

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 sollecitato da una o più variabili d'ingresso consente di variare o di mantenere costante una o più grandezze d'uscita al fine di conseguire un risultato finale prestabilito.

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 e 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. Negli impianti di riscaldamento più complessi, 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.

Negli impianti più semplici (monoutenze), la temperatura esterna non viene rilevata, ma sono presenti solo dei sistemi di monitoraggio della temperatura interna dei locali da riscaldare (termostati), che attivano o bloccano l'accensione della caldaia.

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 (**figura 1.1**).

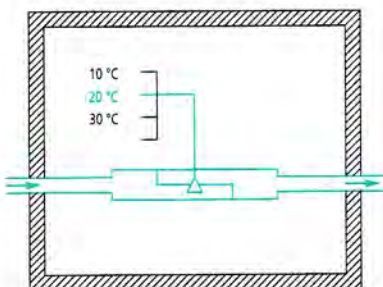
- Sistemi a catena aperta.
- Sistemi on-off.
- Sistemi a catena chiusa (retroazione) o con feedback.
- Sistemi di controllo a previsione o feedforward.
- Sistemi programmati.
- Sistemi a microprocessori (Microcontrollori).



1.1 Sistemi di controllo a catena aperta

Nei sistemi di **controllo a catena aperta** il segnale di riferimento è generalmente predeterminato mediante un dispositivo di controllo tarato in sede di fabbricazione del sistema. Le modalità di riscaldamento di una stanza, rappresentate nella **figura 1.2**, sono 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 la 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.

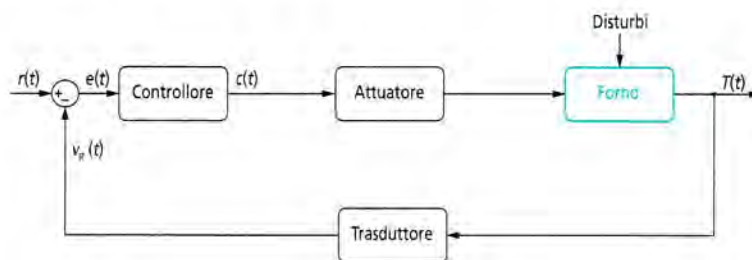


figura 1.3

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 sommatore o nodo di confronto:** è presente solo nei sistemi a catena chiusa e costituisce l'elemento nel quale sono confrontati il valore attuale della grandezza controllata e 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 $v_R(t)$:

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

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

- **Controllore:** chiamato anche compensatore o semplicemente filtro, è un circuito elettronico che genera un segnale $c(t)$ proporzionale al segnale attuatore o a 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.

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 o si avvicina al 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 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 predeterminato. 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

Nei sistemi di **controllo on-off** il nodo sommatore e il controllore, costituiti in questo caso dal solo comparatore, comandano un amplificatore di potenza. 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) e 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 è $r(t) < v_R(t)$. L'amplificatore eroga la sua potenza (stato di **on**) quando è $T \leq T_{REF}$ mentre non fornisce potenza (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'iner-

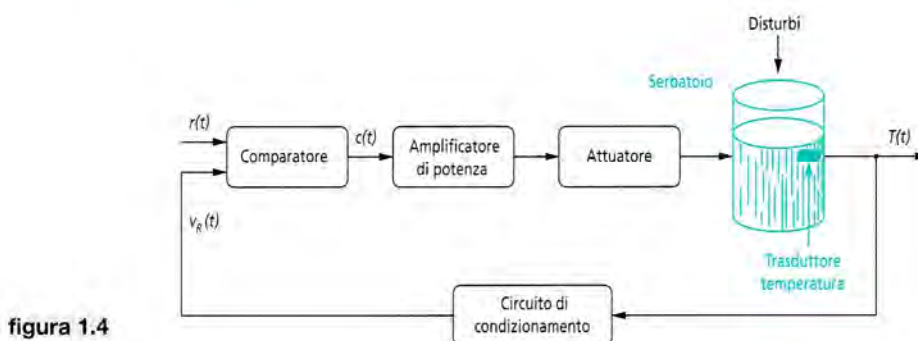


figura 1.4

zia 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.

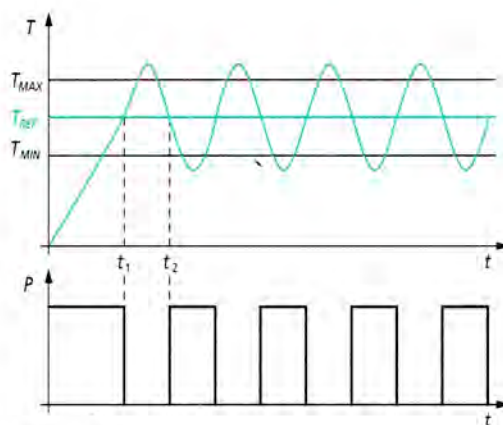


figura 1.5

Successivamente la temperatura diminuisce per effetto della dispersione del calore attraverso le pareti e all'istante t_2 , quando è $T \leq T_{REF}$, 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

Nei sistemi di controllo **a previsione** o **feedforward**, a differenza di quelli a catena chiusa nei quali è misurata direttamente la grandezza controllata, sono misurati i disturbi e 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 e

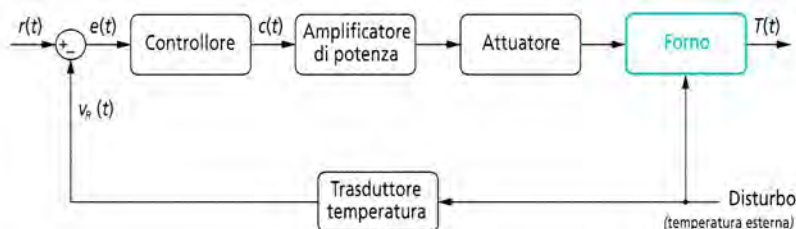


figura 1.6

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

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 e introdotti dall'operatore tramite tastiera. Il risultato del confronto determina l'invio di opportuni segnali digitali ai convertitori D/A che li 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.

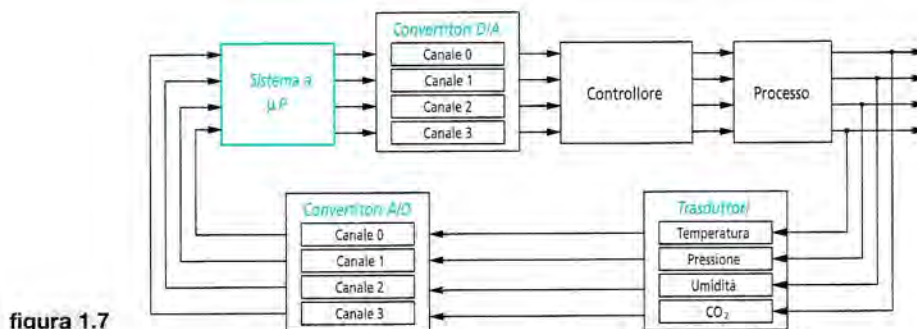


figura 1.7

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

Nei Volumi 1° e 2° del corso si è visto che 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 a catena chiusa il rapporto:

$$W(s) = \frac{U(s)}{R(s)} \qquad W(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \quad [1.1]$$

dove $U(s)$ è la trasformata di Laplace² della risposta e $R(s)$ quella della sollecitazione.

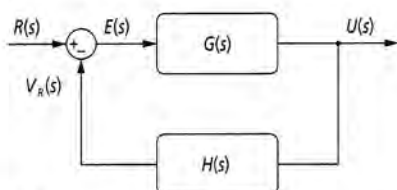


figura 1.8

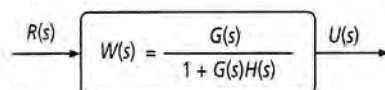


figura 1.9

Un sistema a retroazione può dunque essere ridotto a 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**).

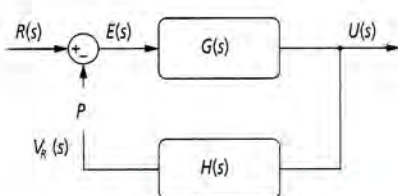


figura 1.10

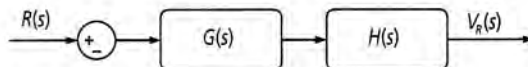


figura 1.11

Si definisce **funzione di trasferimento ad anello aperto** (**figura 1.11**) il rapporto:

$$\frac{V_R(s)}{R(s)} = G(s) \cdot H(s)$$

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:

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

² Nel prosieguo della trattazione con il termine trasformata si intende la trasformata di Laplace.

- 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 $q = 0, 1, 2, \dots$ e ciò significa che la funzione di trasferimento ad anello aperto contiene zero (non ha poli nulli), uno, due... elementi integratori. 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:

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

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 1.12**). Naturalmente il guadagno statico d'anello di un sistema a retroazione unitaria coincide con il guadagno statico del ramo diretto.

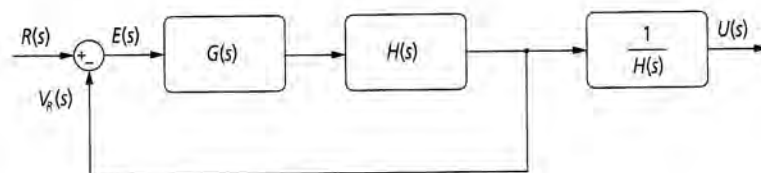


figura 1.12

Test di verifica

■ Stabilisci se le seguenti affermazioni sono vere o false.

1. Processo e impianto definiscono lo stesso concetto.
☐ vero
☐ falso
2. Un sistema a catena aperta contiene anche un blocco di retroazione.
☐ vero
☐ falso
3. Un sistema a catena aperta è sensibile alle variazioni dei parametri del sistema stesso.
☐ vero
☐ falso
4. Il nodo sommatore è definito anche come nodo di confronto.
☐ vero
☐ falso
5. Un servomeccanismo è un sistema di controllo a valore fisso.
☐ vero
☐ falso
7. Un sistema di controllo a previsione contiene il blocco di retroazione.
☐ vero
☐ falso
8. Un sistema a previsione (feedforward) è sensibile anche ai disturbi.
☐ vero
☐ falso
9. In un sistema di controllo a μP è contenuto il solo convertitore A/D.
☐ vero
☐ falso
10. La F.d.T. di un sistema ad anello aperto si ricava da quella ad anello chiuso.
☐ vero
☐ falso
11. Un sistema è detto di tipo uno perché contiene uno zero nullo.
☐ vero
☐ falso
12. Il guadagno statico K_{ST} di un sistema retroazionato è il limite per $s \rightarrow 0$ della F.d.T. ad anello aperto che contiene poli nulli.
☐ vero
☐ falso

Sistemi di acquisizione dati

Negli ultimi decenni hanno trovato sempre più largo impiego i **sistemi di controllo e di misura** basati sui Personal Computer.

Tra i principali vantaggi derivanti dall'uso di tali tecnologie si ricordano:

- ▶ la possibilità di collegare in rete più unità di controllo e di elaborare grandi quantità di dati in modo da intervenire in tempo reale sul processo controllato;
- ▶ la facilità di adattare il programma di gestione del sistema alle esigenze dell'utente senza apportare sostanziali modifiche all'hardware;
- ▶ la possibilità di risolvere equazioni che descrivono il processo e d'implementare un algoritmo di regolazione (P, PD, PI e PID) in un linguaggio di programmazione ad alto livello;
- ▶ la possibilità di risolvere problemi complessi con costi ridotti.

1.1

Architettura dei sistemi di acquisizione e di distribuzione dati

L'acquisizione delle grandezze fisiche avviene a volte con *trasduttori di tipo digitale* e altre con *trasduttori di tipo analogico*. Per le grandezze acquisite di tipo analogico occorre effettuare una conversione trasformandole in digitale.

In modo simile, nelle catene di distribuzione, possono essere forniti agli attuatori segnali di tipo digitale o di tipo analogico.

Molte volte il sottosistema di misura e, a volte, anche quello di uscita, non si trovano in prossimità del sottosistema di controllo. In questo caso è necessario trasmettere a distanza, al sottosistema di controllo, le grandezze acquisite e quelle elaborate dal sottosistema di controllo a quello di uscita. In questo Modulo sono presentati gli aspetti più significativi delle problematiche relative ai sistemi di controllo automatico costituiti essenzialmente da un sistema di rilevamento e da un sistema di distribuzione di dati analogici.

Un sistema di controllo computerizzato, la cui architettura generale è rappresentata in **figura 1.1**, è composto dai sottosistemi di seguito elencati.

1. **Sottosistema di misura o di acquisizione dati**: a contatto con il mondo fisico è in grado di rilevare, per mezzo di opportuni sensori e trasduttori (→ Modulo 1), le variazioni delle grandezze fisiche interessate, quali la temperatura, la velocità, l'umidità, la pressione, ecc.
2. **Sottosistema di controllo**: esegue le operazioni di memorizzazione e di elaborazione dei dati acquisiti dal sottosistema di misura ed è costituito da un sistema programmabile.
3. **Sottosistema di uscita o di distribuzione dati**: genera i segnali analogici e/o digitali che controllano gli attuatori (motori, relè, elettrovalvole, teleruttori, ecc.).

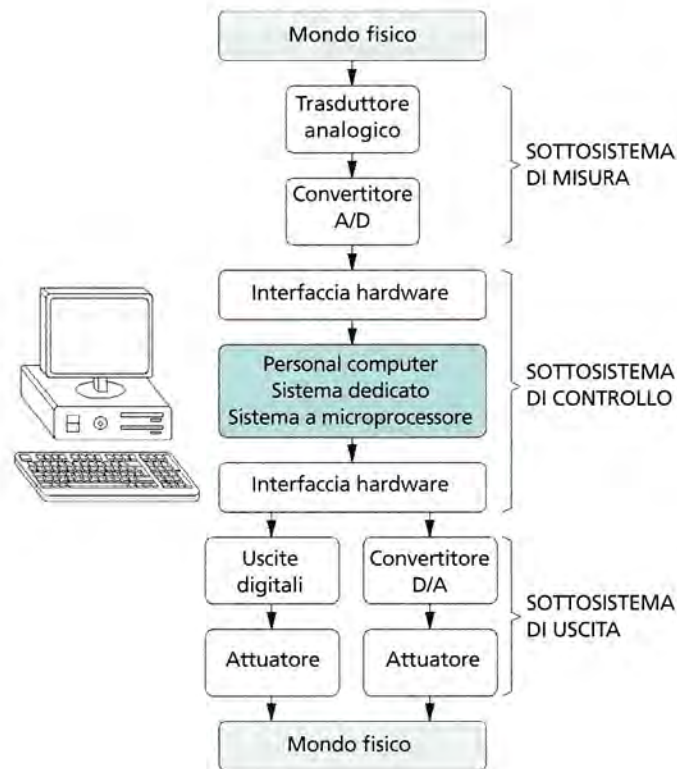


figura 1.1

1.1.1 Sottosistema di misura

Il sottosistema di misura, rappresentato in figura 1.2, è così composto:

- **Sensore** o **trasduttore**: trasforma la grandezza fisica in una grandezza elettrica a essa proporzionale.
- **Circuito di condizionamento dei segnali**: provvede ad amplificare, traslare di livello ed eventualmente linearizzare la grandezza elettrica presente al suo ingresso. Se si utilizza un sensore (che non fornisce direttamente una tensione), il circuito di condizionamento deve effettuare la trasformazione **grandezza elettrica \Rightarrow tensione**.
- **Convertitore analogico-digitale (A/D)**: è un dispositivo elettronico che trasforma il segnale analogico generato dai circuiti di condizionamento in un valore digitale adatto a essere acquisito, memorizzato ed elaborato dal sottosistema di controllo.

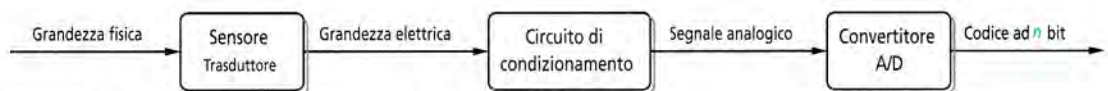


figura 1.2

L'architettura delle catene di acquisizione è a un solo canale quando il segnale è generato da una sola sorgente (trasduttore o sensore), o a più canali quando i segnali sono generati da più sorgenti, eventualmente anche di natura diversa (per esempio termoresistenze, termocoppie, trasduttori di pressione, ecc.).

1.1.2 Sottosistema di controllo

Il sottosistema di controllo genera, tra l'altro, i segnali per controllare e temporizzare i sottosistemi di acquisizione e di distribuzione.

Un **sottosistema di controllo** è costituito da:

- un sistema programmabile per l'elaborazione dei dati;
- circuiti d'interfaccia hardware che consentono il trasferimento dei segnali dal sottosistema di misura all'unità di elaborazione e da questa al sottosistema di uscita;
- dispositivi di memoria per la memorizzazione dei programmi di gestione del sistema e dei dati;
- una tastiera e un dispositivo di visualizzazione che consentono all'operatore di interagire con il sistema.

Il sottosistema di controllo può essere costituito da un PC, da un PLC e, nei sistemi più semplici, da un microcontrollore. L'uso del **microcontrollore** consente di realizzare sistemi molto compatti in quanto sono presenti sul mercato dispositivi che hanno integrato all'interno del chip convertitori analogici/digitali, anche a più canali (→ Modulo 7), e circuiti di memoria.

1.1.3 Sottosistema d'uscita

Il sottosistema d'uscita genera i segnali da inviare agli attuatori.

Nel caso che gli attuatori siano di tipo digitale i segnali generati dall'unità di controllo possono essere direttamente inviati a essi.

Se invece gli attuatori sono di tipo analogico, è necessario trasformare il segnale da digitale in analogico mediante un dispositivo elettronico detto convertitore digitale analogico (D/A).

Un sottosistema d'uscita per il controllo di **attuatori di tipo analogico** è costituito quindi da un convertitore D/A che trasforma il dato digitale in una grandezza analogica (tensione o corrente) e da circuiti che amplificano il segnale generato dal convertitore in modo da renderlo adatto a comandare gli attuatori (**figura 1.3**).

Quando il sottosistema d'uscita è distante dal sottosistema di controllo, è necessario trasmettere a distanza i segnali diretti agli attuatori.

L'architettura delle catene di distribuzione può essere a **un solo canale**, quando il segnale generato dal sottosistema di controllo deve comandare un solo attuatore, o a **più canali**, quando i segnali generati devono comandare più attuatori eventualmente anche di natura diversa (per esempio relè, motori in DC, triac, elettrovalvole, ecc.).

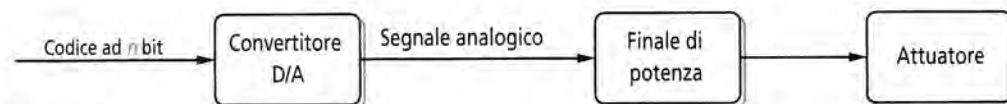


figura 1.3

1.2 Catena di acquisizione a un solo canale

Una catena di acquisizione dati a un solo canale collegata con un generico PC, la cui struttura semplificata è rappresentata in **figura 1.4**, è costituita dai seguenti blocchi:

- rilevamento e condizionamento;
- filtro P.B.;
- circuito Sample-Hold (S/H);
- convertitore A/D;
- logica di controllo.

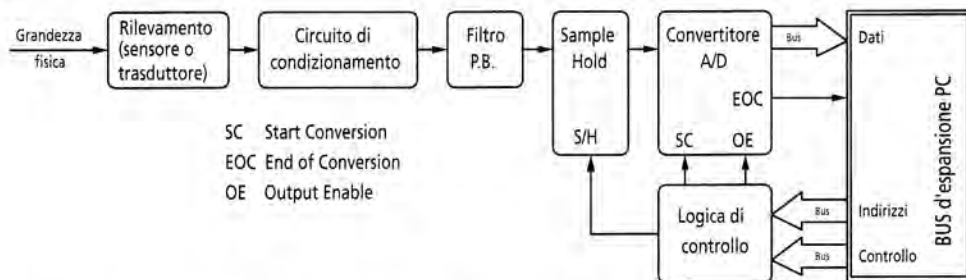


figura 1.4

Si analizzano ora le funzioni dei singoli componenti di una catena di acquisizione a un solo canale.

1.2.1 Rilevamento, condizionamento e filtraggio

La grandezza fisica da rilevare (temperatura, pressione, velocità, ecc.) è convertita in una grandezza elettrica per mezzo di un sensore o di un trasduttore (→ Volume 1, Modulo 2, Unità 1, paragrafo 1.1).

In ogni caso i trasduttori dovrebbero sempre fornire, nel relativo campo di funzionamento, segnali elettrici proporzionali ai valori delle grandezze fisiche che sono in grado di rilevare. I segnali forniti dai trasduttori devono essere opportunamente trasformati in modo che possano essere adattati alle specifiche d'ingresso del convertitore A/D. Per questo è necessario utilizzare **circuiti di condizionamento** la cui funzione è fondamentale per tutti i blocchi successivi della catena d'acquisizione. A seconda delle esigenze specifiche i circuiti di condizionamento possono svolgere tutte o solo una parte delle seguenti funzioni:

- conversione resistenza/tensione ($R \Rightarrow V$);
- conversione corrente/tensione ($I \Rightarrow V$);
- amplificazione e traslazione di livello;
- isolamento;
- linearizzazione della caratteristica del trasduttore.

■ Conversione corrente/tensione

Considerato che molti trasduttori forniscono in uscita un segnale in corrente e non direttamente in tensione, è necessario operare una conversione corrente/tensione poiché il convertitore A/D è in grado di convertire segnali analogici in tensione.

■ Amplificazione

Una delle funzioni fondamentali richieste dal circuito di condizionamento è l'amplificazione del segnale ed, eventualmente, la traslazione di livello per adattarlo ai valori richiesti dal convertitore.

Le termocoppie e, in generale, anche altri trasduttori, forniscono livelli di segnali molto bassi che debbono essere amplificati per adattare il range d'uscita del trasduttore a quello d'ingresso del convertitore A/D.

Normalmente l'amplificatore è posto in prossimità del trasduttore per ridurre gli effetti dovuti ai segnali di rumore che si sovrappongono al segnale utile lungo la linea di collegamento tra il trasduttore e il convertitore.

Se il trasduttore fornisce una uscita non nulla in corrispondenza del minimo valore della grandezza fisica applicata al suo ingresso, a volte è necessario annullare il livello di questa tensione, detta di offset, in modo da presentare agli stadi successivi un segnale in tensione avente un valore uguale a 0 V in corrispondenza del minimo valore della grandezza fisica rilevata dal trasduttore.

Ad esempio, quando si trasforma un valore di temperatura espresso in gradi Kelvin in uno espresso in gradi centigradi è necessario annullare la tensione di offset derivante dal cambiamento di scala.

■ Isolamento

L'amplificatore d'isolamento è utilizzato nei sistemi d'acquisizione e di distribuzione dedicati al controllo di processi industriali o in apparecchiature elettromedicali quando possono generarsi nella catena d'acquisizione valori di tensione pericolosi per le apparecchiature e/o per le persone.

Un amplificatore d'isolamento è costituito essenzialmente da un amplificatore per strumentazione avente lo stadio d'ingresso isolato otticamente o magneticamente da quello d'uscita e dai circuiti di alimentazione.

■ Linearizzazione analogica

Un'altra funzione svolta dai circuiti di condizionamento è la linearizzazione analogica delle curve di risposta di quei trasduttori aventi una caratteristica non lineare. Essa può essere effettuata sia via software che con circuiti hardware.

- La **linearizzazione software** si effettua o con appositi programmi o correggendo i valori acquisiti confrontandoli con altri preventivamente registrati in una tabella posta in memoria.
- La **linearizzazione analogica hardware** utilizza circuiti di linearizzazione o amplificatori che hanno una curva di risposta complementare rispetto a quella del trasduttore.

Ad esempio, un amplificatore logaritmico può essere utilizzato per linearizzare la risposta di un trasduttore avente una curva caratteristica esponenziale.

■ Filtraggio

La presenza di rumore in sovrapposizione al segnale utile è un fenomeno assai frequente quando il rilievo o la conversione del segnale avvengono in ambienti industriali.

Un'altra fonte di rumore è costituita dalle variazioni della tensione continua di alimentazione dei circuiti. In alcuni sistemi, quando bisogna acquisire segnali di debole intensità come quelli forniti dalle termocoppie, l'entità del rumore può assumere valori eccessivi relativamente al segnale di rilevamento. In tutti questi casi si rende necessario inserire un filtro passa basso in grado di attenuare i segnali fuori banda e di ridurre al minimo il **fenomeno dell'aliasing**.

Il fenomeno di **aliasing** si genera quando si campiona un segnale analogico, a causa delle componenti armoniche, in esso contenute (→ www.auladigitale.rcs.it, Campionamento dei segnali).

In base alla serie di Fourier, un segnale periodico non sinusoidale può ottenersi come somma di infiniti segnali sinusoidali, detti armoniche di opportuna ampiezza, frequenza e fase.

L'armonica che ha la stessa frequenza del segnale non sinusoidale è detta *fondamentale*. Le

successive armoniche hanno frequenza multipla della fondamentale ($2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0, \dots$) e, in genere, la loro ampiezza decresce all'aumentare della frequenza in modo che esse assumono via via minor rilevanza nella composizione del segnale. Per questo, il segnale, che ha in genere infinite armoniche, può essere considerato a *banda limitata*, se si trascurano le armoniche al di sopra di un certo valore. L'armonica con la più alta frequenza presa in considerazione è quella che fornisce la frequenza massima (f_{\max}) contenuta nel segnale.

Si dimostra (*teorema di Shannon*) che effettuando il campionamento di un segnale, perché i campioni abbiano tutte le informazioni necessarie per ricostruire il segnale, il campionamento deve essere effettuato almeno a una frequenza doppia di quella massima contenuta nel segnale stesso (ovvero quella dell'armonica di ordine più alto presa in considerazione). Si ha inoltre che, effettuando il campionamento di un segnale, il segnale campionato ha uno spettro di frequenza come quello rappresentato in **figura 1.5**. Nella figura non sono prese in considerazione le bande di frequenza presenti nello spettro con valori di frequenza più elevati. Esaminando tale spettro, si vede come le frequenze delle armoniche, presenti nel segnale da campionare, formino delle bande al di sopra e al di sotto della frequenza di campionamento. Se la frequenza di campionamento è maggiore (o uguale) di $2f_{\max}$ (**figura 1.5**), la banda laterale inferiore del segnale campionato non interferisce con le frequenze dello spettro del segnale da campionare. Questo è vero se non si prendono in considerazione le armoniche con frequenza f_5 e f_6 e tutte le altre a frequenza più alta presenti nel segnale da campionare. Queste frequenze che si trovano al di sopra di f_4 (considerata la massima frequenza del segnale da campionare), appaiono nello spettro del segnale campionato come componenti di bassa frequenza. Per eliminare quindi queste componenti indesiderate bisogna **filtrare il segnale prima del campionamento** eliminando con un filtro passa basso le armoniche del segnale al di sopra di f_4 .

Un filtro che lasci passare inalterate le componenti del segnale fino a f_4 ed elimini quelle a frequenza superiore è di difficile realizzazione (con $f_c = 2f_{\max}$ il filtro dovrebbe essere ideale). Se si effettua però il campionamento a una frequenza f_c almeno cinque volte maggiore di $2f_{\max}$ lo spettro del segnale campionato trasla verso frequenze più alte e quindi le armoniche con frequenza f_5 e f_6 (e anche altre, a frequenza più alta) non ricadranno più nello spettro del segnale da campionare. È possibile così utilizzare un filtro che abbia una curva di risposta con minore pendenza. È consigliabile usare un filtro attivo con una curva di risposta di almeno 40 dB/decade.

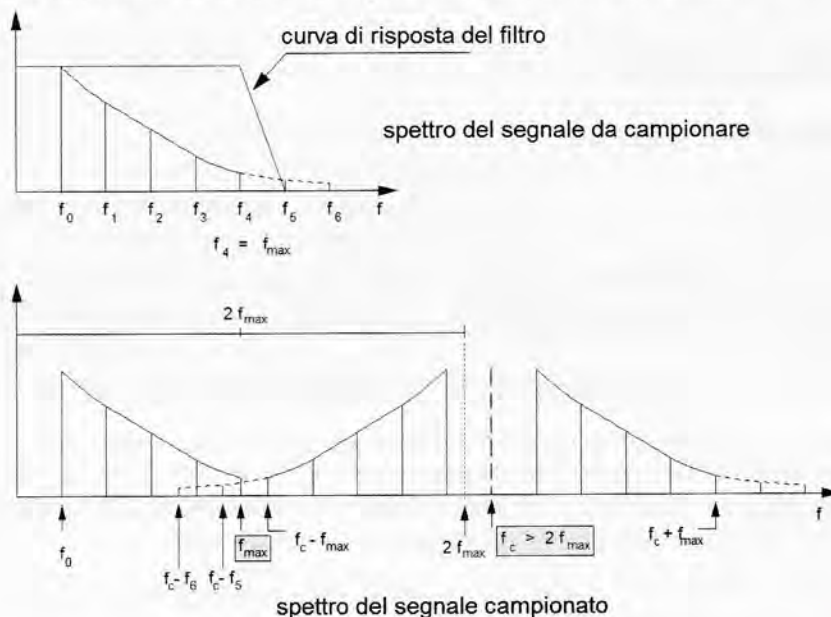


figura 1.5

1.2.2 Convertitore A/D

Il **convertitore A/D** trasforma il segnale analogico presente al suo ingresso in un valore digitale a n bit. Un convertitore A/D effettua quindi la quantizzazione di una tensione analogica, ovvero trasforma un determinato valore analogico del segnale in un codice binario. Ogni convertitore ha un proprio range per la tensione analogica d'ingresso che deve essere rispettato.

Si hanno convertitori per i quali sono ammissibili valori delle tensioni d'ingresso sia positivi che negativi, mentre altri accettano solo segnali positivi (vedere Digitale Modulo 4, Unità 4).

Il valore massimo della tensione d'ingresso, che non deve mai essere superato, è definito anche **tensione di fondo scala** (V_{FS}).

Un convertitore funziona correttamente quando a esso è applicato sia il segnale da convertire sia una tensione continua e costante definita **tensione di riferimento** (V_{REF}).

Il valore massimo della V_{REF} che può essere applicato a un convertitore dipende dalle caratteristiche costruttive del dispositivo e coincide, generalmente, con la tensione di fondo scala (V_{FS}). La relazione che intercorre tra il valore del segnale analogico V_i , applicato all'ingresso di un convertitore A/D, e il corrispondente valore digitale del dato convertito è dato dalla relazione seguente:

$$V_i = V_{REF} \cdot \frac{N}{2^n} \quad [1.1]$$

$$N = V_i \cdot \frac{2^n}{V_{REF}} \quad [1.2]$$

dove N è il valore espresso in formato decimale, del segnale convertito, n è il numero di bit del convertitore e V_{REF} è la tensione di riferimento.

esempio

1.1

All'ingresso di un convertitore con risoluzione di 8 bit ($n = 8$) e con $V_{REF} = 5,12$ V si applichi una tensione analogica $V_i = 3,2$ V.

Svolgimento

Per la [1.2] si ha:

$$N = 3,2 \cdot \frac{256}{5,12} = 160$$

Considerato che è $N = 160$ in decimale, $N = A0h$ in esadecimale e $N = 1010\ 0000$ in binario, si può affermare che al termine della conversione sulle otto linee di uscita del convertitore si ha il dato binario 1010 0000.

I più comuni convertitori presenti sul mercato hanno risoluzione di 8, 12, 16 bit (sono comunque reperibili anche con risoluzioni di 10, 14, 18, 20 bit).

La scelta di un A/D deve essere fatta in base alle specifiche applicazioni a cui esso è destinato e tenendo conto che le caratteristiche principali sono:

- possibilità d'acquisire segnali solamente positivi o duali rispetto a massa;
- tempo di conversione;

- risoluzione;
- possibilità d'interfacciamento diretto con i sistemi a microprocessore o, più in generale, con sistemi programmabili;
- valore massimo della tensione ammissibile al suo ingresso;
- presenza o meno al suo interno di una tensione di riferimento, del circuito S/H e/o del MUX (per acquisire più canali);
- metodo di conversione utilizzato;
- accuratezza.

Il processo di conversione inizia quando tramite software (o hardware) il convertitore riceve un segnale di inizio conversione SC (*Start Conversion*) dalla logica di controllo del sistema. Quando la conversione è terminata il convertitore genera il segnale EOC (*End Of Conversion*) per indicare al sistema che il dato è disponibile. Il segnale EOC è spesso utilizzato per generare una richiesta d'interruzione e per avviare la lettura dei dati.

Al termine della conversione sulle uscite digitali del convertitore viene posto il valore numerico corrispondente a quello analogico presente al suo ingresso.

Per poter acquisire il dato digitale, la logica di controllo deve attivare il segnale OE (*Output Enable*) che permette la lettura del dato da parte del sistema **figura 1.6**.



figura 1.6

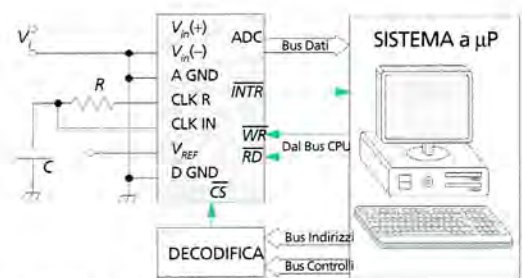


figura 1.7

Nei convertitori direttamente interfacciabili con i sistemi a microprocessore (computer), i segnali che danno inizio alla conversione (SC), che ne segnalano la fine (EOC) e che permettono la lettura del dato convertito, assumono spesso nomi diversi e, generalmente, sono collegati direttamente al bus di espansione del computer.

Inoltre, quasi sempre il convertitore è dotato di un *buffer three state* interno che permette la separazione delle linee digitali dei dati da quelle del sistema, senza ricorrere a buffer esterni (**figura 1.7**). I segnali \overline{CS} e \overline{WR} (sostituiscono SC) avviano la conversione quando entrambi assumono un livello basso, il segnale \overline{RD} , portato basso insieme con \overline{CS} , abilita l'uscita dei dati (sostituiscono OE). Il termine della conversione è segnalato ponendo a livello logico basso \overline{INTR} (EOC, per generare un interrupt nel computer). Nella **figura 1.7** sono anche evidenziati il circuito che genera il segnale di clock e l'ingresso per la tensione di riferimento (V_{REF}).

Alcuni tipi di convertitori hanno gli ingressi per il segnale analogico che possono essere usati sia in modo *single ended* (con riferimento a massa) sia in modo differenziale.

La logica di controllo, costituita normalmente da circuiti di decodifica o eventualmente da circuiti di temporizzazione, riceve i segnali dal bus indirizzi e di controllo del computer e deve generare i segnali di abilitazione per il convertitore (SC e OE). Con i convertitori direttamente interfacciabili con i microprocessori, normalmente i circuiti d'interfaccia sono

costituiti da semplici circuiti di decodifica che permettono la selezione dell'A/D, per una particolare combinazione dei livelli logici presenti sulle linee del bus indirizzi. Le principali caratteristiche di un convertitore A/D sono riassunte nella **tabella 1.1**.

tabella 1.1

Caratteristiche dei convertitori A/D	
Risoluzione	<p>È il più piccolo incremento della grandezza analogica d'ingresso che provoca il cambiamento del bit meno significativo (LSB) del codice binario del convertitore. Alcune volte si definisce come risoluzione il numero di bit del convertitore. Per un convertitore a n bit e con valore di fondo scala V_{FS}, la risoluzione R è:</p> $R = \frac{V_{FS}}{2^n}$ <p>La grandezza d'ingresso analogica deve variare di un valore uguale a $V_{FS}/2^n$ per ottenere una variazione del codice digitale d'uscita. Il valore $V_{FS}/2^n$ viene definito come 1 LSB.</p>
Errore di quantizzazione	Con un convertitore a n bit la grandezza analogica in ingresso è suddivisa in 2^n livelli. Per questo con un unico codice si rappresenta tutta una serie di valori entro un certo livello. Essendo assegnato nominalmente il codice a metà di ciascun livello, è sempre presente nel processo di conversione una incertezza di $1/2$ LSB che rappresenta l'errore di quantizzazione.
Errore di offset (Zero-Code Error)	È la differenza tra la tensione ideale d'ingresso relativa a $1/2$ LSB e quella reale che invece provoca la transizione tra zero e il primo LSB.
Errore di guadagno	È la differenza tra il valore della tensione d'ingresso che dovrebbe generare un codice uguale al fondo scala e il vero valore che invece genera tale codice. Questo errore altera la pendenza della curva di risposta reale rispetto a quella ideale.
Errore di non linearità integrale (INL)	È il peggiore caso di deviazione, che si può avere tra il punto iniziale e il fondo scala, di un codice dalla curva di risposta ideale.
Errore di non linearità differenziale (DNL)	È la massima deviazione, espressa in LSB, che si può avere rispetto alla transizione ideale del codice. Se la differenza è maggiore di ± 1 LSB si ha la perdita del codice d'uscita (missing code).
Accuratezza	Tiene conto degli errori di guadagno, di offset e di non linearità.
Tempo di conversione (t_c)	È l'intervallo di tempo impiegato dal convertitore per trasformare la grandezza analogica posta in ingresso nel corrispondente codice digitale.
Tensione di riferimento V_{REF}	È la tensione, con grande grado di stabilità e di precisione che deve essere applicata a un convertitore A/D. Alcuni dispositivi hanno una sorgente di tensione di riferimento interna. Quando occorre applicare al convertitore la tensione di riferimento dall'esterno è necessario adoperare apposite sorgenti.

Nella **figura 1.8** è rappresentata la caratteristica di trasferimento per un convertitore a 3 bit.

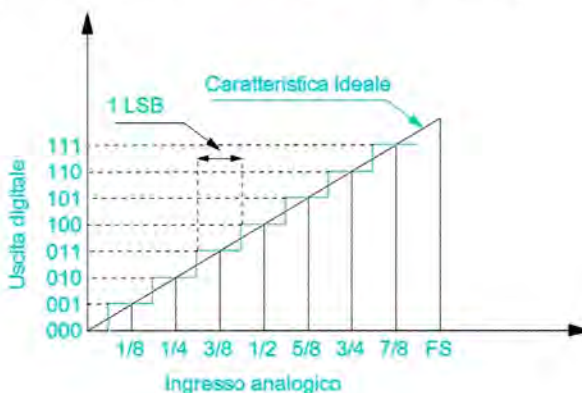


figura 1.8

1.2.3 Massima frequenza del segnale campionabile

L'uso di un convertitore A/D è essenzialmente rivolto al campionamento di segnali analogici in determinati istanti, con conseguente trasformazione del valore analogico in un corrispondente dato digitale.

Un convertitore A/D per effettuare la trasformazione di un dato da analogico a digitale, impiega un certo intervallo di tempo definito **tempo di conversione** t_c . Se il segnale posto all'ingresso del convertitore non ha un valore costante nel tempo, è fondamentale che, **per tutto l'intervallo di tempo (t_c) durante il quale il convertitore effettua la conversione, il segnale non subisca variazioni di ampiezza maggiori di $\frac{1}{2}$ LSB (se si accetta un'accuratezza minore si può imporre che la variazione massima sia di 1 LSB).**

Nel controllo della massima frequenza che può avere un segnale posto all'ingresso di un convertitore A/D è prassi comune riferirsi a un segnale di tipo sinusoidale perché, in base alla serie di Fourier, un segnale non sinusoidale (periodico) può ottenersi come somma di segnali sinusoidali. Si supponga a tal proposito di voler campionare la tensione sinusoidale:

$$V(t) = V_M \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

Ponendo $1 \text{ LSB} = V_{FS}/2^n$ con $V_{FS} = 2 \cdot V_M$ si dimostra che per l'accuratezza di $\frac{1}{2}$ LSB (o per 1 LSB) deve essere:

per $\frac{1}{2}$ LSB:

$$f_{max} \leq \frac{1}{2^{n+1} \cdot \pi \cdot t_c} \quad [1.3]$$

e per 1 LSB:

$$f_{max} \leq \frac{1}{2^n \cdot \pi \cdot t_c} \quad [1.4]$$

Come si deduce dalla [1.3] e dalla [1.4] il valore massimo della frequenza del segnale che è possibile convertire dipende dalla risoluzione del convertitore (n) e dal tempo di conversione t_c .

esempio 1.2

Un convertitore a 8 bit con tempo di conversione pari a 100 μs può convertire, con un errore di $\frac{1}{2}$ LSB, segnali aventi una frequenza massima uguale a:

$$f_{max} \leq \frac{1}{2^{n+1} \cdot \pi \cdot t_c} = \frac{1}{2^{8+1} \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \cong 6,2 \text{ Hz}$$

esempio 1.3

Un convertitore a 12 bit con tempo di conversione pari a $35 \mu\text{s}$ può convertire, con errore di $1/2$ LSB, segnali aventi una frequenza massima uguale a:

$$f_{\max} \leq \frac{1}{2^{n+1} \cdot \pi \cdot t_c} = \frac{1}{2^{12+1} \cdot 3,14 \cdot 35 \cdot 10^{-6}} \cong 1,1 \text{ Hz}$$

I valori ottenuti sono molto bassi e non permettono di campionare segnali aventi frequenze superiori, a meno di non accettare risultati affetti da errori. Per aumentare la frequenza massima del segnale da convertire si debbono utilizzare convertitori con tempo di conversione molto minore rispetto agli esempi esaminati. Bisogna però tenere presente che il costo dei convertitori aumenta con la riduzione del tempo di conversione.

esempio 1.4

Si voglia campionare con un convertitore a 8 bit un segnale con $f_{\max} = 300 \text{ Hz}$. Si calcoli il tempo di conversione che deve avere il convertitore per effettuare correttamente la conversione con l'accuratezza di $1/2$ LSB.

Svolgimento

Dalla [1.3] si ricava t_c :

$$t_c \leq \frac{1}{2^{n+1} \cdot \pi \cdot f_{\max}} = \frac{1}{512 \cdot \pi \cdot 300} \cong 2 \mu\text{s}$$

1.2.4 Circuito S/H

Come si è visto dagli esempi precedenti, già a frequenze basse i tempi di conversione necessari per eseguire la conversione con la necessaria accuratezza, diventano piccoli. Quando l'ampiezza delle variazioni del segnale, prelevato all'uscita dei circuiti di condizionamento, supera nel tempo di conversione $t_c = 1/2$ LSB (o per un'accuratezza minore 1 LSB), è necessario inserire tra l'uscita dei circuiti di condizionamento e l'ingresso del convertitore A/D un **Sample/Hold (S/H)**.

Il **Sample/Hold** è un dispositivo in grado di memorizzare il valore assunto dal segnale in un determinato istante (**fase di Sample**) e mantenerlo costante all'ingresso del convertitore per tutto il tempo impiegato a effettuare la conversione (**fase di Hold**) (figura 1.9).

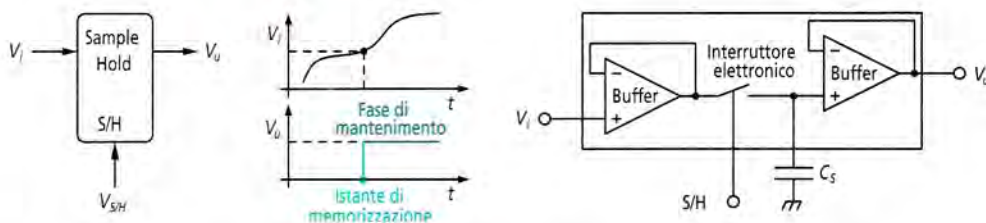


figura 1.9

Le caratteristiche dei S/H sono riportate nella **tabella 1.2**.

tabella 1.2

Caratteristiche dei S/H	
Tempo (di ritardo) di apertura t_a	È l'intervallo di tempo richiesto all'interruttore interno per aprirsi completamente dopo che è stato dato il comando di Hold.
Tempo di acquisizione t_{ac}	È il tempo necessario che intercorre dal momento in cui viene dato il comando di Sample, perché l'uscita raggiunga, entro una specificata banda di errore, il valore d'ingresso.
Tempo di incertezza di apertura t_u (o aperture jitter)	Definisce l'incertezza del ritardo d'apertura dell'interruttore tra un campionamento e l'altro. L'errore prodotto dall'incertezza dell'istante di campionamento non può essere eliminato in quanto è casuale.
Tempo di assestamento del modo di Hold t_{set}	È il tempo che occorre all'uscita per l'assestamento entro una specifica banda di errore, misurato a partire dall'istante in cui ha inizio il segnale di Hold.
Velocità di decadimento (droop rate)	È la velocità di cambiamento della tensione d'uscita durante la fase di Hold dovuta alle correnti di fuga attraverso il condensatore di memorizzazione.

Il tempo di apertura è la grandezza che determina il massimo valore della frequenza del segnale che può essere convertito. Pertanto, sostituendo il tempo di conversione t_c con quello di apertura t_a del S/H, la [1.3] diviene:

$$f_{max} \leq \frac{1}{2^{n+1} \cdot \pi \cdot t_a} \quad [1.5]$$

In realtà il *tempo di ritardo di apertura* è un valore costante che dà quindi luogo a un errore che può essere eliminato. A volte quindi è utilizzato il *tempo di incertezza di apertura*, che è più piccolo del *tempo di ritardo di apertura*.

Utilizzando la relazione [1.5] si può osservare che aumenta la massima frequenza del segnale da convertire rispetto al caso del solo convertitore in quanto, come si desume dai data sheet dei più comuni S/H, il tempo t_a è normalmente molto più piccolo di t_c .

ESEMPIO

1.5

Si scelga un S/H con tempo di apertura uguale a 20 ns facendo riferimento a un convertitore a 8 bit.

Svolgimento

Per la [1.5] il valore massimo di frequenza ammesso è:

$$f_{max} \leq \frac{1}{2^{n+1} \cdot \pi \cdot t_a} = \frac{1}{2^{8+1} \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 10^{-9}} \cong 31 \text{ kHz}$$

Come si vede l'utilizzazione di un circuito S/H permette la conversione di segnali con frequenza molto maggiori rispetto ai valori permessi dai convertitori che non utilizzano il S/H.

1.2.5 Convertitori A/D con *track-hold* interno

Alcuni convertitori hanno incorporato al loro interno un particolare *Sample-Hold* denominato *track-hold*. La differenza tra i due dispositivi è essenzialmente di tipo funzionale. Durante un ciclo di campionamento/mantenimento il *Sample-Hold* deve campionare il segnale per un breve periodo e restare in stato di mantenimento per la rimanente parte del ciclo.

Il **track-hold** è utilizzato per gran parte del ciclo con funzione di **track** (ovvero segue l'andamento del segnale d'ingresso) e solo per un breve periodo è portato nel modo di mantenimento.

Quando sono usati convertitori con *track-hold* la relazione da utilizzare per ottenere la massima frequenza del segnale da convertire è data dalla relazione:

$$f_{max} = \frac{\left. \frac{\Delta V}{\Delta t} \right|_{max}}{2 \cdot \pi \cdot V_M} \quad [1.6]$$

dove $\left. \frac{\Delta V}{\Delta t} \right|_{max}$ rappresenta lo *slew-rate* massimo del convertitore.

1.3 Campionamento dei segnali

I segnali analogici che debbono essere convertiti, in genere, non sono segnali sinusoidali e quindi possono essere scomposti in una serie infinita di segnali sinusoidali di opportuna ampiezza, frequenza e fase (serie di Fourier).

Questi segnali, componenti del segnale non sinusoidale (periodico), sono detti **armoniche**. In genere, le componenti armoniche di un segnale vanno assumendo un'ampiezza decrescente al crescere della loro frequenza e, pertanto, assumono un ruolo via via sempre meno determinante nella ricostruzione del segnale stesso. Per questo spesso è possibile trascurare le armoniche con una frequenza superiore a un certo valore nella ricostruzione di un segnale. In tal caso si considera questa frequenza come la massima contenuta nel segnale analogico da convertire (si veda paragrafo 1.2.1 fenomeno dell'aliasing).

Le espressioni [1.3], [1.5] e [1.6] che forniscono la massima frequenza di un segnale sinusoidale che può essere convertito con un sistema con solo convertitore, con convertitore e S/H o con convertitore con *track-hold* interno, sono state trovate tenendo conto **soltamente del fatto che il segnale deve rimanere costante durante la fase di conversione**. Per poter ricostruire correttamente un segnale, però, occorre tenere conto anche del **teorema del campionamento di Shannon**.

Secondo il suddetto teorema di Shannon un segnale periodico la cui massima frequenza è f_{max} può essere ricostruito se la frequenza di campionamento f_c è:

$$f_c \geq 2 f_{max}$$

In realtà conviene effettuare il **campionamento**, se possibile, a frequenze superiori a $2 f_{max}$ (almeno $5 f_{max}$) in modo da poter utilizzare filtri con minor attenuazione dopo la f_{max} . Tenendo conto di queste considerazioni, per una corretta conversione dei segnali, si deve prendere in esame la **massima frequenza di campionamento (sampling rate)** che può essere utilizzata in un circuito di acquisizione costituito da un convertitore A/D e da un circuito S/H o da un convertitore con *Track-Hold* interno. Nel caso venga usato il solo convertitore A/D (senza S/H), in teoria occorrerebbe attendere, prima di effettuare una nuova conversione, che sia trascorso il solo tempo t_c . In realtà, in tutti i casi, si deve tenere sempre conto anche del tempo impiegato dal software per memorizzare o elaborare il dato acquisito.

1.3.1 Campionamento con ADC e S/H

La massima frequenza di campionamento è legata sia al tempo di conversione dell'ADC che ai tempi necessari per campionare e mantenere il segnale (figura 1.10). In effetti, prima di poter avviare una nuova conversione bisogna attendere che il convertitore abbia terminato la conversione precedente e che il S/H fornisca un segnale stabile in uscita.

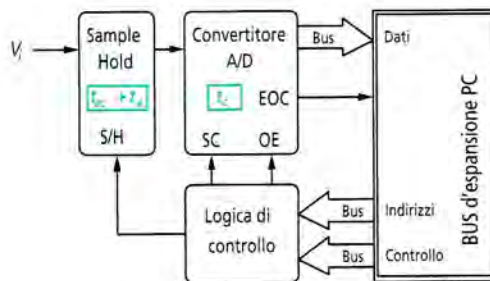


figura 1.10

Si deve quindi attendere un tempo pari alla somma del tempo di acquisizione t_{ac} e del tempo di apertura t_a del S/H più il tempo t_c di conversione dell'ADC:

$$t_{ac} + t_a + t_c$$

Quindi per la massima frequenza di campionamento si ha:

$$f_{Cmax} \leq \frac{1}{(t_{ac} + t_a + t_c)} \quad [1.7]$$

In accordo con il teorema di campionamento di Shannon, il segnale, per poter essere campionato correttamente con il S/H, deve avere un valore massimo della frequenza pari a:

$$f_{max} \leq \frac{f_{Cmax}}{2} = \frac{1}{2 \cdot (t_{ac} + t_a + t_c)} \quad [1.8]$$

1.6

Si calcoli la massima frequenza di campionamento e la massima frequenza di ripetizione per un sistema composto dal convertitore a 8 bit ADC0804 ($t_c \cong 100 \mu s$) e il Sample-Hold LF398 (tempo di apertura $t_a = 250 ns$, tempo di acquisizione $t_{ac} = 4 \mu s$ con condensatore di campionamento $C_s = 1000 pF$). Il segnale da convertire è sinusoidale.

Svolgimento

Per un'accuratezza di $1/2$ LSB con il solo convertitore applicando la [1.3], si ottiene $f_{max} \cong 6,2 Hz$, mentre utilizzando anche il S/H per la [1.6] si ha:

$$f_{max} \leq \frac{1}{2^{n+1} \cdot \pi \cdot t_a} = \frac{1}{2^{8+1} \cdot 3,14 \cdot 250 \cdot 10^{-9}} \cong 2,5 kHz$$

Si deve ora controllare il limite di frequenza imposto dal teorema del campionamento applicando la [1.6]:

$$f_{max} \leq \frac{1}{(t_{ac} + t_a + t_c)} = \frac{1}{(4 \cdot 10^{-6} + 250 \cdot 10^{-9} + 100 \cdot 10^{-6})} \cong 9,6 kHz$$

La massima frequenza che potrebbe avere il segnale per essere campionato correttamente per il teorema di Shannon è la [1.8]:

$$f_{Cmax} \leq \frac{f_{Cmax}}{2} = \frac{9,6 \cdot 10^3}{2} = 4,8 \text{ kHz}$$

Tuttavia, le caratteristiche del S/H (*tempo di apertura*) impongono che il segnale non possa avere una frequenza superiore a $f_{max} \cong 2,5 \text{ kHz}$. È quindi conveniente campionare il segnale con la massima frequenza di ripetizione possibile, ovvero con $f_{Cmax} \cong 9,6 \text{ kHz}$. In tal modo, poiché il segnale ha $f_{max} \cong 2,5 \text{ kHz}$, esso viene campionato con una frequenza pari a circa 3,8 volte quella massima e il teorema di Shannon è rispettato.

esempio 1.7

Con un sistema di conversione a 8 bit con ADC e S/H, si voglia convertire un segnale sinusoidale con frequenza massima pari a 3 kHz. Si determini il tempo di conversione necessario per il convertitore e quello di apertura per il S/H. Il campionamento deve essere effettuato a una frequenza pari a otto volte quella massima del segnale.

Svolgimento

Nel sistema, essendo presente il S/H, la f_{max} è legata al tempo di apertura del S/H e non al tempo di conversione in base alla [1.5]. Si ha quindi per il tempo di apertura del S/H:

$$t_a \leq \frac{1}{2^{n+1} \cdot \pi \cdot f_{max}} = \frac{1}{2^9 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^3} \cong 200 \text{ ns}$$

La frequenza di ripetizione del campionamento deve essere:

$$f_C = 8 \cdot 3000 = 24 \text{ kHz}$$

Ma dovendo essere la massima frequenza di campionamento:

$$f_{Cmax} \leq \frac{1}{(t_{ac} + t_a + t_c)}$$

si avrà:

$$(t_{ac} + t_a + t_c) \leq \frac{1}{f_{Cmax}} = \frac{1}{24 \cdot 10^3}$$

Se viene scelto come S/H l'AD585, con $t_a = 35 \text{ ns}$ e $t_{ac} = 3 \mu\text{s}$ il convertitore può avere un tempo di conversione t_c dato da:

$$t_c \leq \frac{1}{24 \cdot 10^3} - t_{ac} - t_a = \frac{1}{24 \cdot 10^3} - 3 \cdot 10^{-9} \cong 38 \mu\text{s}$$

1.3.2 Campionamento con un ADC con track-hold interno

Quando il campionamento del segnale è effettuato con un A/D dotato di *track-hold* la *massima frequenza di ripetizione* è normalmente legata alle operazioni che avvengono all'interno del dispositivo per effettuare la conversione. Riferendosi al caso dei convertitori AD7820 (ADC0820) e AD7821 la massima frequenza di ripetizione è espressa dalla seguente relazione:

$$f_{Cmax} \leq \frac{1}{(t_{WR} + t_{RD} + t_{RI} + t_P)} \quad [1.9]$$

tabella 1.3

		AD7820	AD7821
t_{WR}	Larghezza del segnale WR	600 ns	250 ns
t_{RD}	Ritardo tra WR e RD	600 ns	250 ns
t_{RI}	Ritardi tra RD e INT	140 ns	150 ns
t_P	Ritardo tra due conversioni	500 ns	350 ns
f_{Cmax}	Sampling rate (ricavata con la 1.9)	543 kHz	1 MHz
f_{max}	Massima frequenza del segnale (ricavata con la 1.6)	7 kHz	100 kHz

Come si può osservare dalla **tabella 1.3**, il *sampling rate* è in ambedue i casi molto superiore alla massima frequenza che può contenere il segnale da convertire e, per questo, anche effettuando un campionamento con frequenza pari a $5f_{max}$ (rispettando il teorema del campionamento e la ricostruzione del segnale con filtri facilmente realizzabili), ci si trova ben al di sotto della *massima frequenza di ripetizione* ammissibile (7 kHz e 100 kHz).

1.4 Architettura di un sistema di acquisizione multicanale

Quando è necessario rilevare più grandezze il sistema di acquisizione diviene più complesso di quello appena esaminato in quanto la sua struttura è costituita da parecchie catene del tipo monocanale, ognuna delle quali è preposta al trattamento del segnale elettrico proveniente da uno specifico trasduttore.

Generalmente si tratta di catene di acquisizione in parallelo e indipendenti le une dalle altre almeno fino al filtro passa basso incluso. Si possono adottare diverse scelte a seconda delle esigenze specifiche. In **figura 1.11** è riportata la struttura di una catena di acquisizione a più canali per segnali le cui frequenze non sono elevate.

Questa soluzione prevede un unico circuito S/H e un unico convertitore A/D; la selezione del canale è resa possibile da un **multiplexer analogico (MUX)** schematizzato con un commutatore elettronico a più ingressi e una sola uscita. Tra tutti i segnali presenti agli ingressi del MUX, è avviato verso l'uscita solo quello selezionato sulla base della configurazione dei livelli digitali presenti agli ingressi di selezione S_0, S_1, \dots, S_n .

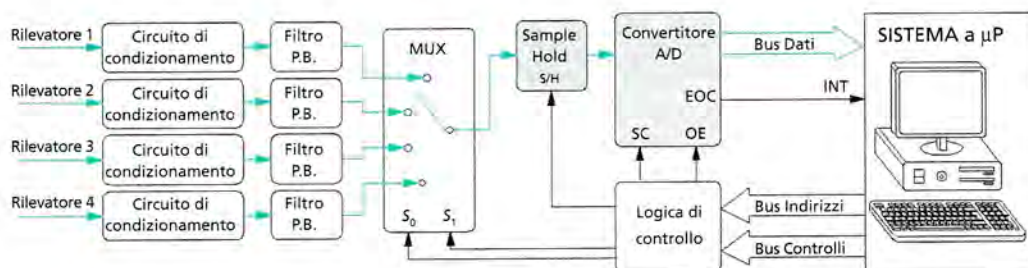


figura 1.11

Un MUX analogico è caratterizzato dai parametri riportati nella **tabella 1.4**.

tabella 1.4

Caratteristiche dei multiplexer	
Errore di trasferimento	È la differenza tra il valore del segnale d'uscita e quello d'ingresso misurati in presenza del carico.
Settling time T_S	È l'intervallo di tempo che intercorre tra l'istante in cui l'interruttore si chiude e l'istante in cui l'uscita raggiunge il valore di regime entro una banda di errore specificata.
ON switching time T_{on}	È il tempo richiesto per connettere l'ingresso all'uscita del MUX.
Crosstalk	È definito come il rapporto tra il segnale applicato all'ingresso del canale selezionato e la parte del segnale dispersa in uscita con tutti i canali d'ingresso collegati in parallelo (causato dalle capacità parassite tra l'ingresso selezionato e i canali adiacenti non selezionati).
Trough rate	È la massima velocità di commutazione da un canale all'altro. Un buon MUX deve avere un elevato valore di <i>trough rate</i> .
Transient time	È il tempo che intercorre tra il disinserimento di un canale e l'inserimento di quello successivo. Il suo valore deve essere tale da garantire l'inserimento di un solo canale per volta.

Quando in un sistema di acquisizione è presente il MUX per il calcolo della *massima frequenza di ripetizione*, deve essere tenuto conto anche del tempo T_{MUX} che occorre affinché, dal momento della selezione di un canale, il dato all'uscita del MUX sia stabile. Questo periodo di tempo è dato da: $T_{MUX} = T_{on} + T_S$.

Se i canali d'ingresso sono N e ognuno di essi deve essere campionato alla medesima frequenza f_C , allora la frequenza f_{TC} di campionamento dell'intero sistema deve essere:

$$f_{TC} = N \cdot (f_C + f_{MUX})$$

$$\text{con } f_{MUX} = 1/T_{MUX}$$

Se il sistema è dotato di *Sample-Hold* e se la scelta del canale del MUX è effettuata quando il S/H è nello stato di *Hold*, il T_{MUX} non influenza la *massima frequenza di ripetizione*. Nelle catene di acquisizione a più canali è preferibile spesso utilizzare convertitori A/D con il circuito del S/H integrato nello stesso chip (ad esempio l'AD1674 della *Analog Devices*), o anche convertitori con S/H e *multiplexer* interno, riducendo la complessità circuitale del sistema.

Se i segnali da acquisire sono lentamente variabili, quasi DC, e quindi non è necessario il circuito S/H, è possibile utilizzare convertitori a più canali d'ingresso del tipo ADC0808 (a 8 canali) o ADC0816 (a 16 canali), con tempo di conversione di 100 μ s, prodotti dalla *National*. L'ADC0816 presenta anche un aspetto interessante in quanto l'uscita del MUX non è connessa internamente direttamente con l'ingresso del convertitore, permettendo quindi di inserire un unico S/H esterno per servire tutti i canali.

Convertitori con tempi di conversione t_c abbastanza ridotti, a uno o più canali, adottano per la conversione la tecnica detta *Half/Flash*. Si citano come esempio l'AD7821 (8 bit, 1 canale, $t_c \cong 660$ ns), AD7824 (8 bit, 4 canali, $t_c \cong 2,5$ μ s per canale), prodotti dall'*Analog Devices*.

Test di verifica

■ Stabilisci se le seguenti affermazioni sono vere o false.

1. Un segnale generato da un trasduttore analogico può essere acquisito direttamente da un sistema a μP .
☐ vero
☐ falso
2. Il circuito di condizionamento di un sistema di acquisizione dati analogici può linearizzare anche la caratteristica Ingresso/Uscita del trasduttore.
☐ vero
☐ falso
3. Il sottosistema di controllo, in un sistema di acquisizione dati, genera anche i segnali di controllo e di temporizzazione per i sottosistemi di acquisizione e di distribuzione.
☐ vero
☐ falso
4. In un sistema di acquisizione dati il sottosistema di controllo non può essere costituito da un microcontrollore.
☐ vero
☐ falso
5. I segnali forniti dai trasduttori devono essere opportunamente trasformati in modo che possano essere adattati alle specifiche d'ingresso del convertitore A/D.
☐ vero
☐ falso
6. Per un trasduttore a variazione di resistenza la trasformazione $R \Rightarrow V$ è necessaria perché il convertitore A/D possa effettuare la conversione del segnale.
☐ vero
☐ falso
7. La linearizzazione della caratteristica Ingresso/Uscita del trasduttore è solo di tipo Hardware.
☐ vero
☐ falso
8. Il fenomeno di aliasing si genera quando si campiona un segnale analogico, a causa delle componenti armoniche, in esso contenute.
☐ vero
☐ falso
9. Per ridurre al minimo il fenomeno di aliasing è necessario inserire nella catena d'acquisizione un filtro passa alto in grado di attenuare i segnali fuori banda.
☐ vero
☐ falso
10. Il numero di bit n di un convertitore A/D indica anche il numero delle linee di uscita che il dispositivo deve avere per generare un codice binario.
☐ vero
☐ falso
11. Il tempo di conversione (t_c) è l'intervallo di tempo impiegato dal convertitore per trasformare la grandezza analogica posta in ingresso nel corrispondente codice digitale.
☐ vero
☐ falso
12. Il termine LSB indica il bit più significativo del codice binario del convertitore A/D.
☐ vero
☐ falso
13. Il Sample/Hold (S/H) è necessario per acquisire un segnale analogico lentamente variabile.
☐ vero
☐ falso
14. Nel Sample/Hold la fase di Hold precede quella di Sample.
☐ vero
☐ falso
15. Il termine Track ha lo stesso significato di Sample.
☐ vero
☐ falso
16. Il teorema di Shannon afferma che la ricostruzione di un segnale periodico campionato deve essere fatta con una frequenza pari a quella dell'armonica fondamentale.
☐ vero
☐ falso
17. Il MUX è un commutatore elettronico con più ingressi e una sola uscita.
☐ vero
☐ falso

Sistemi di distribuzione dati

Nei sistemi di controllo è spesso necessario inviare segnali dal sistema a microprocessore agli attuatori, ovvero a quei dispositivi che sono in grado di modificare l'evoluzione dei processi stessi.

In un sistema di controllo si può, per esempio:

- modificare la temperatura in un processo di riscaldamento;
- controllare la velocità di un albero motore in rotazione o modificare la sua posizione;
- regolare la pressione di un determinato apparato o di un ambiente;
- modificare il flusso di un liquido regolando l'apertura di una elettrovalvola;
- ecc.

È necessario in tali casi inviare, ovvero *distribuire*, i segnali digitali presenti all'interno del sistema di controllo (PC o altro) agli attuatori a esso collegati.

Una **catena di distribuzione** può essere realizzata adottando tecniche diverse a seconda del tipo e del numero di attuatori su cui intervenire e in base alle modalità con cui si deve operare su di essi.

Si esaminano di seguito alcune delle possibili e più usuali soluzioni relative alla realizzazione di catene di distribuzione.

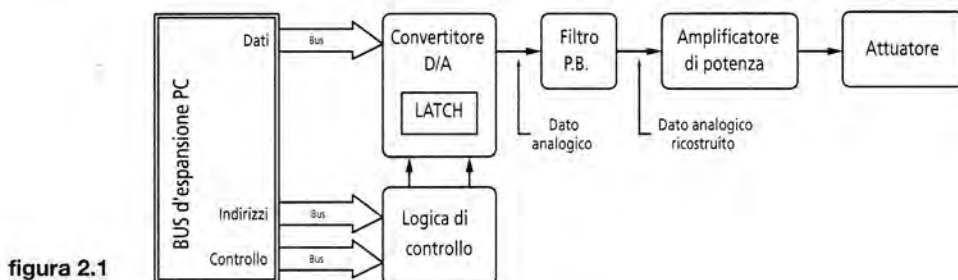
2.1 Sistema di distribuzione dati a un solo canale

Nella **figura 2.1** è riportato lo schema di principio di un sistema di distribuzione dati analogici a **un solo canale**.

Si presuppone che in esso si debba agire su un solo attuttore per il controllo di una determinata grandezza fisica (velocità, temperatura, posizione, ecc.).

In tal caso i dati digitali, elaborati dal sistema a microprocessore, sono trasformati in segnali analogici con un convertitore D/A e, dopo essere stati opportunamente filtrati, se necessario, sono amplificati e inviati all'attuttore.

Vengono esaminati di seguito i vari blocchi costituenti il sistema.



■ Interfaccia sistema a μ P e convertitore D/A

È costituita nella maggior parte dei casi da flip-flop di tipo *D* con uscita *three-state* del tipo 74LS374 o 74LS574.

L'utilizzazione dei latch è legata alla necessità di dover mantenere in uscita il dato proveniente dal sistema a microprocessore (PC) per tempi più o meno lunghi, durante la conversione che deve effettuare il convertitore.

Il convertitore D/A effettua la trasformazione *digitale/analogica* del dato a n bit memorizzato nei latch.

Se il convertitore D/A è dotato di latch interni, il dato digitale presente sul bus dati del sistema a microprocessore è inviato direttamente al DAC.

Per ridurre la complessità circuitale del sistema è consigliabile utilizzare convertitori D/A che hanno il latch integrato nel chip.

Il segnale analogico presente all'uscita del DAC può essere, a seconda del tipo di convertitore utilizzato, in *tensione* o in *corrente*. Nel secondo caso è necessario far seguire al convertitore D/A un convertitore *corrente/tensione* (I/V).

■ Logica di controllo

È costituita da circuiti di decodifica, e in alcuni casi di temporizzazione, che debbono fornire i segnali di abilitazione per il circuito latch del convertitore D/A.

■ Filtro passa-basso

Attenua le componenti di alta frequenza dovute alle discontinuità presenti nel segnale generato dal DAC.

Il filtro passa-basso serve per ricostruire la grandezza analogica in modo appropriato poiché il DAC genera un segnale a gradini e non un vero segnale analogico.

Il filtro deve avere una curva di risposta il più possibile piatta all'interno della sua banda passante e la frequenza di taglio deve essere tale da lasciare transitare tutti i segnali con frequenze necessarie per una buona ricostruzione del segnale.

Il filtro è utilizzato solo in alcuni tipi di sistemi di distribuzione dati. In molte applicazioni le caratteristiche dell'attuatore sono tali da non richiedere l'attenuazione preventiva delle componenti in alta frequenza del segnale a esso applicato (è il caso, ad esempio, di attuatori di tipo elettromeccanico come un motore, un'elettrovalvola motorizzata).

■ Preamplificatore e amplificatore di potenza

Amplifica il segnale d'uscita del convertitore o del filtro perché l'attuatore richiede per il suo funzionamento correnti e tensioni elevate. A volte si procede prima a una preamplificazione e poi a un'amplificazione di potenza.

La gamma di dispositivi di amplificazione utilizzati è molto varia e dipende in particolare dal tipo di attuatore da controllare. Si possono utilizzare amplificatori a BJT, a MOSFET di potenza, o di tipo integrato con specifiche caratteristiche o dispositivi con SCR o TRIAC.

2.2 Sistema di distribuzione analogico multicanale

Nel caso si debba effettuare il controllo di più attuatori è necessario utilizzare più catene di distribuzione del tipo di quella monocanale precedentemente analizzata.

In tal caso ognuna di esse è indipendente dall'altra ed è preposta alla manipolazione del segnale elettrico diretto verso uno specifico attuatore.

Un esempio di struttura di *sistema di distribuzione multicanale* è riportato in figura 2.2.

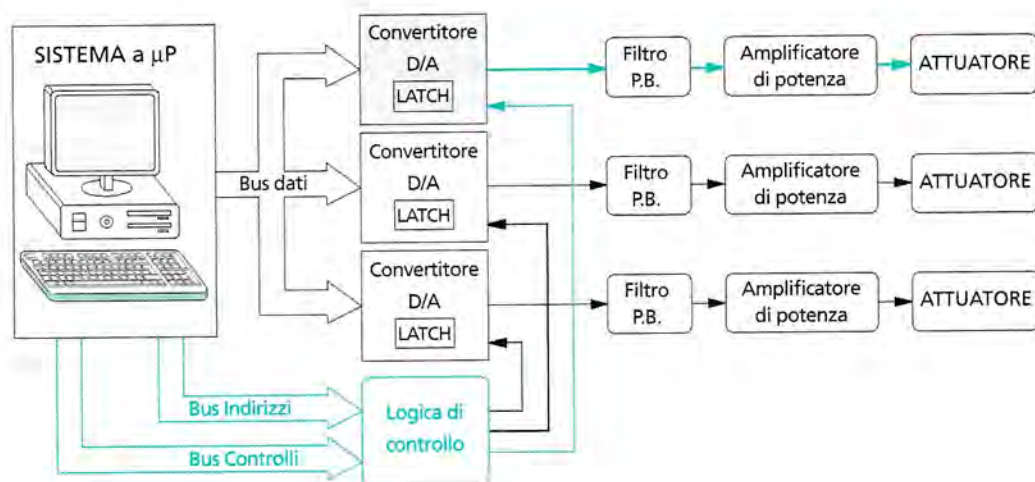


figura 2.2

In questa struttura sono utilizzati tanti convertitori quanti sono gli attuatori da controllare. Se vengono adoperati DAC con latch interno, la logica di controllo deve fornire per ciascuno di essi un segnale distinto che abiliti la memorizzazione del dato presente sul bus dati del sistema sul convertitore a cui esso è destinato. I dati da convertire per ciascun DAC possono essere aggiornati dal sistema in modo sequenziale o casuale. Nel caso in cui i latch siano esterni al convertitore i segnali di controllo non agiscono direttamente sul DAC ma sui latch stessi.

La struttura di una catena multicanale è semplificata se vengono utilizzati integrati che contengono al loro interno più convertitori D/A come ad esempio l'AD7528 (doppio convertitore D/A con latch interno per ogni convertitore, uscita in corrente), l'AD7226 (4 DAC con latch interno per ogni convertitore, uscita in tensione), l'AD7228 (8 DAC con latch interno per ogni convertitore, uscita in tensione).

Una struttura multicanale alternativa alla precedente è quella che utilizza un solo DAC e un *demultiplexer* analogico (DEMUX) per distribuire i dati convertiti ai vari attuatori (**figura 2.3**). È necessario in questo caso memorizzare di volta in volta il dato analogico presente su una specifica uscita del DEMUX e diretto verso l'attuatore.

A tale scopo possono essere utilizzati dei S/H che effettuano al momento opportuno il campionamento del segnale, quando è abilitato il canale corrispondente del DEMUX, e lo mantengono poi in stato di *Hold*.

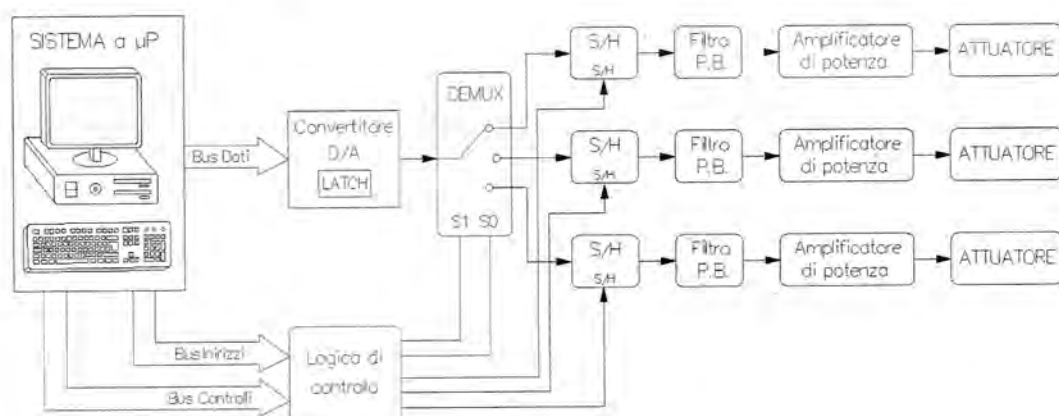


figura 2.3

È da osservare che i circuiti S/H utilizzati nella precedente struttura devono avere un basso valore di *drop-rate*, ovvero avere lunghi tempi di mantenimento.

Si rende comunque necessario un rinfresco dei dati dei vari canali dopo un periodo di tempo legato al decadimento del valore memorizzato.

Le caratteristiche dei convertitori D/A sono riassunte nella **tabella 2.1**.

tabella 2.1

Caratteristiche dei convertitori D/A	
<i>Risoluzione</i>	È il numero di livelli di tensione o di corrente distinti che il convertitore è in grado di produrre in uscita. Per un convertitore a n bit si possono avere 2^n livelli in uscita separati l'uno dall'altro di una quantità pari a $1/2^n$ (1 LSB).
<i>Tempo di assestamento</i>	È il tempo necessario perché dopo un cambiamento del codice d'ingresso, l'uscita del DAC si stabilizzi entro una specificata banda di errore (di solito $\pm 1/2$ LSB).
<i>Glitch</i>	È un disturbo di forma impulsiva che si presenta in uscita quando c'è la variazione del codice in ingresso.
<i>Errori di offset</i>	È l'errore dovuto allo scostamento dal valore ideale zero in uscita, quando in ingresso è applicato il codice digitale zero.
<i>Errore di guadagno</i>	È lo scostamento tra il valore d'uscita ideale e quello reale prodotto da un codice d'ingresso che dovrebbe produrre un valore di fondo scala. È espresso come percentuale del fondo scala o in LSB. In pratica l'errore di guadagno provoca una variazione della pendenza della curva di risposta del convertitore rispetto a quella ideale.
<i>Errore di non linearità integrale</i>	È il peggior caso di scostamento dell'uscita dalla retta tra lo zero e il fondo scala.
<i>Errore di non linearità differenziale</i>	È la misura del peggior caso di deviazione dal gradino ideale di un LSB. Ovvero due codici digitali consecutivi dovrebbero produrre due valori analogici che differiscono esattamente per un LSB. Quando c'è uno scostamento da tale valore si produce un <i>errore di non linearità differenziale</i> .

Nella **figura 2.4** è rappresentata la caratteristica di trasferimento di un convertitore D/A a tre bit.

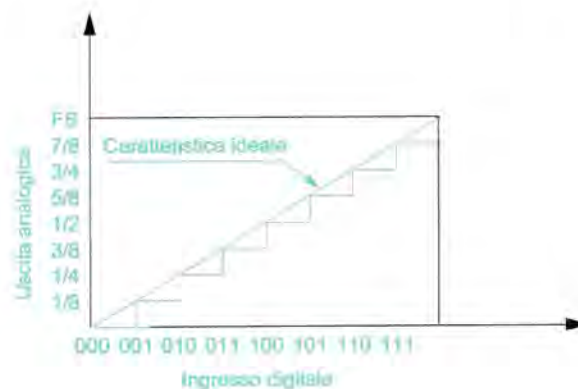


figura 2.4

Test di verifica

■ Stabilisci se le seguenti affermazioni sono vere o false.

1. La catena di distribuzione è detta multicanale perché distribuisce in uscita più segnali di comando per gli attuatori.
☐ vero
☐ falso
2. La logica di controllo di una catena di distribuzione multicanale controlla l'amplificatore di potenza.
☐ vero
☐ falso
3. I convertitori D/A forniscono in uscita solo segnali in corrente.
☐ vero
☐ falso
4. È sempre necessario utilizzare il filtro passa-basso in una catena di distribuzione.
☐ vero
☐ falso
5. L'amplificazione del segnale di uscita dal convertitore D/A è necessaria perché gli attuatori richiedono, per il loro funzionamento, alte potenze.
☐ vero
☐ falso
6. La logica di controllo in una catena di distribuzione multicanale controlla separatamente i convertitori D/A.
☐ vero
☐ falso
7. La catena di distribuzione multicanale con demultiplexer può essere strutturata con un solo DAC.
☐ vero
☐ falso
8. Nel convertitore D/A il GLITCH è lo scostamento tra il valore di uscita ideale e quello reale prodotto dal codice d'ingresso.
☐ vero
☐ falso