

## 1 Concetti introduttivi

È evidente come nella società moderna le macchine sostituiscano sempre di più l'uomo nello svolgimento di determinati lavori; nel linguaggio corrente tali macchine si dicono *automatiche*.

Nell'ambiente che ci circonda le *macchine automatiche* sono sempre più numerose; si citano per il settore *civile* ad esempio *lavatrici*, *lavastoviglie* e altri elettrodomestici, *distributrici automatiche* (di biglietti, di generi alimentari, di giornali e riviste, di medicinali).

Fra i numerosissimi esempi che potrebbero essere citati nel settore delle *lavorazioni industriali* il più classico è il *tornio a controllo numerico* impiegato per la lavorazione di pezzi meccanici.

I **sistemi automatici**, che comprendono macchine che agiscono in questo senso, sono talmente importanti che, di pari passo con l'evoluzione tecnologica, si è creata una *letteratura tecnica* propria del settore; conseguente è l'impiego di termini come *automatico*, *automazione* e *processo* ai quali è stato assegnato un significato ben preciso.

► Un sistema si dice **automatico** se ha la capacità di sostituire l'uomo nell'effettuare un'azione prevista dall'uomo stesso per ottenere un effetto anch'esso previsto.

Sempre di pari passo con l'evoluzione tecnologica sono state definite e affinate tutte quelle tecniche atte a rendere automatico un sistema; conseguente è una possibile definizione del termine automazione.

► **Automazione** è l'insieme delle tecniche necessarie per rendere automatico un sistema.

Le macchine che fanno parte di un sistema automatico eseguono sempre sequenze ben definite di operazioni elementari; conseguente è una possibile definizione del termine processo.

► **Processo** è una sequenza temporale di operazioni coordinate e finalizzate al raggiungimento di un obiettivo.

Il termine *processo* veniva riferito inizialmente alle sole lavorazioni industriali; ha assunto in seguito un significato più ampio tanto da riguardare il funzionamento di ogni tipo di sistema.

Nel corso di un processo il sistema viene a trovarsi in una successione di stati a seguito di trasformazioni imposte al sistema da opportune sollecitazioni.

Poiché un processo può essere considerato come una particolare modalità di funzionamento di un sistema, ne consegue che per lo stesso sistema possono essere definiti più processi.

In relazione a come avvengono le operazioni che costituiscono un processo, si può definire il processo stesso:

- *continuo*, se le operazioni che lo costituiscono avvengono contemporaneamente e con continuità;
- *semicontinuo*, se è composto da più processi continui che si susseguono uno dopo l'altro;
- *discreto*, se le operazioni che lo costituiscono avvengono in sequenza e sono di breve durata.

## 2 Sistemi di controllo

► *Sistema di controllo* o *regolatore* è quell'insieme di apparecchiature che agiscono sul *sistema controllato* in modo tale da far assumere alle variabili d'uscita dei valori opportuni per il *sistema* da controllare.

Nella terminologia tipica dei *sistemi automatici* si è soliti identificare le grandezze caratteristiche tipiche con i termini seguenti:

- *variabili manipolabili*;
- *variabili non manipolabili* o *disturbi*;
- *variabili controllate*.

► Le **variabili manipolabili** sono gli ingressi del sistema su cui si può agire per ottenere dalle uscite il comportamento desiderato.

Il *regolatore* agisce sulla *variabile manipolabile* in relazione alle *informazioni* che gli vengono inviate in ingresso.

► I **disturbi** sono considerati variabili d'ingresso dannose per il sistema stesso poiché agiscono in modo non prevedibile e sulle quali non si può influire.

Il sistema di controllo deve agire in modo tale da compensare gli effetti prodotti dai disturbi.

► Le **variabili controllate** sono le uscite del sistema ossia quelle su cui si vuole influire attraverso il *sistema di controllo*.

Si consideri come esempio un liquido di cui si vuole mantenere costante la temperatura al variare della temperatura esterna all'ambiente in cui è immerso; il liquido e l'ambiente in cui è immerso rappresentano il *sistema controllato*; la temperatura del liquido rappresenta la variabile che si vuole controllare o *variabile controllata*.

La temperatura del liquido può essere mantenuta costante agendo sulla potenza fornita da un riscaldatore a resistenze; in questo senso la potenza del riscaldatore può essere considerata come una *variabile manipolabile*.



Una variazione della temperatura dell'ambiente in cui è immerso il liquido può essere considerata un disturbo ovvero un qualcosa di non prevedibile che tende a modificare la temperatura del liquido.

## 2.1 Tipi di regolazione

In relazione ai valori che la variabile controllata assume nel corso di una particolare evoluzione di un sistema si possono definire tipologie di regolazione tra loro differenti e precisamente:

- *regolazioni a valore fisso;*
- *regolazioni a valore programmato;*
- *regolazioni a valore asservito.*

Se la grandezza controllata viene mantenuta costante nel tempo, come nel caso del controllo della temperatura di un liquido, si utilizza il termine **regolazione a valore fisso**.

Quando la grandezza controllata assume nel tempo un numero finito di valori si usa il termine **regolazione a valore programmato**.

Un esempio classico è il sistema di regolazione della temperatura di un ambiente nell'arco della giornata.

Se invece la grandezza controllata assume nel tempo un numero infinito di valori si utilizza il termine **regolazione a valore asservito** o *asservimento*.

È il caso di una grandezza controllata che deve seguire, secondo un andamento ben definito, le variazioni di un'altra grandezza che la pilota; tipico esempio è il *servosterzo* da cui il termine *servomeccanismi* attribuito a questi dispositivi.

## 2.2 Schemi fondamentali

In relazione al modo di operare che viene richiesto al sistema di controllo si possono scegliere:

- *strutture ad anello aperto;*
- *strutture ad anello chiuso.*

I termini *anello aperto* e *anello chiuso* derivano dalla possibilità o meno di individuare un *percorso chiuso del segnale*.

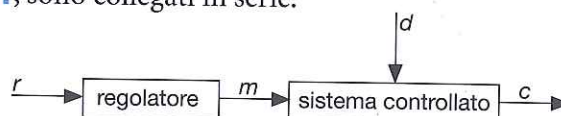
Dal punto di vista applicativo i *sistemi di controllo* che impiegano *strutture ad anello chiuso* sono i più importanti.

Nelle applicazioni pratiche le due tecniche possono coesistere per poter usufruire contemporaneamente dei vantaggi derivanti dall'utilizzo dell'uno e dell'altro tipo di struttura.

## 3 Struttura ad anello aperto

Il *regolatore* e il *sistema controllato*, come evidenziato nello schema a blocchi di FIGURA 1, sono collegati in serie.

FIGURA 1  
Schema a blocchi di una struttura ad anello aperto.



Il significato dei simboli adottati per i segnali è il seguente:

- $r$  è il *segnale di riferimento*;
- $m$  è la *variabile manipolabile*;
- $c$  è la *variabile controllata*;
- $d$  sono i *disturbi*.

Il *segnale di riferimento* rappresenta in una struttura ad anello aperto l'unica informazione ricevuta dal regolatore.

Da un'analisi dello schema a blocchi si può desumere che il valore della *variabile manipolabile* viene determinato dal *regolatore* senza che venga effettuata alcuna verifica sul valore assunto dalla variabile controllata; né d'altra parte questo sarebbe possibile a causa della sua struttura che non presenta *percorsi chiusi*.

Un sistema che impiega questa struttura si definisce **sistema di controllo ad anello aperto**.

Un sistema che ha queste caratteristiche non è in grado di verificare in alcun modo il valore assunto dalla variabile controllata in quanto il suo valore viene *impostato a priori* attraverso la variabile di riferimento; è proprio questa sua incapacità che rende i sistemi di controllo ad anello aperto insensibili sia alle variazioni dei parametri rispetto al valore considerato in fase di progetto sia ai disturbi.

Si può concludere che un sistema di controllo ad anello aperto è molto semplice da realizzare ma che la sua *bontà* è fortemente vincolata dalla *stabilità dei parametri* propri degli elementi che costituiscono il sistema stesso e dalla *natura dei disturbi*.

Gli inconvenienti ora descritti ne limitano quindi notevolmente l'uso.

Si consideri come esempio il *sistema di controllo della velocità di un motore alimentato in continua*.

Lo schema a blocchi viene riportato in FIGURA 2.

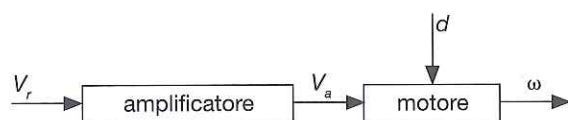


FIGURA 2

Schema a blocchi per il controllo della velocità di un motore alimentato in continua.

Il sistema controllato è il motore; la velocità dell'albero motore  $\omega$  si modifica agendo sulla tensione applicata ai morsetti del motore (*tensione di armatura  $V_a$* ).

La tensione di armatura è la *variabile manipolabile*, la velocità di rotazione dell'albero motore è la *variabile controllata*.

Il compito proprio del regolatore può essere affidato a un *amplificatore di tensione* progettato in modo tale che l'uscita sia sufficientemente potente da pilotare il *circuito d'armatura  $V_a$*  del motore (è il circuito che alimenta il motore stesso che necessita di tensioni più elevate di quelle che vengono prodotte dal dispositivo che genera il segnale di riferimento).

La tensione d'ingresso al regolatore è il *segnale di riferimento  $V_r$* ; il segnale può essere generato attraverso un semplice partitore di tensione regolabile attraverso un *potenziometro*; a ciascun valore di tensione impostato per mezzo del potenziometro corrisponde una ben determinata velocità del motore.

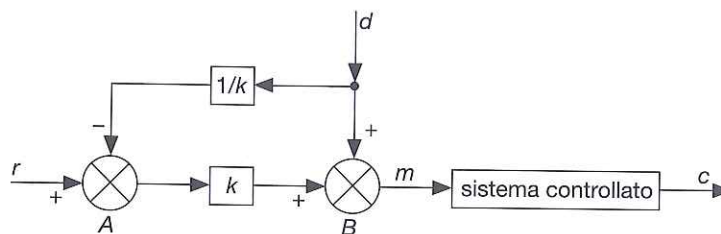


### 3.1 Compensazione dei disturbi

In un sistema di controllo ad anello aperto è possibile compensare l'effetto prodotto dai disturbi soltanto se questi sono *prevedibili e misurabili*.

In FIGURA 3 viene riportato lo schema a blocchi di un sistema di controllo ad anello aperto con possibilità di compensazione dei disturbi.

FIGURA 3  
Schema per la compensazione di disturbi prevedibili e misurabili.



Si suppone che i blocchi situati a monte del disturbo siano equivalenti a un blocco di cui si conosce la f.d.t. (indicata con  $k$ ).

Lo schema è caratterizzato dalla presenza dei *nodì sommatori* A e B; il disturbo viene sottratto al segnale nel nodo A e sommato nel nodo B.

Il nodo B è un nodo *fittizio* al quale non corrisponde nulla di fisico; serve soltanto per individuare il punto di azione del disturbo.

Il nodo A è un componente del sistema; a esso viene inviato un segnale che simula l'effetto prodotto dal disturbo attraverso un blocco la cui f.d.t. vale proprio  $1/k$ ; il metodo di compensazione sarà tanto più efficace quanto più la f.d.t. è nota con esattezza.

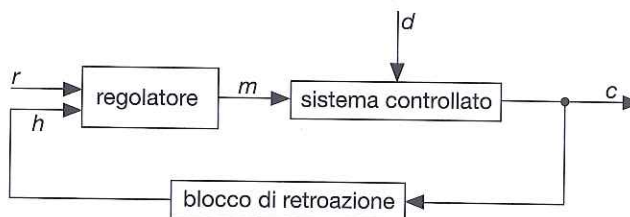
La validità dello schema può essere dimostrata verificando l'indipendenza della variabile manipolabile  $m$  dai disturbi; utilizzando le proprietà degli schemi a blocchi si ottiene facilmente:

$$m = d + k \cdot (r - d/k) = d + k \cdot r - k \cdot d/k = d + k \cdot r - d = k \cdot r$$

## 4 Struttura ad anello chiuso

Nel suo complesso la *struttura ad anello chiuso*, come evidenziato in FIGURA 4, è quella tipica di un collegamento di blocchi in retroazione.

FIGURA 4  
Schema a blocchi di una struttura ad anello chiuso.



Elementi caratterizzanti della struttura sono il *regolatore* e il *sistema controllato*, disposti in serie a costituire il *blocco di andata* e il *blocco di retroazione*.

In ingresso al regolatore vengono inviati il *segnale di riferimento*  $r$  e il *segnale di retroazione*  $h$  la cui entità dipende dal valore assunto dalla variabile controllata.

Il valore della variabile manipolabile viene determinato in base a misure effettuate sulla variabile controllata realizzando un'azione di controllo vera e propria che non avveniva nei sistemi ad anello aperto.

Questa possibilità, dovuta alla presenza di un *percorso chiuso del segnale*, rende un sistema che adotta questa struttura meno sensibile a disturbi e variazioni di parametri rispetto alla struttura ad anello aperto.

Un sistema che impiega questa struttura si definisce **sistema di controllo ad anello chiuso** o **sistema retroazionato**.

Il modo di operare di una *struttura ad anello chiuso* può essere sintetizzato nel modo seguente:

- la *variabile controllata*  $c$  viene prelevata in uscita e inviata al blocco di retroazione;
- la variabile controllata viene modificata in modo opportuno nel blocco di retroazione;
- il *segnale di retroazione*  $h$  viene confrontato continuamente con il *segnale di riferimento*  $r$ ;
- dallo scarto tra queste due grandezze deriva un'azione che tende ad annullare tale differenza con lo scopo di regolare il segnale di uscita attraverso la *variabile manipolabile*  $m$  che agisce sul sistema controllato soggetto ai disturbi  $d$ .

Il regolatore, come evidenziato in FIGURA 5, comprende in particolare un **nodo di confronto** tra segnali di *riferimento* e di retroazione e un **sistema controllante** vero e proprio.

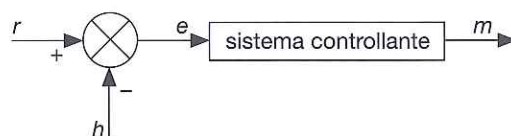


FIGURA 5  
Particolare del regolatore.

Le informazioni fornite dal nodo di confronto attraverso il *segnale errore*  $e$  vengono interpretate dal sistema controllante che agisce sul sistema controllato attraverso la *variabile manipolabile*  $m$ .

È evidente come nelle strutture ad anello chiuso si interviene sullo sviluppo del processo quando esiste uno scostamento tra il valore desiderato (impostato attraverso il segnale di riferimento) e il valore rilevato (misurato attraverso il blocco di retroazione).

Il fatto che al segnale di retroazione sia stato attribuito il segno  $-$  non è casuale in quanto la scelta del segno  $+$  non ha, almeno per i sistemi di controllo, un significato pratico.

#### 4.1 Funzione dei trasduttori

È anche di fondamentale importanza notare che quello che di solito avviene nel blocco di retroazione è una modifica della natura della grandezza controllata che deve essere resa compatibile con il segnale di riferimento (che può essere una tensione o una corrente); per questo motivo l'elemento fondamentale di un blocco di retroazione è il *trasduttore*, dispositivo capace di operare questa trasformazione; se ad esempio la variabile controllata è



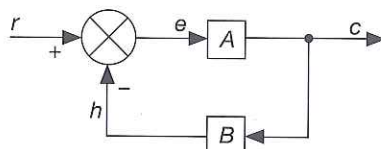
una velocità angolare e il segnale di riferimento una tensione, il trasduttore deve effettuare la conversione da  $\omega$  a  $V$ .

In genere i termini *trasduttore* e *sensore* si confondono; con il termine *sensore* viene spesso inteso l'*elemento sensibile alle variazioni della grandezza controllata*, con il termine *trasduttore* un dispositivo che comprende il sensore e il circuito elettrico necessario per ottenere in uscita una grandezza utilizzabile.

## 4.2 Proprietà della retroazione negativa

Con le notazioni introdotte per i sistemi automatici viene riportato in FIGURA 6 lo schema a blocchi di un sistema retroazionato negativamente.

FIGURA 6  
Schema a blocchi di un sistema retroazionato negativamente.



Il blocco  $A$  rappresenta il *blocco di andata* (insieme del *regolatore* e del *sistema controllato*),  $B$  è il blocco di *retroazione*.

In un sistema retroazionato il *ramo di andata* è caratterizzato dalla presenza di un segnale diretto dall'ingresso verso l'uscita, il *ramo di retroazione* dalla presenza di un segnale diretto in senso contrario.

La f.d.t. di un sistema retroazionato si ricava applicando le formule relative all'*algebra degli schemi a blocchi*.

Si indica con  $A$  la generica f.d.t. del blocco di andata, con  $B$  quella del blocco di retroazione.

Prendendo in esame il solo caso della retroazione negativa e considerando come ingresso la variabile di riferimento, si possono considerare tre differenti f.d.t. in relazione al segnale scelto come uscita (variabile controllata, segnale errore, segnale di retroazione); risulta rispettivamente

$$G = \frac{c}{r} = \frac{A}{1 + AB}$$

se la variabile scelta come uscita è la variabile controllata,

$$G = \frac{e}{r} = \frac{1}{1 + AB}$$

se la variabile scelta come uscita è il segnale errore,

$$G = \frac{h}{r} = \frac{AB}{1 + AB}$$

se la variabile scelta come uscita è il segnale di retroazione.

Al prodotto  $AB$  viene assegnato il termine **f.d.t. ad anello aperto**.

L'uso di questo termine deriva dal fatto che, imponendo nello schema a blocchi un segnale di riferimento uguale a zero, si viene a formare un percorso del segnale chiuso ad anello; interrompendo l'anello in un punto qualsiasi il rapporto tra segnale d'uscita e segnale d'ingresso risulta sempre dato dal prodotto  $AB$ .