

1. Classificazione dei sistemi di controllo

Le continue innovazioni tecnologiche e la disponibilità di circuiti integrati sempre più complessi, consentono oggi un impiego sempre più diffuso dei sistemi di controllo non solo in ambito industriale, ma anche in ambito civile e domestico. I sistemi di controllo, infatti, sono utilizzati nelle centrali di produzione dell'energia elettrica, nei cicli di produzione delle piastre di silicio e nella fabbricazione dei dispositivi integrati, nella guida dei veicoli spaziali, nei frigoriferi e nei forni a microonde per regolare la temperatura, ecc.

Un sistema di controllo è un apparato che consente di variare o di mantenere costante la grandezza o le grandezze d'uscita in relazione ad un'evoluzione temporale predeterminata dalle necessità sperimentali.

Per comprendere quali siano gli scopi di un sistema di controllo si consideri il seguente esempio. In un impianto di riscaldamento centralizzato di un edificio è necessario riscaldare l'acqua, in modo che la temperatura all'interno delle singole abitazioni sia tale da assicurare alle persone le migliori condizioni ambientali. La temperatura dell'acqua immessa nei radiatori, al fine di compensare le perdite di calore che si hanno attraverso: le pareti e le finestre, deve essere innalzata o abbassata, in relazione all'abbassamento o innalzamento di temperatura che avviene nell'ambiente esterno a quello che deve essere riscaldato. L'impianto deve fornire la giusta quantità di calore affinché la temperatura all'interno delle singole abitazioni sia quella programmata. A tal fine possono essere utilizzate tecnologie diverse. Un semplice termostato può regolare la temperatura dell'acqua all'interno della caldaia in modo che non scenda sotto 60 °C e non superi 80 °C, indipendentemente dalle variazioni delle condizioni climatiche ed ambientali che si verificano.

È evidente che tale tecnologia comporta un dispendio di energia nelle giornate calde e, forse, una temperatura non adeguata all'interno delle abitazioni nelle giornate più fredde.

L'efficienza dell'impianto si può migliorare tarando opportunamente il termostato della caldaia dopo aver effettuato il rilevamento giornaliero della temperatura esterna e di quella interna.

Nella pratica, un circuito elettronico (centralina) confronta istante per istante la temperatura esterna/rilevata da una sonda posta all'esterno dell'edificio, con quella di riferimento e contemporaneamente comanda una valvola che regola il flusso di acqua calda ai radiatori, in modo che la temperatura interna agli ambienti riscaldati sia il più possibile vicina a quella prefissata.

I risultati saranno diversi a seconda delle tecnologie impiegate per il controllo. Per raggiungere l'obiettivo per il quale l'impianto è stato costruito, è necessario, innanzitutto, che esso sia adeguato alla cubatura e alle caratteristiche dell'edificio, e sia regolato in modo da fornire all'intero edificio la giusta quantità di calore in relazione alle condizioni climatiche. Dall'esempio sopra descritto è facile intuire che un sistema di controllo deve regolare la fornitura di energia affinché il funzionamento dell'impianto possa essere considerato ottimale.

Si ritiene utile, a questo punto, precisare il significato di alcuni termini che, apparsi nella esposizione fatta, sono ricorrenti nella teoria dei sistemi di controllo.

Processo: è l'insieme delle trasformazioni chimiche e/o fisiche che avvengono in un sistema attraverso una serie di cambiamenti graduali e continui che richiedono scambi di energia, di materiali e di informazioni (ad esempio il processo di produzione dello zucchero, di una macchina, di energia elettrica, ecc.).

Impianto: è l'insieme dei componenti in cui ha sede il processo e attraverso i quali esso si svolge. È chiaro che; l'impianto per poter svolgere la sua funzione deve essere rifornito di materiali e/o di energia. In questo testo il termine impianto indica l'oggetto fisico che deve essere controllato (forno, reattore chimico, veicolo, motore, ecc.).

Le caratteristiche dei sistemi di controllo permettono di classificarli come di seguito elencato:

- **Sistemi ad anello (catena) aperto.**
- **Sistemi on-off.**
- **Sistemi ad anello chiuso o con feedback.**
- **Sistemi di controllo a previsione o feedforward.**
- **Sistemi programmati.**
- **Sistemi a microprocessori.**

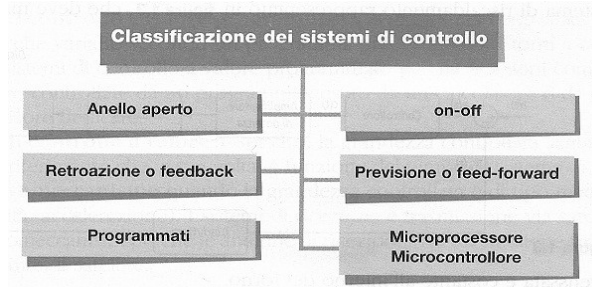
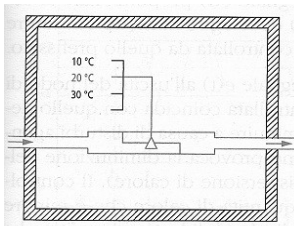


figura 1.1

1.1 Sistemi di controllo a catena aperta

Nei sistemi di controllo a catena aperta, il segnale di riferimento è generalmente predeterminato mediante un congegno di controllo tarato in sede di fabbricazione del sistema. Il sistema di riscaldamento di una stanza, rappresentato nella figura 1.2, è un esempio di sistema di controllo a catena aperta.



Un meccanismo agisce su una valvola che regola la quantità di calore che deve essere fornita alla stanza in un determinato intervallo di tempo affinché in essa si abbia la temperatura desiderata (grandezza di riferimento). Una parte del calore, però, fluisce verso l'esterno perché l'isolamento termico delle pareti della stanza non è mai perfetto. La temperatura interna della stanza è determinata dalla differenza tra la quantità di calore fornita al sistema in un determinato intervallo di tempo, così come previsto a causa della presenza della valvola regolatrice, e quella che, nello stesso intervallo di tempo, è dispersa nell'ambiente esterno.

A regime, raggiunto l'equilibrio termico, la temperatura all'interno della stanza rimane costante fino a quando la quantità di calore fornita dal radiatore è uguale a quella che fluisce verso l'esterno. È chiaro che in un sistema reale di questo tipo la variabile controllata non può essere valutata con precisione a causa di sopravvenute situazioni e condizioni impreviste: l'invecchiamento dei componenti, eventuali difetti del meccanismo di regolazione e della valvola possono far variare la quantità di calore fornita al sistema. Inoltre è da tener presente che la quantità di calore dispersa nell'ambiente può subire variazioni perché cambia la temperatura esterna o per altri motivi come l'apertura di una finestra, il deterioramento dell'isolamento termico delle pareti, ecc. Queste variazioni, che nel loro insieme costituiscono i disturbi agenti sul sistema, determinano uno scostamento tra temperatura misurata nella stanza e quella fissata preventivamente con il meccanismo di regolazione, sul quale dovrebbe intervenire manualmente un operatore per avere la temperatura desiderata.

Da quanto detto si può concludere che un sistema a catena aperta è sensibile alle variazioni del carico, alle variazioni dei parametri del sistema e ai disturbi esterni.

1.2 Sistemi di controllo a catena chiusa

Per eliminare le problematiche presentate dai sistemi a catena aperta, si utilizzano i sistemi di

regolazione automatica, detti anche sistemi di controllo a catena chiusa. Si consideri il sistema di riscaldamento rappresentato in figura 1.3, che deve mantenere una temperatura prefissata e costante all'interno del forno.

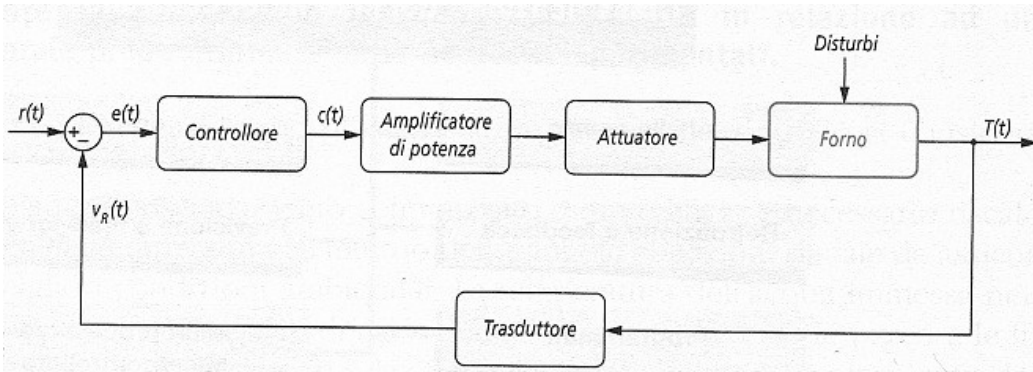


figura 1.3

In esso, a differenza del sistema a catena aperta sono presenti i blocchi di seguito elencati.

- **Blocco di retroazione:** è costituito da un trasduttore e dai relativi circuiti elettrici di condizionamento, il quale genera un segnale $v_R(t)$ proporzionale al valore istantaneo della grandezza controllata (nel caso specifico una tensione d'uscita proporzionale al valore istantaneo della temperatura misurata all'interno del forno).
- **Nodo seminatore o nodo di confronto:** è presente solo nei sistemi a catena chiusa costituisce l'elemento nel quale sono confrontati il valore attuale della grandezza controllata è quello della grandezza di riferimento o set-point. Il nodo di confronto è generalmente un amplificatore differenziale e genera il segnale attuatore $e(t)$, detto anche segnale differenza¹ o segnale errore, proporzionale alla differenza tra il segnale di riferimento $r(t)$ e quello di retroazione $v_R(t)$:

$$e(t)=r(t)-v_R(t)$$

- **Controllore:** è un circuito elettronico che genera un segnale $c(t)$ proporzionale al segnale attuatore o ad un'altra sua funzione. Il segnale $c(t)$ deve agire in modo da ridurre gradualmente lo scostamento del valore della grandezza controllata da quello prefissato.

In condizioni standard di funzionamento, l'ampiezza del segnale $e(t)$ all'uscita del nodo di confronto deve assicurare che il valore della grandezza controllata coincida con quello considerato. Tuttavia la grandezza d'uscita può aumentare o diminuire a causa di disturbi agenti sul sistema (ad esempio l'apertura dello sportello del forno provoca la diminuzione della temperatura al suo interno perché si ha una maggiore dispersione di calore). Il controllore deve operare in modo che il riscaldatore eroghi una quantità di calore che è minore nel primo caso e maggiore nel secondo. In entrambi i casi l'azione di autocorrezione ha termine quando la grandezza controllata ha raggiunto il valore prefissato.

Da quanto è stato detto si può comprendere che un sistema di controllo a catena chiusa è autoregolante quando alcune caratteristiche del sistema e, conseguentemente, la grandezza d'uscita subiscono variazioni dovute ai disturbi esterni. Inoltre il sistema di controllo a catena chiusa, rispetto a quello a catena aperta, è meno sensibile alle variazioni del carico e ai disturbi di varia natura. I sistemi di controllo analogici o a tempo continuo a catena chiusa si suddividono come di seguito

¹ Il segnale generato dal nodo di confronto è definito da molti autori segnale errore. In seguito sarà utilizzato il termine segnale attuatore o segnale differenza per evitare che sia confuso con l'errore.

riportato.

- **Sistemi di controllo a valore fisso o regolatori:** il valore della grandezza di riferimento è costante. Il valore della grandezza controllata è proporzionale a quella di riferimento e deve rimanere costante fino a quando non cambia quella di riferimento, indipendentemente dai disturbi agenti sul sistema. I sistemi di controllo della velocità dei motori in c.c. e della temperatura sono detti regolatori perché devono mantenere costante, al variare del carico, il valore delle grandezze d'uscita, che sono rispettivamente la velocità di rotazione del motore e la temperatura.
- **Sistemi di controllo a valore programmato:** la grandezza controllata assume nel tempo valori che variano secondo un programma predefinito. I torni a controllo numerico sono sistemi di controllo a valore programmato perché le azioni compiute dalla macchina sono controllate da un programma gestito da un calcolatore o da un sistema a microprocessore dedicato.

Sistemi di controllo a valore asservito: la grandezza controllata segue le variazioni di quella di riferimento che, a sua volta, è funzione del tempo. Il sistema di controllo è chiamato servomeccanismo quando la grandezza controllata è di tipo meccanico (posizione, velocità, accelerazione). I sistemi di ricezione e trasmissione via satellite sono esempi di servomeccanismi perché le antenne di ricezione e di trasmissione "inseguono", istante per istante, il satellite.

1.3 Sistemi di controllo on-off

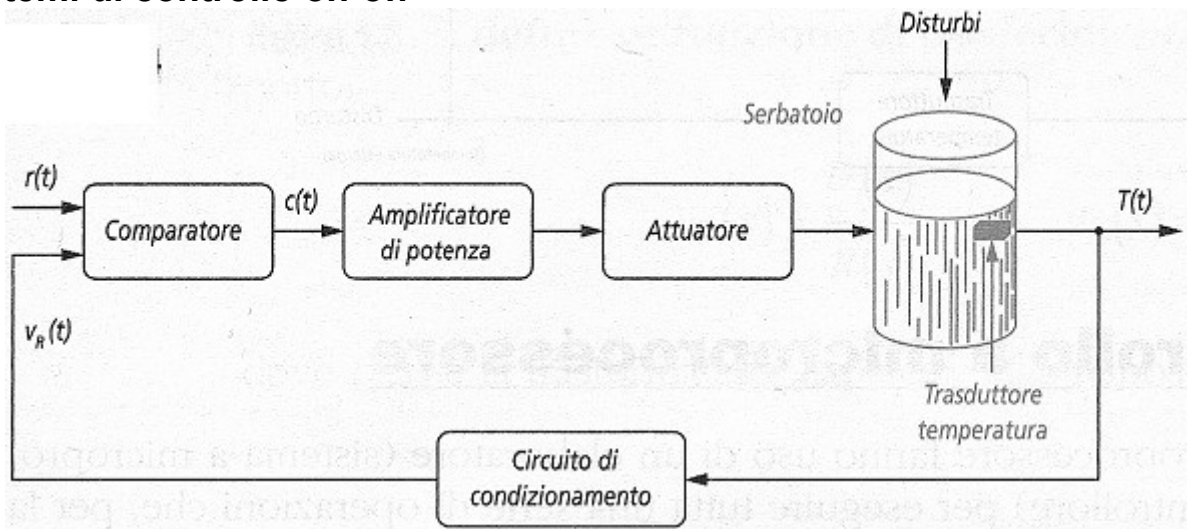
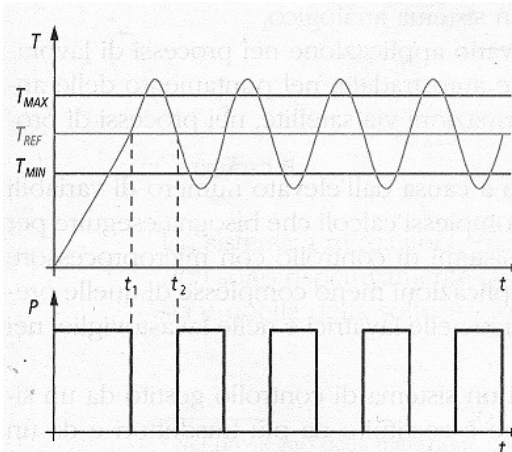


figura 1.4



Nei sistemi di controllo on-off il nodo sommatore e il controllore, costituiti generalmente da un circuito comparatore, comandano un amplificatore di potenza in configurazione on-off.

Con riferimento al sistema di riscaldamento rappresentato in figura 1.4 la tensione di retroazione fornita dal circuito di condizionamento è applicata all'ingresso invertente del comparatore e confrontata con la tensione di riferimento. Il segnale presente all'uscita del comparatore va a livello alto (saturazione positiva) ed attiva l'amplificatore di potenza quando è $r(t) > v_R(t)$, mentre va in saturazione negativa ponendo in interdizione l'amplificatore di potenza, quando $r(t) < v_R(t)$. L'amplificatore eroga la massima potenza (stato di

on) quando è $T < T_{ref}$, mentre è nello stato di off quando è $T > T_{ref}$. In un sistema di controllo on-off, dunque, la grandezza d'uscita varia all'interno di un range di valori, compresi tra un valore massimo e un valore minimo, a causa dell'inerzia dovuta all'azione del trasduttore e dell'attuatore. Quando il sistema di riscaldamento è posto in funzione, la temperatura del liquido contenuto nel serbatoio è minore di quella desiderata e, pertanto, l'amplificatore eroga la massima potenza (stato di on).

All'istante t_1 quando la temperatura del liquido è uguale a T_{ref} , l'amplificatore di potenza va nello stato di off, ma la temperatura del liquido continua ad aumentare a causa dell'inerzia termica del riscaldatore. Si tenga presente che il flusso di calore verso l'ambiente non può essere interrotto istantaneamente a causa dell'energia termica accumulata nel riscaldatore.

Successivamente la temperatura diminuisce per effetto della dispersione del calore attraverso le pareti e all'istante t_2 quando è $T < T_{ref}$, il circuito di potenza torna nello stato di on (figura 1.5). La temperatura del liquido, tuttavia, continua a diminuire perché inizialmente la potenza erogata dall'amplificatore è utilizzata per aumentare la temperatura del riscaldatore. Quando la temperatura del riscaldatore diviene maggiore di quella del liquido nel quale è immerso, una parte della quantità di calore è trasmessa dal riscaldatore all'ambiente circostante con conseguente aumento della temperatura del liquido.

1.4 Sistemi di controllo a previsione

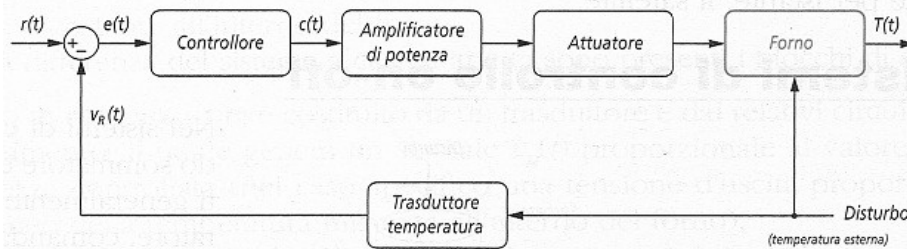


figura 1.6

Nei sistemi di controllo a previsione o feed-forward, a differenza di quelli a catena chiusa nei quali è misurata direttamente la grandezza controllata, sono misurati i disturbi ed il controllore agisce in modo da prevenire gli effetti dovuti alla loro azione. Nel sistema rappresentato in figura 1.6, ad esempio, il trasduttore rileva la temperatura dell'ambiente ed il segnale $e(t)$ generato dal nodo di confronto agisce sul controllore. In tal modo è possibile prevenire le variazioni della temperatura del forno (grandezza controllata) dovute alle variazioni della temperatura ambiente (disturbo).

1.5 Sistemi di controllo a microprocessore

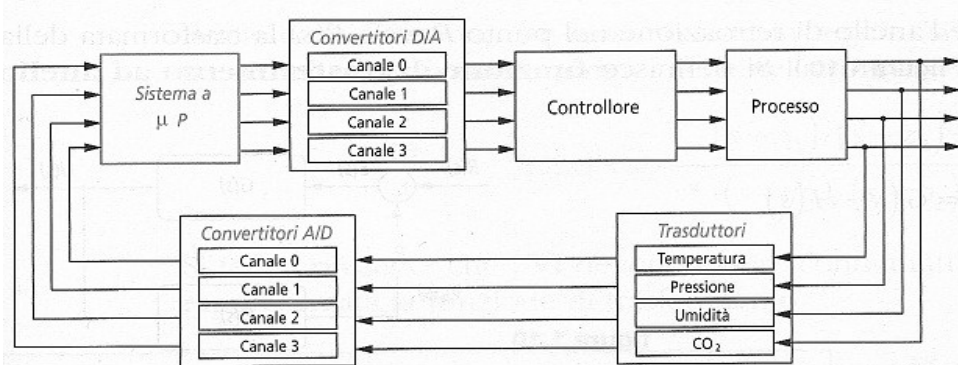


figura 1.7

I sistemi di controllo a microprocessore fanno uso di un elaboratore (sistema a microprocessore dedicato, o microcontrollore) per eseguire tutta una serie di operazioni che, per la loro complessità, non possono essere svolte da un sistema analogico.

I sistemi di controllo gestiti da un elaboratore trovano applicazione nei processi di lavorazione industriale, nel controllo del traffico, aereo e autostradale, nel puntamento delle antenne per la

ricezione e la trasmissione delle informazioni via satellite, nei processi di produzione dell'energia elettrica, ecc.

In questi casi l'uso di un elaboratore è necessario a causa dall'elevato numero di variabili che il sistema deve controllare, e dei numerosi e complessi calcoli che bisogna eseguire per poter intervenire in tempo reale sul processo. I sistemi di controllo con microprocessore dedicato o a microcontrollore sono utilizzati in applicazioni meno complesse di quelle precedentemente citate: ad esempio: in ambito domestico nelle lavatrici e nelle lavastoviglie, nei sistemi di allarme, nelle automobili, ecc.

Nella figura 1.7 è riportato lo schema a blocchi di un sistema di controllo gestito da un sistema a microprocessore. Il circuito di retroazione è costituito da più trasduttori e da un convertitore A/D a più ingressi. Quest'ultimo converte le grandezze analogiche in digitali affinché possano essere "acquisite" dall'elaboratore. Successivamente un programma definito dall'utente elabora i dati numerici corrispondenti ai segnali acquisiti e li confronta con i corrispondenti valori di riferimento, memorizzati in una apposita area di memoria, ed introdotti dall'operatore tramite tastiera. Il risultato del confronto determina l'invio di opportuni segnali digitali ai convertitori D/A che trasformano in segnali analogici affinché possano essere applicati agli amplificatori. Questi ultimi, infine, generano i segnali che agiscono sul processo e consentono di far assumere i valori desiderati alle variabili controllate.

Il vantaggio evidente di un sistema di controllo gestito da un elaboratore consiste nella sua versatilità perché, variando il programma o alcune parti di esso in relazione alle esigenze specifiche, è possibile modificare rapidamente i parametri di controllo del processo senza dover intervenire sull'hardware.

1.6 Funzione di trasferimento

Per poter eseguire l'analisi di un sistema a catena aperta è necessario ricavare prima il modello matematico e la funzione di trasferimento del sistema e, solo successivamente, è possibile studiare la sua risposta ai segnali canonici. Applicando la medesima metodologia ai sistemi a catena chiusa e nell'ipotesi che il sistema sia descritto dallo schema a blocchi di figura 1.8, si definisce funzione di trasferimento ad anello chiuso di un sistema il rapporto:

$$W(s) = \frac{U(s)}{R(s)} \quad W(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)}$$

dove $U(s)$ è la trasformata di Laplace della risposta e $R(s)$ quella della sollecitazione.

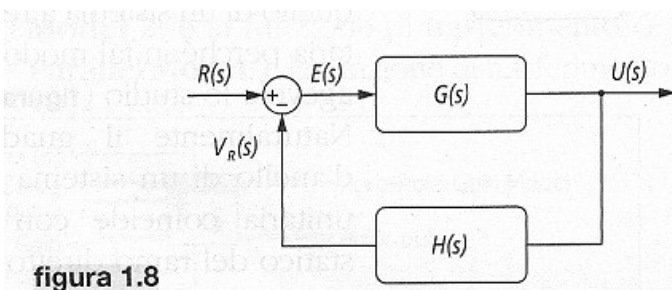


figura 1.8

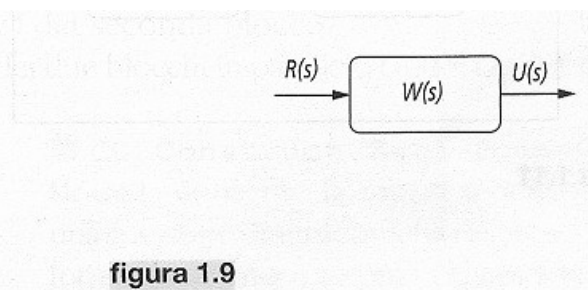


figura 1.9

Un sistema a retroazione può dunque essere ridotto ad un unico blocco, dove $W(s)$, $U(s)$ e $R(s)$ sono rispettivamente la funzione di trasferimento, la trasformata di Laplace della risposta e quella della sollecitazione (figura 1.9).

Si supponga: ora di aprire l'anello di retroazione nel punto P e sia $R(s)$ la trasformata della sollecitazione applicata (figura 1.10). Si definisce funzione di trasferimento ad anello aperto il rapporto:

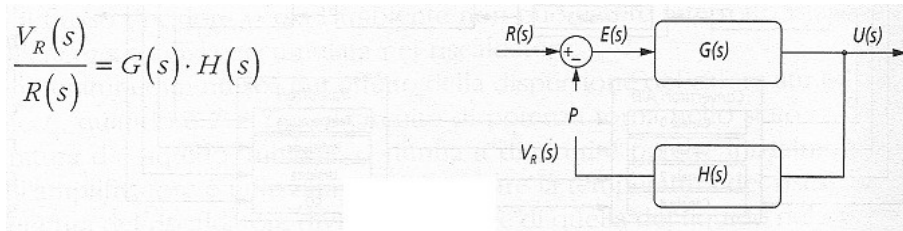


figura 1.10

La funzione di trasferimento ad anello aperto è fondamentale, come si vedrà in seguito, nell'analisi e nella progettazione dei sistemi di controllo ad anello chiuso e può essere scritta nella forma:

$$G(s) \cdot H(s) = k \cdot H_0 \cdot \frac{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1) \cdot \dots \cdot (\tau_m \cdot s + 1)}{s^q \cdot (T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1) \cdot \dots \cdot (T_{n-q} \cdot s + 1)}$$

- k e H_0 sono due costanti presenti rispettivamente nella funzione di trasferimento della linea diretta e in quella della linea di reazione;
- q è un numero intero positivo o nullo che determina la molteplicità del polo nullo. Il sistema si dice di tipo zero, uno, due,.. se è $q = 0, 1, 2...$ I sistemi di tipo zero sono generalmente dei regolatori, mentre quelli di tipo uno e due sono asservimenti.

Si definisce **guadagno statico d'anello** di un sistema retroazionato e si indica con K_{st} , il valore del limite, per s che tende a zero, della parte della funzione di trasferimento ad anello aperto che non contiene poli nulli:

$$K_{st} = \lim_{s \rightarrow 0} k \cdot H_0 \cdot \frac{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1) \cdot \dots \cdot (\tau_m \cdot s + 1)}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1) \cdot \dots \cdot (T_{n-q} \cdot s + 1)} \quad K_{st} = k \cdot H_0$$

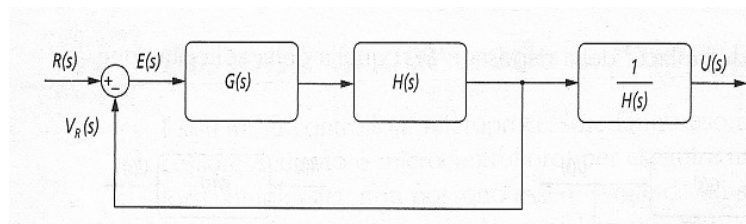


figura 1.11

In molti casi è preferibile ricondurre lo schema di un sistema retroazionato a quello di un sistema a retroazione unitaria perché in tal modo ne risulta più agevole lo studio (figura 1.11). Naturalmente il guadagno statico d'anello di un sistema a retroazione unitaria coincide : con il guadagno statico del ramo diretto.