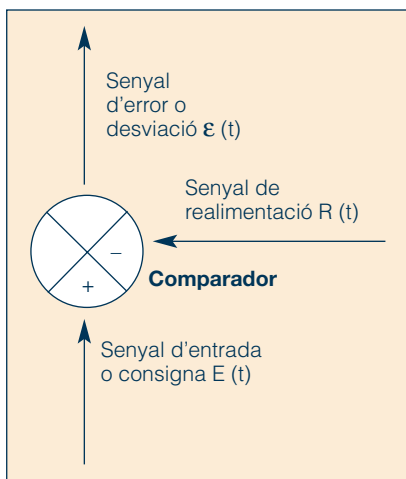
# Generadors de consigna, comparadors i actuadors

## Generadors de valors de consigna

El **generador del valor de consigna** o de referència consisteix en un dispositiu capaç de generar un senyal de referència, el qual s'aplicarà al comparador amb l'objecte de confrontar-lo amb el senyal realimentat procedent del sensor, i així generar el senyal d'error. Els senyals més utilitzats com a variables de referència solen ser la tensió i el corrent elèctric, la pressió pneumàtica o una posició mecànica.

Un exemple de generador de valor de consigna és el caragol que permet separar o aproximar els contactes que obre i tanca una làmina bimetal·lica en un control de temperatura mitjançant un termòstat. El senyal de consigna és una posició que està directament relacionada amb la variable de sortida, que en aquest cas és la temperatura.

Un altre valor de consigna el podríem obtenir a través d'un potenciómetre o divisor de tensió, que proporcionarés al comparador un senyal en forma de resistència o en forma de tensió.



Funcionament del comparador.

## Comparadors

El **comparador**, anomenat també *detector d'error*, és el dispositiu encarregat de comparar el valor de referència amb el valor mesurat de la variable de sortida a través del transductor de realimentació. El resultat d'aquesta comparació constitueix l'error de funcionament o desviació de la sortida respecte al valor previst. El dispositiu comparador sol formar part de la unitat de control.

Els procediments tecnològics per realitzar la comparació són diversos, d'acord amb els tipus de senyals a comparar. Els comparadors més importants són elèctrics, entre els quals podem esmentar els *potenciómetres*, les dinamos tacomètriques, els comparadors electromagnètics i capacitius, els circuits integrats electrònics analògics i digitals, etc.

## Actuadors i preactuadors

Anteriorment ja hem definit els **actuadors** o **accionadors** com els dispositius que s'encarreguen de regular la potència d'un procés o d'un automatisme. Moltes vegades no poden governar-se directament des de la unitat de control i requereixen algun preaccionament per amplificar el senyal de comandament.

La gamma d'actuadors que pot governar un sistema de control és molt àmplia i diversa. D'acord amb la tecnologia emprada, podem classificar-los en:

- Actuadors electromecànics (motors, servomotors).
- Actuadors pneumàtics (cilindres, motors pneumàtics).
- Actuadors hidràulics (cilindres, motors hidràulics).
- Actuadors tèrmics i frigorífics (forns, cambres frigorífiques, estufes,...).
- Actuadors lumínics (làmpades, lluminàries, etc.).

Pel que fa als **preactuadors** o **preaccionadors**, els més freqüents són els relés, contactors, vàlvules distribuïdores, servovàlvules, variadors de tensió, etc. Tant els accionaments com els preaccionaments poden ser del tipus tot o res o de tipus continu (analògic o digital).

## Servomotors

Un **servomotor** és un motor emprat en un servomecanisme per produir moviments lineals o rotatius. Sol consistir en un cilindre pneumàtic o hidràulic o també en un electroimant, per a desplaçaments rectilinis; o bé en un motor elèctric, per a moviments rotatius. Per tant, podem distingir **servomotors elèctrics** i **servomotors hidropneumàtics**.

Els **servomotors elèctrics** són petites màquines electromecàniques dissenyades per al control de posició amb gran precisió. El principi de funcionament d'un **servomotor de CC** és el d'una màquina de corrent continu (CC) convencional amb excitació independent, la forma constructiva de la qual està adaptada per obtenir un comportament dinàmic ràpid i estable i un parell d'arrencada important.

Per accionaments de certa potència, el motor de corrent altern (CA) presenta diversos avantatges enfront el de corrent continu, el principal dels quals és l'absència de col·lector i d'escombretes. El motor asíncron convencional no és apropiat per a molts servosistemes que requereixin certa precisió, a causa del lliscament i de la poca linealitat parell-velocitat que presenta. Tanmateix, són molt utilitzats, juntament amb variadors de freqüència i amb un control de llaç tancat adequat, per a accionaments de velocitat variable atès que poden ser obtingudes precisions acceptables.

Ara bé, en parlar de **servomotors de CA** per a sistemes de posició i petita potència, comunament ens referim als motors de corrent altern síncrons i als de reluctància, els quals no presenten problemes de lliscament i permeten d'obtenir una gran precisió.

## Visualitzadors



Visualitzadors.

En un sistema de control automàtic també sol haver-hi elements de sortida d'informació que s'encarreguen de la comunicació amb l'operador: són els **visualitzadors** o **presentadors**, els quals donen informació de l'estat del procés i de l'automatisme. Entre els més habituals cal esmentar els següents: bombetes, LEDS o pilots, timbres, sirenes, visualitzadors numèrics, pantalles de cristall líquid, etc.

Els elements binaris són els que donen informacions del tipus sí/no, cert/fals, activat/desactivat, etc. Cal assenyalar els pilots, els LEDS, els timbres, etc.

Els elements numèrics i alfanumèrics permeten la visualització de números i textos. Els més senzills són els *displays* de 7 segments i els *displays* alfanumèrics; d'altres de més complexos són les pantalles de cristall líquid i els monitors, que permeten presentar gràfics, dibuixos, esquemes sinòptics animats...

## exercicis

37. Per a què serveix un generador de valor de consigna o de referència en un sistema de control de llaç tancat? Cita'n algun exemple.
38. Quin element d'un sistema de control de llaç tancat s'encarrega de comparar la variable de sortida amb el valor de consigna prefixat?
39. Quin element d'un bucle de control s'utilitza per reduir els errors?
40. Què són els actuadors? Classifica'ls d'acord amb la tecnologia emprada i posa'n exemples.
41. Per a què serveixen els preactuadors? Anomena'n uns quants.
42. Quan és adient fer servir els servomotors? Quins avantatges aporta la seva utilització respecte del motor asíncron convencional?

# Acabem

- 1.** En un automatisme, el controlador és:
  - a) L'element que permet a l'operador l'entrada de dades i ordres.
  - b) L'element de sortida d'informació.
  - c) La unitat de tractament de la informació del procés.
  - d) L'encarregat d'operar sobre el procés.
  
- 2.** El principal inconvenient d'un sistema de control automàtic de llaç obert és que:
  - a) Té problemes de connexió.
  - b) El senyal de sortida no té efecte sobre l'entrada.
  - c) És més car que un de llaç tancat.
  - d) Té problemes d'estabilitat.
  
- 3.** En un sistema automàtic de llaç tancat:
  - a) El senyal de sortida no té efecte en la resposta de l'automatisme.
  - b) El senyal de sortida té efecte en la resposta de l'automatisme.
  - c) El senyal de sortida és igual al d'entrada.
  - d) El senyal de sortida és més petit que el d'entrada.
  
- 4.** Els actuadors i preactuadors són:
  - a) Els dispositius que prenen les dades de la situació del procés.
  - b) Els elements que permeten actuar sobre el controlador.
  - c) Els dispositius que permeten establir la comunicació amb l'operador.
  - d) Els encarregats d'operar sobre el procés o dispositiu a controlar.
  
- 5.** Quins elements no solen formar part d'un automatisme de llaç obert?
  - a) Sensor.
  - b) Controlador.
  - c) Actuador.
  - d) Visualitzador.
  
- 6.** Un final de cursa és:
  - a) Un transductor de proximitat.
  - b) El final d'un procés.
  - c) Un sensor de posició.
  - d) Un mecanisme intermedi de transmissió.
  
- 7.** Un termòstat en un sistema de control és:
  - a) Un sensor.
  - b) Un regulador.
  - c) Un comparador.
  - d) Cap dels anteriors.
  
- 8.** Una dinamo tacomètrica és un:
  - a) Mecanisme de comprovació.
  - b) Transductor de velocitat.
  - c) Controlador mecànic.
  - d) Motor que processa senyals.
  
- 9.** El principal inconvenient del control proporcional és que:
  - a) L'efecte és lent i progressiu.
  - b) Produeix desviació permanent.
  - c) És poc enèrgic.
  - d) Produeix efecte d'anticipació.
  
- 10.** Quin tipus de control és capaç d'anul·lar les desviacions permanents?
  - a) Control proporcional.
  - b) Control integral.
  - c) Control derivatiu.
  - d) Cap dels anteriors.
  
- 11.** En un sistema de control automàtic també sol haver-hi elements de sortida d'informació que s'encarreguen de la comunicació amb l'operador, són els ....., els quals donen informació de l'estat del procés i de l'automatisme. Entre els més habituals cal esmentar els següents: .....