

## **CAPITOLO IV**

# **I SISTEMI AUTOMATICI DI MISURA**

Giovanni Betta e Luigi Ferrigno

## 1 Introduzione

L'evoluzione dell'elettronica, dell'informatica e delle telecomunicazioni ha reso disponibile sul mercato un numero enorme di dispositivi elettronici di notevoli prestazioni con cui ognuno interagisce nella vita di tutti i giorni.

In particolare, nel campo della strumentazione elettronica, la succitata evoluzione tecnologica ha permesso la realizzazione di strumenti capaci di effettuare misure anche complesse in tempi sempre minori, di accumulare quantità di informazioni sempre crescenti, e di trasmettere in qualsiasi posto del mondo e sempre più sicuramente e velocemente le informazioni immagazzinate ed elaborate.

L'aumento delle potenzialità della strumentazione comporta anche un aumento delle difficoltà e del costo dell'esecuzione delle misure in modo manuale (cioè mediante l'intervento dell'operatore). È quindi giustificato l'interesse dei costruttori di strumentazione elettronica allo sviluppo di sistemi in grado di sostituirsi all'operatore per svolgere compiti di misura complessi dal punto di vista esecutivo (algoritmi di misura complicati) e/o ripetitivi.

Questa esigenza riveste particolare interesse nel campo della metrologia legale dove la sostituzione dell'operatore umano con procedure automatiche può essere associata ad un incremento dell'affidabilità del procedimento di misura e conseguentemente dei risultati ottenuti.

Si parla quindi di **sistemi automatici di misura** quando la presenza di una unità di controllo consente di sollevare l'operatore da una o più delle attività a lui normalmente demandate. I sistemi automatici di misura trovano il loro impiego nelle più svariate applicazioni, contribuendo in maniera notevole sia alla semplificazione dei processi di misura sia all'incremento dell'affidabilità e della precisione del risultato di misura stesso.

In questo capitolo saranno dapprima descritte le diverse architetture di sistemi automatici di misura, descrivendo i diversi componenti tipici. Successivamente, con riferimento ad architetture che prevedono interconnessione tra più strumenti di misura, si introdurranno i diversi standard di interfacciamento.

Qualche considerazione sarà infine fatta sul software che può essere utilizzato per la programmazione di sistemi automatici di misura.

## 2 Architetture di sistemi automatici di misura

Un sistema automatico di misura ha una struttura che varia considerevolmente a seconda del costruttore, del costo, del campo di utilizzo o di altre caratteristiche quali, ad esempio, la sua riconfigurabilità (capacità di modificare l'architettura hardware e/o software per consentirne l'utilizzo in più applicazioni).

Nel seguito verrà dapprima descritta l'architettura più semplice di sistema automatico di misura, in cui viene misurata un'unica grandezza fisica, passando ad architetture via via più complesse fino ad architetture in cui l'unità di controllo è collegata a più strumenti di misura.

- **SISTEMA AUTOMATICO PER LA MISURA DI UN'UNICA GRANDEZZA FISICA**

Il più semplice sistema di automatico misura è comunque formato da una catena di elementi che ne caratterizzano sia la qualità sia il campo di impiego. Con riferimento alla Fig. 1, è possibile individuare i seguenti elementi:

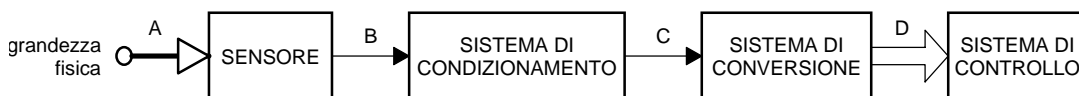


Fig. 1. Schema a blocchi di un sistema automatico per la misura di una grandezza fisica.

- un sensore, che provvede a estrarre l'informazione d'interesse dalla grandezza fisica a cui è collegato ed a trasferirla, sotto forma di segnale (di definite caratteristiche), al sistema successivo;
- un sistema di condizionamento, che provvede a modificare ed ottimizzare le caratteristiche del segnale proveniente dal sensore nei confronti del sistema successivo;
- un sistema di conversione, che provvede a trasformare la natura dell'informazione da analogica a numerica, in modo che, sotto quest'ultima forma, venga trasferita al sistema successivo;

- un sistema di controllo, che provvede a memorizzare od elaborare l'informazione numerica ottenuta dal sistema precedente secondo una prefissata sequenza di operazioni registrata in un opportuno programma; tale sistema di controllo può essere, inoltre, a sua volta collegato con un sistema di attuatori (non riportato in figura) per eseguire eventuali operazioni funzionalmente connesse con il risultato della misura.

Il collegamento fra la grandezza fisica ed il sensore (collegamento A) è di tipo generalmente connesso alla natura della grandezza fisica d'interesse e di lunghezza praticamente nulla: la grandezza fisica agisce direttamente sul sensore.

I collegamenti B e C, invece, sono generalmente di natura analogica, ovvero l'informazione d'interesse è legata direttamente alle caratteristiche (ampiezza, frequenza, ecc.) del segnale che la trasporta. La lunghezza di tali collegamenti può variare in funzione delle soluzioni architettoniche adottate: generalmente si preferisce, a parità di altre condizioni, realizzare il collegamento B con lunghezza quanto più piccola possibile, in modo da minimizzare il pericolo di interferenze che possono alterare il contenuto informativo del segnale non ancora trattato dal sistema di condizionamento. La lunghezza del collegamento C, invece, generalmente non comporta problemi, in quanto è sempre possibile sviluppare una tecnica di trasmissione che minimizzi l'influenza delle interferenze in relazione al supporto fisico attraverso cui avviene il collegamento (canale di trasmissione).

Per il collegamento B, il canale di trasmissione è generalmente di natura elettrica e consiste, materialmente, in conduttori stesi fra il sensore ed il sistema di condizionamento. In casi particolari, quali sistemi di misura impiegati in ambienti con particolari requisiti di sicurezza o in ambienti con stringenti requisiti di immunità ai disturbi di natura elettromagnetica (EMC), il collegamento B può essere realizzato con canali di trasmissione di natura ottica (fibre ottiche) o pneumatica, con l'interposizione di opportuni dispositivi (interfacce) atti a trasformare il segnale proveniente dal sensore rispettivamente in un fascio di luce modulata o in una variazione di pressione di un gas, e viceversa.

Il collegamento C, invece, è generalmente di natura elettrica (cavi direttamente collegati fra il sistema di condizionamento ed il sistema di conversione) o di natura elettromagnetica (onde convogliate che sfruttano il supporto della rete di alimentazione elettrica, sistemi di trasmissione basati su linee telefoniche, collegamenti realizzati mediante trasmissione di segnali radio).

Nel secondo caso, ovviamente, è necessario interporre le necessarie interfacce per la trasformazione e la ritrasformazione del segnale di misura.

Il collegamento D, infine, è di tipo numerico o digitale, ovvero l'informazione è portata da una combinazione di codici associati generalmente a due livelli di tensione. In tal caso, il canale di trasmissione è di natura elettrica o ottica. La lunghezza di tale collegamento è variabile a seconda delle soluzioni architeturali adottate come vedremo meglio nel seguito (collegamento punto-punto, a bus, ecc.). Generalmente tale collegamento è immune alle interferenze elettromagnetica, mentre possono nascere problemi riguardanti l'attenuazione dei segnali.

• **SISTEMI AUTOMATICI PER LA MISURA DI PIU' GRANDEZZE FISICHE**

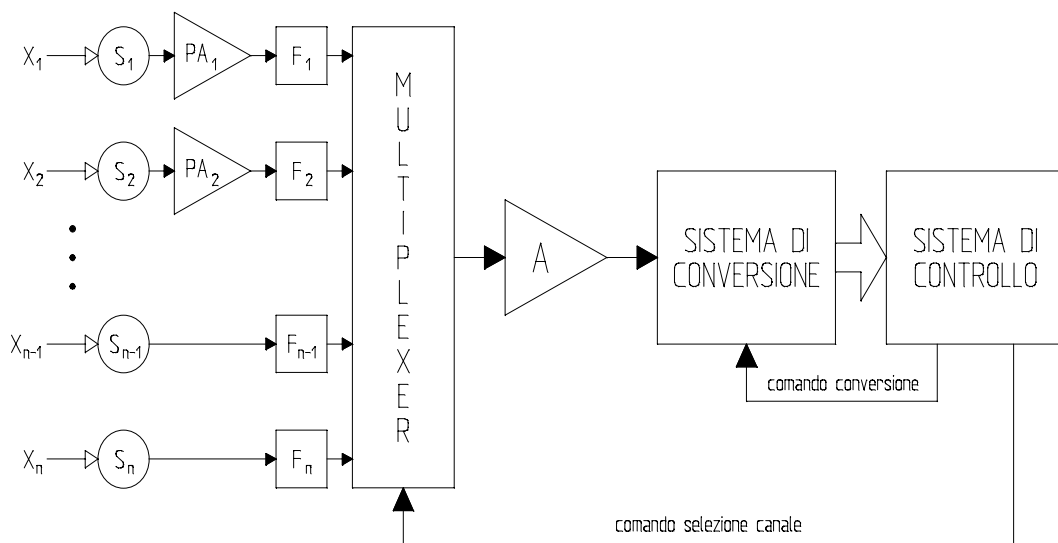


Fig. 2. Architettura di un sistema automatico per la misura di  $n$  grandezze fisiche.

Di solito, i sistemi di misura sono realizzati per misurare più grandezze fisiche contemporaneamente, al fine sia di ottimizzarne il costo sia di associare all'interno dello stesso sistema tutte le informazioni relative allo stesso processo (in modo da utilizzare un unico sistema di controllo). Per tali sistemi è possibile sviluppare soluzioni architeturali che prevedono, per  $n$  grandezze fisiche d'interesse, la duplicazione e la parallelizzazione di più sistemi.

In generale, è sempre realizzata la duplicazione dei sensori, in quanto generalmente ogni sensore accetta in ingresso una sola grandezza fisica. Di conseguenza, volendo riprodurre lo schema di Fig. 1, sarebbe necessaria la duplicazione sia del sistema di condizionamento sia del sistema di conversione, vista l'unicità del sistema di controllo (tale unicità è possibile in quanto allo stesso sistema di controllo possono essere collegati più sistemi di conversione). Tale soluzione, tuttavia, è oltremodo onerosa, a causa degli alti costi dei sistemi di conversione (in relazione alle altre parti costituenti il sistema di misura). Salvo casi particolari (analizzati nel prosieguo), si tende quindi ad utilizzare un unico sistema di conversione, al quale vengono collegati, in tempi successivi, i segnali provenienti dai sensori. Tale collegamento avviene con l'interposizione, fra il sistema di conversione e gli  $n$  sistemi di condizionamento, di un particolare elemento, il multiplexer, che, opportunamente comandato dal sistema di controllo, provvede al collegamento in maniera sequenziale (un canale dopo l'altro) o indirizzata (un determinato canale). Al fine di ottimizzare ulteriormente l'architettura del sistema di misura, spesso il sistema di condizionamento è suddiviso in due sottosistemi, posti prima e dopo il multiplexer. Di conseguenza, viene duplicato solo il primo sottosistema, mentre il secondo è unico ed è posto a ridosso del sistema di conversione. I primi sottosistemi sono posti nelle immediate vicinanze dei sensori e provvedono a trattare i vari segnali di misura in modo da esaltare l'informazione d'interesse e rendere i segnali fra loro quanto più omogenei possibile (ad esempio, normalizzando i livelli di tensione mediante amplificazione, operando un filtraggio sul segnale, ecc.) prima di essere collegati al multiplexer. Il secondo sottosistema di condizionamento, invece, si occupa unicamente di normalizzare i segnali provenienti dal multiplexer nei confronti del sistema di conversione (adattando i livelli di tensione al range d'ingresso del convertitore, adattando le impedenze, ecc.). Alla luce di quanto detto, è possibile quindi espandere lo schema di Fig. 1 nello schema di Fig. 2, in cui i sottosistemi di condizionamento a monte del multiplexer sono rappresentati da preamplificatori (PA, ove necessari per sensori con uscita a basso livello) e filtri (F), mentre il sottosistema di condizionamento a valle del multiplexer è rappresentato da un amplificatore/adattatore (A) a guadagno fisso.

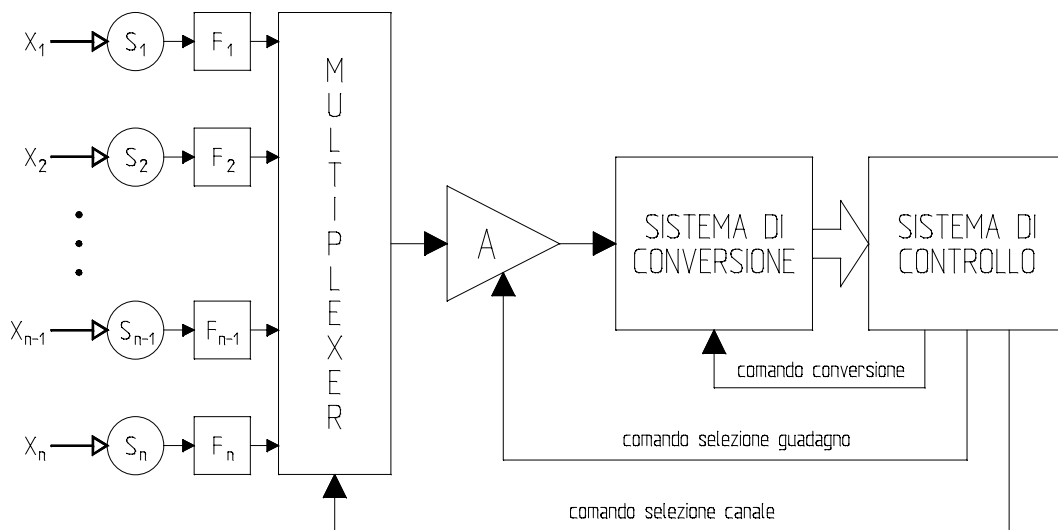


Fig. 3. Architettura di un sistema automatico di misura con amplificatore programmabile.

Un'ulteriore risparmio economico, specie quando i sensori sono numerosi e con uscite miste a basso ed alto livello, può essere realizzato adottando lo schema di Fig. 3. In esso non sono più presenti i preamplificatori (PA) a valle dei sensori con uscita a basso livello e la normalizzazione dei livelli dei segnali è operata dall'amplificatore (A) posto a valle del multiplexer. In questo caso, però, tale amplificatore deve avere guadagno variabile e programmabile in funzione del canale a cui esso è collegato tramite il multiplexer. Di conseguenza, è necessario che il sistema di controllo fornisca, oltre al comando di selezione canale, anche il comando di selezione guadagno. E' da tenere presente che in questo caso vanno particolarmente curati i collegamenti fra le uscite dei sensori a basso livello con il multiplexer, onde evitare possibili interferenze.

In alcuni casi, il multiplexer può essere multipolare, cioè realizzato per connettere canali d'ingresso e d'uscita composti da più conduttori.

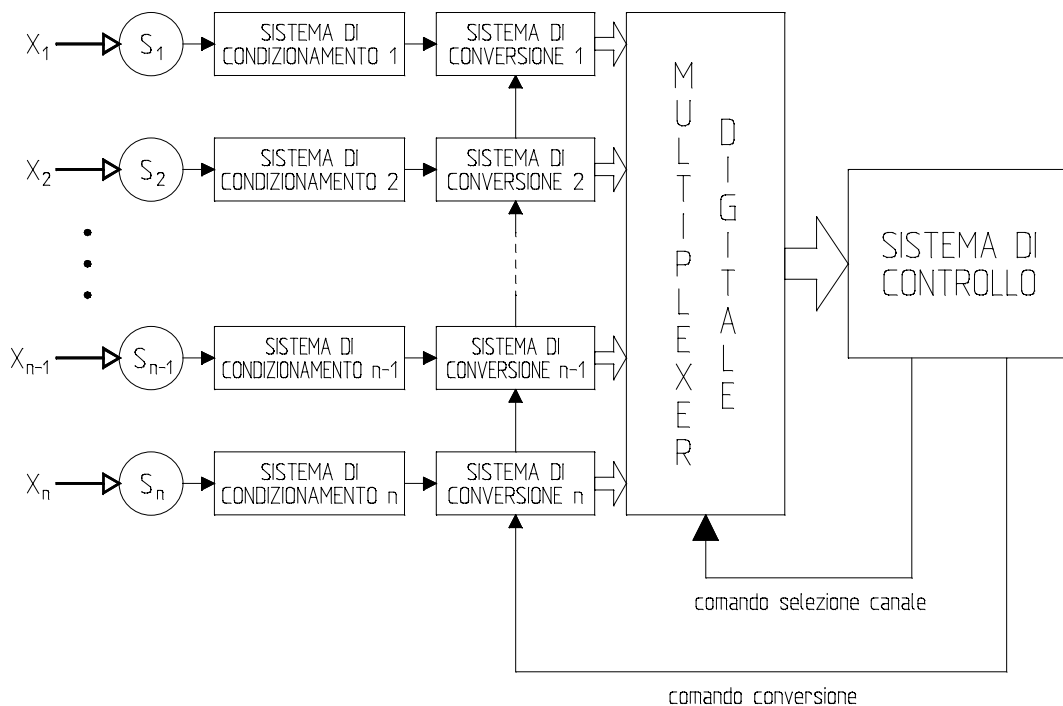


Fig. 4. Architettura di un sistema automatico di misura con multiplexer digitale.

Vi sono casi in cui, per ragioni di complessità circuitale o per migliorare l'immunità dai disturbi o la velocità di misura, la conversione dell'informazione da analogica a numerica avviene direttamente a valle del sensore. In tal caso, vengono duplicati anche i sistemi di conversione e la trasmissione dei segnali fino al sistema di controllo avviene sotto forma digitale. Oltre all'impiego, già richiamato, di più interfacce digitali fra i segnali così ottenuti ed il sistema di controllo, è possibile utilizzare, nel caso di trasmissione di tipo parallelo, una versione "digitale" del multiplexer, costituito, in effetti, da un multiplexer multipolare. In Fig. 4 è riportato lo schema di principio di tale soluzione. Da notare come, dal punto di vista generale, tale soluzione comporta l'ulteriore problema di dover disporre dei necessari collegamenti fra il sistema di controllo ed i singoli sistemi di conversione, onde poter controllare le fasi della conversione analogico/numerica.

In tutte le soluzioni illustrate in precedenza, il sistema di conversione adotta tecniche di conversione analogico/numerica che presuppongono un campionamento (discretizzazione nel tempo, vedi anche Appendice) del segnale proveniente dal sensore ed una sua successiva quantizzazione (discretizzazione nelle ampiezze) in livelli corrispondenti alla codifica numerica adottata.

Una soluzione alternativa, che utilizza un diverso principio di conversione A/N, è quella basata sulla trasformazione tensione/frequenza. In tale soluzione, l'informazione d'interesse non è legata all'ampiezza (tensione o corrente) del segnale in uscita dal sensore, ma alla frequenza di un apposito segnale. Esso è generato mediante opportuni oscillatori e la sua frequenza è legata al valore istantaneo della variabile elettrica (tensione o corrente) fornita dal sensore o al valore istantaneo del parametro elettrico (resistenza, induttanza, capacità) sensibile alla grandezza fisica da misurare.

Nel primo caso, l'elemento che realizza la conversione grandezza elettrica/frequenza è indicato con la sigla VCO (voltage controlled oscillator, oscillatore controllato in tensione). Si tratta, in pratica, di un circuito il quale, assorbendo energia da sistemi ausiliari (batterie od alimentatori), genera un'oscillazione persistente la cui frequenza dipende, con legge idealmente di tipo lineare, dal valore della tensione e/o della corrente impressa al suo ingresso. In tal modo, l'informazione analogica (tensione o corrente in uscita dal sensore) viene convertita in un'informazione ancora di natura analogica (frequenza dell'onda generata dai VCO).

Nel secondo caso rientrano tutte le situazioni in cui la grandezza fisica fa variare il valore di un elemento resistivo (ad esempio, termoresistenze, termistori o trasduttori piezometrici) o induttivo (ad esempio, misuratori di spostamento ad induttanza variabile) o capacitivo (ad esempio, misuratori di spostamento a capacità variabile). In questo caso è possibile introdurre direttamente l'elemento sensibile nel circuito che determina la frequenza dell'oscillatore (circuito risonante LC nel caso sinusoidale o circuito temporizzatore RC nel caso di oscillatori a rilassamento) realizzando quindi la conversione del valore della grandezza fisica da rilevare nella frequenza del segnale così ottenuto.

I sistemi di misura di tale tipo consentono di superare soprattutto le difficoltà legate all'influenza dei disturbi. Il segnale in uscita dall'oscillatore, infatti, è generalmente prodotto con un'ampiezza relativamente elevata (tipicamente dell'ordine dei Volt) ed inoltre il minimo valore della frequenza

dell'oscillatore può essere scelto di molto superiore alle frequenze caratteristiche dei disturbi che possono essere raccolti lungo i cavi di collegamento, in modo da rendere molto efficace l'eliminazione dei disturbi stessi mediante operazioni di filtraggio.

Il principio di funzionamento del sistema di conversione per tali sistemi di misura consiste nel contare il numero di cicli del segnale in uscita dall'oscillatore all'interno di un intervallo di tempo campione  $T$  noto con precisione e fornito da un temporizzatore sufficientemente stabile. In Fig. 5 è mostrato lo schema di un sistema di misura che adotta tale principio di funzionamento. In esso, il multiplexer opera in modo simile ai multiplexer analogici visti in precedenza, con la differenza che ogni canale viene collegato al sistema di conversione per un tempo pari all'intervallo campione  $T$ .

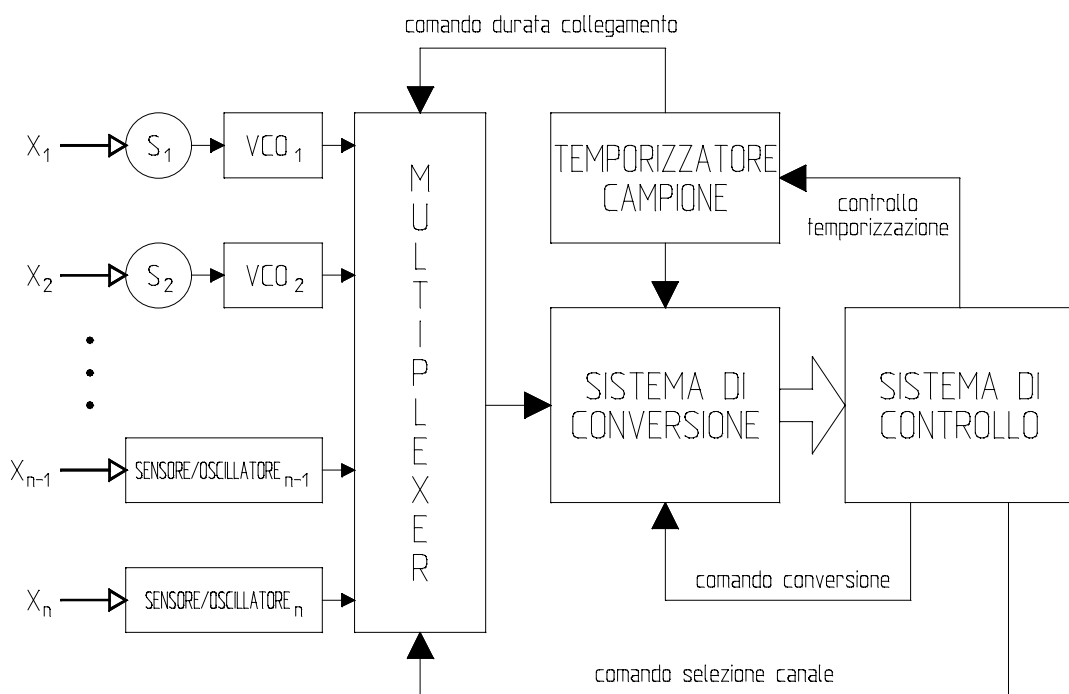


Fig. 5. Architettura di un sistema automatico di misura basato sulla conversione tensione/frequenza.

- **SISTEMI AUTOMATICI DI MISURA BASATI SU INTERCONNESSIONE TRA STRUMENTI**

Un notevole numero di sistemi automatici di misura si basa sul collegamento di uno o più strumenti diversi all'unità di controllo.

La tecnica di collegamento più comune fa uso di un bus, cioè di un insieme di conduttori elettrici che consentono il trasferimento delle informazioni tra i diversi dispositivi. Per potersi connettere al bus è necessario che ogni dispositivo sia dotato di una opportuna **interfaccia**.

Esistono diverse topologie di collegamento tra strumenti; i requisiti di cui bisogna tenere conto per la scelta della topologia più idonea per un bus di collegamento sono: il tipo di informazione da trasferire, la velocità della trasmissione richiesta ed il numero di periferiche da collegare tramite il bus.

Le topologie fondamentali sono tre: a stella (star bus), circolare (daisy-chain bus) e parallelo (party-line bus).

Nel collegamento star ogni periferica è collegata direttamente al controllore, come mostrato in Fig. 6.

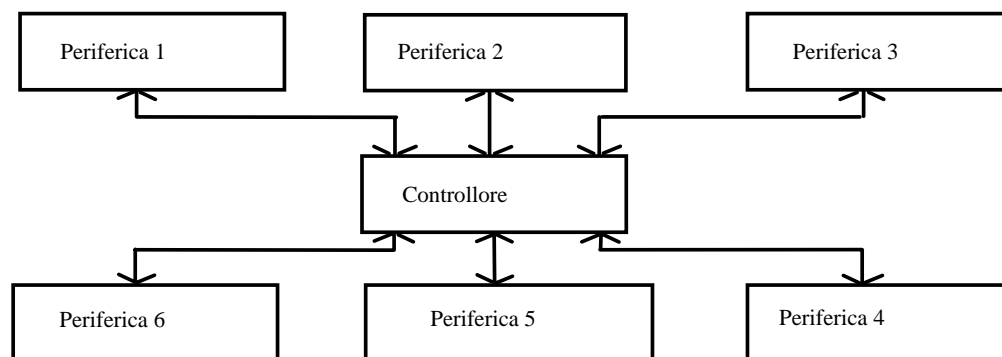


Fig. 6. Bus con topologia star.

In genere il flusso delle linee di connessione è unidirezionale e questo contribuisce ad aumentare la velocità di trasmissione. Adottando questa configurazione si ottiene una certa insensibilità ai guasti di una periferica in quanto il mancato funzionamento di una di esse non altera il normale

funzionamento delle altre né quello del controllore. Di contro il costo aumenta perché sono necessari due circuiti di interfaccia per ogni linea di collegamento (uno per la periferica ed uno per il controllore); inoltre generalmente esiste un limite al numero di interfacce collegabili al controllore e conseguentemente risulta limitato il numero di periferiche collegabili al bus. Questa struttura trova applicazione soprattutto nei sistemi in cui è richiesta un'alta velocità di trasmissione.

## INTERFACCIA

Il concetto di interfaccia è strettamente legato a quello di comunicazione tra sistemi.

Si può definire l'interfacciamento come il collegamento che si realizza tra due sistemi mediante l'uso di dispositivi, circuiti o architetture dedicate, per garantire una corretta comunicazione. Ai dispositivi fisici che realizzano questa funzione viene dato il nome di interfacce. Interfacciare dispositivi o sistemi significa realizzare collegamenti tali da garantire la compatibilità delle caratteristiche elettriche, logiche, meccaniche e funzionali di ognuno degli elementi collegati.

Compatibilità in termini elettrici significa che tensioni, correnti in uscita ad un dispositivo abbiano caratteristiche ammissibili per l'altro che le vede come ingressi.

Compatibilità logiche significa che le informazioni siano riconosciute come valide da tutti i dispositivi collegati tra loro.

Compatibilità meccaniche significa che la circuiteria ed in particolare i connettori siano dello stesso tipo o di tipi equivalenti.

Compatibilità funzionali significa che tutti i dispositivi connessi al bus condividono le medesime modalità operative.

In generale l'interfacciamento può avvenire tra dispositivi, schede, macchine o sistemi multischeda.

Nella topologia daisy-chain, ogni periferica è collegata in cascata alla precedente ed alla successiva attraverso una linea di connessione unidirezionale, come mostrato in Fig. 7; il principale vantaggio di questa configurazione è l'elevato numero di periferiche collegabili ed il basso costo. Il sistema però è particolarmente sensibile al cattivo funzionamento di un singolo elemento della struttura (un guasto su una periferica provoca il fuori servizio di tutte quelle a valle di essa) ed inoltre è molto lento in quanto ogni periferica aggiunge un ritardo nella propagazione del messaggio lungo il bus.

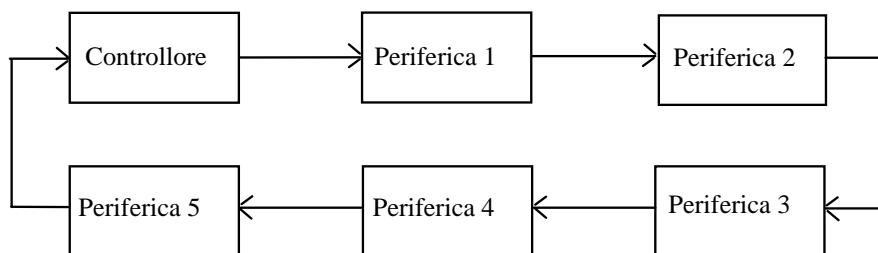


Fig. 7. Bus con topologia daisy-chain.

La topologia più diffusa è quella party-line, in cui tutte le periferiche si trovano collegate in parallelo su di un unico bus costituito da linee di tipo bidirezionale, come schematizzato in Fig. 8. Essa conferisce al sistema una buona velocità, ma la circuiteria di interfaccia delle periferiche è alquanto complessa. Il numero massimo delle periferiche collegabili è limitato poiché ogni nuova periferica rappresenta un ulteriore carico elettrico. Questo tipo di bus viene utilizzato principalmente per comunicazioni veloci di brevi messaggi e presenta un modesto sviluppo geometrico. Un ulteriore problema è rappresentato dall'accesso al bus, condiviso dalle varie unità, che dovrà essere opportunamente controllato in modo da evitare collisioni (accesso contemporaneo di due periferiche).

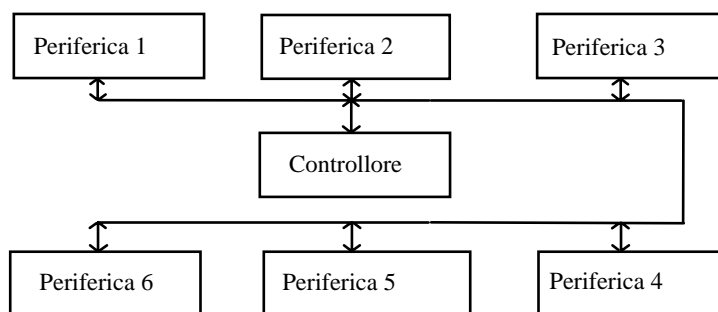


Fig. 8. Bus con topologia party-line.

### 3 Principali standards di interfacciamento

Molti sono gli standards di interfacciamento adottati dai costruttori al fine di garantire la compatibilità degli strumenti di misura. Limitando l'analisi a quelli che hanno trovato maggiore diffusione, e volendo fornire una classificazione secondo gruppi omogenei, si può fare riferimento al livello di collegamento, allo sviluppo geometrico del loro bus o al tipo di comunicazione.

Per ciò che riguarda la prima caratteristica possiamo distinguere tre livelli diversi: al livello inferiore abbiamo quegli standards che realizzano un collegamento unidirezionale fra una unità centrale, di controllo, ed una singola periferica (controller to terminal); al livello intermedio si pongono quegli standard il cui bus collega schede elettroniche inserite in un medesimo involucro contenitore (intra-board, intra-cabinet); al livello superiore si realizza il collegamento fra strumenti diversi installati in un limitato spazio fisico (livello intra-instrument).

Per quanto riguarda lo sviluppo geometrico del bus possiamo distinguere tra sistemi con sviluppo massimo limitato a qualche metro, a poche decine di metri e sistemi con sviluppo superiore al centinaio di metri.

Per il tipo di comunicazione gli standard si dividono a seconda della tipologia di funzionamento e della topologia di collegamento.

La tipologia di funzionamento fa riferimento alla modalità di trasmissione seriale o parallela, con funzionamento sincrono o asincrono. Un bus asincrono si adatta meglio alla differenza di velocità dei dispositivi di utente. Infatti se la temporizzazione non è vincolata ad una frequenza rigida, c'è il duplice vantaggio di sfruttare al massimo la velocità di trasferimento del bus e di consentire ai dispositivi più lenti di non doversi sincronizzare su una frequenza troppo elevata introducendo cicli di attesa. I bus sincroni presentano una maggiore immunità al rumore.

Per quanto riguarda la topologia di collegamento vengono prese in considerazione le strutture delle linee dedicate al trasferimento dei dati ed alla selezione della periferica: queste due funzioni possono essere realizzate facendo uso di due linee distinte, oppure utilizzando il funzionamento multiplexato del bus. In un bus di tipo non multiplexato i dati e gli indirizzi sono presenti su linee differenti e, di conseguenza, c'è un numero maggiore di linee rispetto ai bus che utilizzano le stesse linee per dati e indirizzi (disponibili in tempi differenti).

Risulta evidente che un bus non multiplexato paga in dimensioni fisiche maggiori quello che guadagna come tempo di ciclo ma risulta tuttavia semplificata tutta la circuiteria necessaria per l'interfacciamento.

Tabella 1 riporta le caratteristiche dei principali bus standard attualmente adottati nella realizzazione di sistemi automatici.

Tab.1. Caratteristiche dei principali bus di comunicazione per i sistemi automatici di misura.

Bus	Livello di collegamento	Tipologia	Linee dati	Linee indirizzi	Velocità di comunic.	Lunghezza massima (m)
IEEE-488	Intra instrument	Parallelo Asincrono multiplexato	8	8	1MB/s	20
MULTIBUS	intra-board intra-cabinet	Parallelo Asincrono multiplexato	8,16, 32	20	20MB/s	10
STD	intra-board intra-cabinet	Parallelo sincrono non multiplexato	8	16	1MB/s	0,4
VME	intra-board intra-cabinet	Parallelo asincrono non multiplexato	16,32	29-37	48MB/s	0,5
VXI	Intra-instrument intra-cabinet	Parallelo asincrono non multiplexato	32	8	20MB/s	0,5
CAMAC	intra-board intra-cabinet	Parallelo asincrono non multiplexato	24	24	3MB/s	0,5
RS 232-C	controller to terminal	Seriale asincrono	--	--	25kB/s	15

Fra i bus che hanno incontrato maggiore diffusione, e che sono maggiormente utilizzati nei sistemi automatici di misura, possiamo citare: il bus IEEE 488, l'RS 232C, il bus VXI.

#### 4 Interfacciamento seriale e parallelo

Una linea trasmissiva è formata da uno o più canali che portano messaggi da una sorgente ad un destinatario. Il messaggio deve essere codificato in modo tale da poter essere trasmesso facilmente sulla linea e tale che possa essere capito da tutti gli strumenti che sono presenti sulla linea stessa.

Tutti i codici di comunicazione dei dati sono basati su sistemi binari che prevedono la presenza di due stati: lo stato zero o OFF (0) e lo stato uno o ON (1). Ciò permette di codificare il messaggio in una sequenza significativa di uni e zeri che può essere trasmessa lungo la linea dati e decodificata dal destinatario. Ai due stati logici sono associati due livelli di tensione sufficientemente distinti da garantire l'immunità ai disturbi. La serie di uni e zeri è significativa perché è definita da un codice che è noto sia all'origine che al destinatario.

Alcuni dei codici più usati sono:

- *ASCII* (American Standard Code for Information Interchange). È un codice standard ad 8 bit di cui solitamente 7 sono destinati all'informazione ed uno per il controllo della parità;
- *BCD* (Binary Coded Decimal). E' un codice a 4 bit per ogni cifra decimale.

La trasmissione dei dati può essere effettuata:

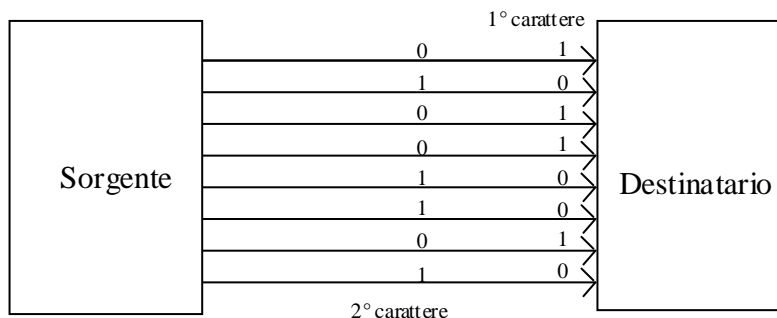


Fig. 9. Trasmissione parallela (esempio ad 8 bit).

- in modo *parallelo* se tutti i bit del carattere codificato sono trasmessi simultaneamente su linee distinte, come in Fig. 9. Il termine trasmissione parallela si riferisce al fatto che i bit del carattere sono trasmessi in parallelo, mentre i caratteri sono trasmessi serialmente. Si usa per trasmissioni a breve distanza, soprattutto a causa del costo di un sistema trasmissivo a canali paralleli.
- in modo *seriale* se i bit del carattere sono trasmessi uno dopo l'altro lungo la linea (Fig. 10).

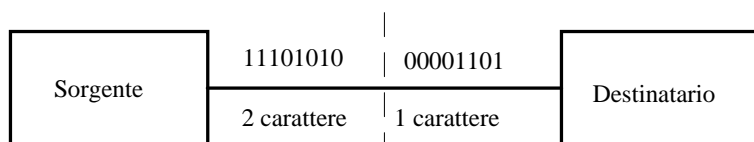


Fig. 10. Trasmissione seriale.

Il destinatario impacchetta in caratteri il flusso dei bit in arrivo. La trasmissione seriale richiede il sincronismo dei bit e quello dei caratteri.

- **PROBLEMI LEGATI AL SINCRONISMO DEI BIT E DEI CARATTERI**

Il destinatario deve essere in grado di interpretare correttamente i bit ricevuti e quindi deve sapere quando campionare la linea per prelevare il bit. Se il campionamento avvenisse durante la transizione di livello il risultato sarebbe indeterminato. Il punto di campionamento ideale è al centro del bit stesso.

Nel caso di *trasmissione asincrona*, il dispositivo ricevente ha un orologio (clock) che è sincronizzato sull'impulso di partenza (start) all'inizio di ogni carattere. Essendo noto il numero di bit per ogni carattere, non è difficile mantenere il passo con i bit in arrivo per tutta la durata della trasmissione del carattere.

Nel caso di *trasmissione sincrona*, i blocchi di dati possono essere molto lunghi e piccole differenze di velocità tra i due orologi di trasmissione e di ricezione possono dar luogo ad errori.

In ricezione è necessario avere un segnale di sincronismo (clock) atto a distinguere un bit dal successivo, come in Fig. 11.

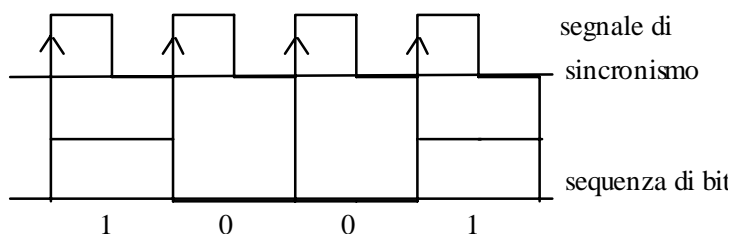


Fig. 11. Sincronismo dei bit.

Oltre al sincronismo dei bit, bisogna effettuare il sincronismo dei caratteri, cioè riconoscere il gruppo di bit che individua il carattere nella sequenza di quelli ricevuti. Due sono i metodi più usati per determinare quale sia il primo bit del carattere.

- Se la trasmissione è *sincrona*, la durata di ogni bit è la stessa e tutti i caratteri sono contigui. Il destinatario deve individuare solo il primo bit del primo carattere e quindi, conoscendo la dimensione del carattere e la velocità di trasmissione, può contare i gruppi di bit ed impacchettare correttamente i caratteri in arrivo. Per identificare il primo bit si fa precedere ogni blocco di dati da una sequenza tipica di sincronizzazione ricorrendo ad un carattere speciale di controllo della trasmissione.
- Se la trasmissione è *asincrona*, non c'è nessuna relazione temporale tra un carattere ed il successivo, anche se possono essere al limite in sequenza come nella trasmissione sincrona. Il destinatario deve ristabilire la sincronizzazione per ogni carattere e quindi essere in grado di riconoscerne il primo bit. Per far ciò si fa precedere ogni carattere da un impulso di inizio (*bit di start*) che informa il destinatario dell'inizio della trasmissione. Infatti la linea è nello stato di idle (1) quando non c'è trasmissione e si invia uno 0 come bit di start. Il destinatario riconosce la transizione 1-0, aspetta per la durata di mezzo bit e poi ad intervalli di un bit campiona la linea e ricostruisce il carattere in arrivo. Alla fine del carattere viene trasmesso un *bit di stop* (1) per permettere al destinatario di stabilizzarsi prima che venga trasmesso un altro carattere.

#### • *IL CONTROLLO E LA CORREZIONE DEGLI ERRORI*

Il controllo e la correzione degli errori sono funzioni indispensabili, per la presenza del rumore in ogni canale di comunicazione che può alterare i dati trasmessi. Le tecniche di controllo più diffuse sono:

- *controllo di ridondanza orizzontale* (parità). Si usa principalmente nella trasmissione di caratteri singoli. Consiste nell'aggiungere agli  $n$  bit di ogni carattere un ulteriore bit (P) detto di parità, in modo da portare il numero di bit di valore 1 ad un valore dispari (parità dispari) o pari (parità pari). Se ad es. il numero dei bit ad 1 è 4, il bit di parità sarà 1 se la parità è dispari e 0 altrimenti.

Questa tecnica non consente di riconoscere se ci sono nello stesso carattere due bit errati (o meglio un numero pari di bit errati).

*controllo di ridondanza verticale.* Si usa principalmente nella trasmissione di pacchetti di caratteri. È realizzato calcolando, in una sequenza di caratteri, l'OR esclusivo su tutti i bit che stanno nella stessa posizione all'interno di ciascun carattere (BCC). In tal caso il campo di ridondanza è costituito da un carattere inviato alla fine della sequenza cui si riferisce. Questa tecnica ha le stesse limitazioni della precedente, nel senso che non è capace di rilevare due errori sulla stessa riga. Spesso viene usata congiuntamente con quest'ultima, consentendo un maggiore margine di rilevamento (Fig. 12).

P	B7	B6	B4	B3	B2	B1	B0	Carattere
1	1	1	0	1	1	0	0	1
0	0	1	0	0	1	1	0	2
1	1	1	0	1	0	0	1	3
0	1	0	1	1	0	1	1	4
1	1	1	1	0	0	1	0	5
0	0	1	0	0	1	1	0	6
0	1	1	0	1	1	0	1	7
1	0	0	1	0	0	1	0	8
1	1	0	0	1	1	0	1	9
1	0	1	1	1	0	0	1	10
1	1	0	1	0	0	1	1	11
1	1	1	0	0	1	0	1	12
1	1	0	1	1	1	0	0	13
0	0	1	0	0	1	1	0	14
1	1	0	0	1	1	0	1	15
0	0	0	1	1	1	0	0	BCC

Fig. 12. Controllo di parità orizzontale e verticale.

- *controllo ciclico di ridondanza (CRC)*. Permette la rilevazione di errori multipli. Si considera il flusso di dati come una stringa di bit del tipo:

$$D(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$$

in cui il coefficiente dell'i-esima potenza di x rappresenta la i-esima cifra binaria della stringa a partire da a<sub>0</sub>.

Tale polinomio viene diviso algebricamente per un polinomio generatore G(x):

$$D(x) = Q(x) * G(x) + R(x)$$

dove Q(x) ed R(x) sono i polinomi quoziente e resto. Il CRC è costituito dal resto R(x). Se il polinomio G(x) è del sedicesimo grado, R(x) è al più del quindicesimo, cosicché il campo di ridondanza è costituito da 2 bytes (Fig. 13), che vengono trasmessi in coda al pacchetto dati.

Il destinatario calcola il CRC sui dati con la stessa tecnica e lo confronta con quello ricevuto. Questa tecnica consente di individuare errori di trasmissione, su uno o più bit, e di richiedere la ritrasmissione del pacchetto.

La scelta di G(x) è molto importante, perché occorre che tutti i polinomi che danno lo stesso resto, differiscano tra loro per un numero abbastanza elevato di coefficienti, in modo da assicurare una certa affidabilità al metodo.

Questo metodo consente di risparmiare sul numero di bit di ridondanza trasmessi.



Fig. 13. Blocco di dati con caratteri di controllo.

## 5 Standard seriali

- *STANDARD EIA RS 232*

Lo standard RS 232, emesso dalla Electric Industry Association (EIA) e dalla Telecommunications Industry Association (TIA), è nato nel 1969 come standard per la trasmissione dei dati tra due sistemi di trasmissione connessi mediante una linea telefonica attraverso due modem. La versione più recente EIA/TIA RS 232-E è del 1991. Esso è identico agli standards CCITT Rec.V24, V.28 e ISO IS2110.

Successivamente è stato adottato anche per il collegamento tra computer e periferiche (ad es. un terminale), come riportato in Fig. 14.

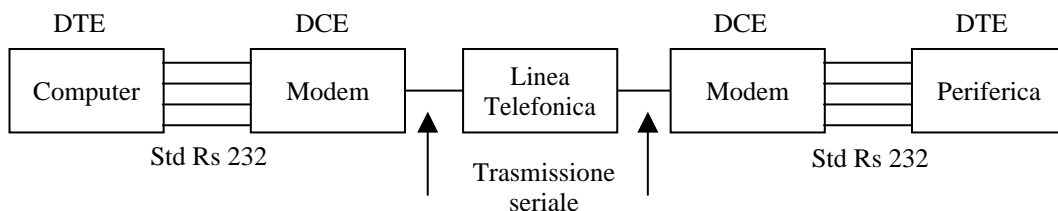


Fig. 14. Connessione computer-periferica.

Questo sistema costituisce un esempio di bus di comunicazione a livello *controller to terminal* e permette di collegare due strumenti attuando una trasmissione di tipo seriale. Le linee di comunicazione sono di tipo unidirezionale, pertanto se è richiesta la comunicazione nelle due direzioni, è necessario utilizzare 2 linee.

Tab. 2. Principali caratteristiche dello standard RS232.

Tipo di trasmissione	Non bilanciata
Tipo di Logica	Negata
Massima velocità di Trasmissione	19200 bps
Tensione di uscita	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5 15V valore logico 0</li> <li>• -5 -15V valore logico 1</li> </ul>
Livello di ricezione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt;3V valore logico 0</li> <li>• &lt;-3V valore logico 1</li> </ul>
Pendenza massima del segnale	30 V/ $\mu$ S max
Capacità di carico	2500 pF max equivalenti a circa 20m
Tipo di comunicazione	Full duplex
Massimo numero di driver	1
Massimo numero di ricevitori	1

Le sorgenti di traffico sono comunemente chiamate DTE (Data Terminal Equipment). I DTE possono essere terminali più o meno intelligenti o unità di calcolo, solitamente dei Personal Computer. L'elemento di interfaccia tra il DTE ed il sistema di comunicazione è normalmente chiamato DCE (Data Communication Equipment), solitamente un modem. Esso stabilisce, mantiene e disattiva una connessione e provvede a tutte quelle funzioni necessarie per la conversione dei codici e dei segnali tra il DTE ed il sistema di comunicazione (modem).

Il connettore d'interfaccia è a 25 pin (Fig. 15 e Tab. 3) (in casi più semplici a 9 pin, Fig. 16 e Tab. 4), del tipo femmina per il DCE e del tipo maschio per il DTE. La lunghezza massima del cavo DTE-DCE è di 15-20 m (che rappresenta un carico capacitivo di  $C_{carico} < 2500$  pF).

Le velocità di trasmissione previste sono: 50, 75, 110, 150, 350, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200 bit/s.

Le tensioni nominali dei segnali sono di -15V e di +15V, o, in taluni casi, di -5V e +5V.

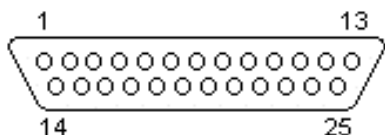


Fig. 15. Rappresentazione connettore seriale RS232 DB25.

Tab. 3. Elenco dei Pin connettore DB25.

Pin	Nome simbolico	Descrizione	Pin	Nome simbolico	Descrizione
1	<b>PG</b>	Protective Ground	15	<b>TSET DCE-DTE</b>	Transmission Signal Element Timing (Transmitter clock) (from DCE)
2	<b>TX</b>	Transmit data (to DCE)	16	<b>RX secondario</b>	(from DCE)
3	<b>RX</b>	Receive Data (from DCE)	17	<b>RSET</b>	Receiver Signal Element Timing (Receiver clock) (from DCE)
4	<b>RTS</b>	Request to Send (to DCE)	18		
5	<b>CTS</b>	Clear to Send (from DCE)	19	<b>RTS secondario</b>	
6	<b>DSR</b>	Data Set Ready (DCE ready)	20	<b>DTR</b>	Data Terminal Ready (to DCE)
7	<b>SG</b>	Signal Ground	21	<b>SQD</b>	Signal Quality Detector
8	<b>DCD</b>	Data Carrier Detect (from DCE)	22	<b>RI</b>	Ring Indicator (from DCE)
9-11	<b>Non usati</b>		23	<b>DSRS</b>	Data Signal Rate Selector
12	<b>DSR secondario</b>	Data Set Ready (DCE ready)	24	<b>TSET DTE-DCE</b>	Transmit Signal Element Timing (To DCE)
13	<b>CTS secondario</b>		25	<b>TEST</b>	Test mode (from DCE)
14	<b>TX secondario</b>				

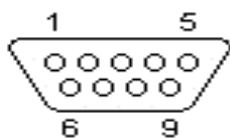


Fig. 16. Rappresentazione connettore seriale RS232 DB9.

Tab. 4. Elenco dei Pin connettore DB9.

Pin	Nome simbolico	Descrizione
1	<b>DCD</b>	Data Carrier Detect (from DCE)
2	<b>RX</b>	Receive Data (from DCE)
3	<b>TX</b>	Transmit data (to DCE)
4	<b>DTR</b>	Data Terminal Ready
5	<b>GND</b>	Signal Ground
6	<b>DSR</b>	Data Set Ready
7	<b>RTS</b>	Request To Send
8	<b>CTS</b>	Clear To Send
9	<b>RI</b>	Ring Indicator

Lo standard prevede 21 linee di segnali; lo scambio dei dati è gestito dalle linee:

- RTS (Request to Send) e CTS (Clear To Send) usate in trasmissioni half-duplex dove la trasmissione avviene in una direzione per volta: quando il computer è pronto a trasmettere lo comunica al modem con RTS, che con CTS segnala la propria disponibilità a ricevere. In trasmissioni full-duplex RTS e CTS sono disattivate e la trasmissione avviene contemporaneamente nelle due direzioni;
- DSR (Data Set Ready) indica che il modem è operativo;
- DTR (Data Terminal Ready) indica che l'altro dispositivo (computer o periferica) è operativo;
- Carrier Detect e Ring Indicator si riferiscono a specifiche funzioni della rete telefonica.

Le periferiche possono essere connesse direttamente, senza l'interposizione di modem, adottando sempre lo standard RS 232-C, come esemplificato in Fig. 17 (solitamente per tale tipo di comunicazione è utilizzato il connettore DB9).

Da notare che non sempre è richiesta la connessione di tutti i segnali previsti dallo standard: i segnali che sicuramente devono essere utilizzati sono il Transmit Data (collegato con il Receive Data dell'altro dispositivo), il Receive Data ed il Signal Ground. Spesso si utilizzano il CTS ed il RTS e più raramente il DTR ed il DSR. Carrier Detect può essere collegato al RTS.

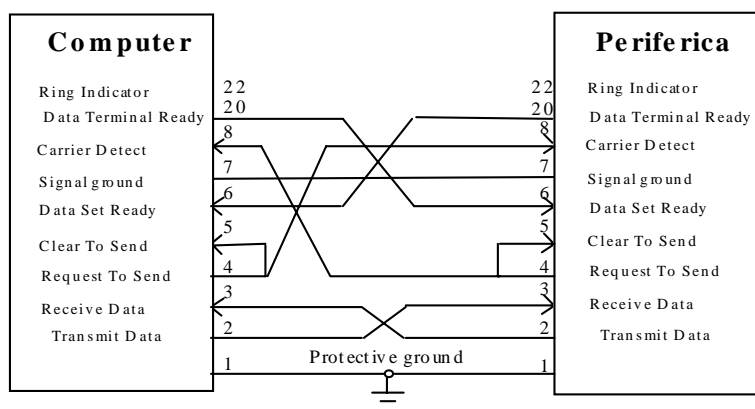


Fig. 17. Connessione diretta computer-periferica.

Questo standard prevede una trasmissione dei dati di tipo *single-ended* (o sbilanciato), cioè i dati sono trasmessi su un singolo conduttore, riferito a massa. I vantaggi offerti da questo tipo di trasmissione sono: semplicità delle connessioni e basso costo. Gli svantaggi sono invece: bassa immunità al rumore e lunghezze di trasmissione limitate rispetto alle trasmissioni di tipo *differenziale* (o bilanciato). Infatti poiché il conduttore di ritorno (massa) costituisce parte del sistema, possono essere indotti degli impulsi di tensione o delle variazioni del potenziale di massa da circuiti esterni, generando disturbi in trasmissione. Accoppiamenti capacitivi (o induttivi) con altre linee possono generare altri disturbi noti come cross-talk.

La trasmissione sbilanciata è ideale per comunicazioni su brevi distanze in assenza da disturbi esterni. Su lunghe distanze o in caso di utilizzo in ambiente rumoroso è necessario usare cavi schermati.

- *STANDARD EIA-RS422-A ED RS423*

Questi due standards rappresentano una estensione dello standard RS-232 e sono stati emessi nell'intento di sostituirlo gradualmente. Essi consentono una maggiore velocità di trasmissione (anche  $>2$  Mb/s) ed una maggiore distanza di comunicazione nel caso di trasmissione con tensioni bilanciate (RS-422) o sbilanciate (RS-423). Le caratteristiche meccaniche e funzionali relative a questi due standard sono riportate nello standard RS-449. Sono previsti due diversi tipi di connettore a 37 ed a 9 pin.

In Fig. 18 è rappresentato uno schema del connettore Rs422 a 37 poli mentre in Tab. 5 è spiegata la funzione di ogni Pin.

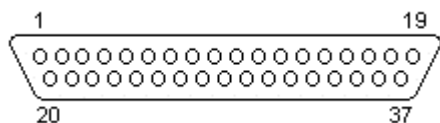


Fig. 18. Rappresentazione connettore seriale RS422 DB37.

Tab. 5. Elenco dei Pin connettore RS422 DB37.

Pin	Name	Description	Pin	Name	Description
1	GND	Protective Ground	20	RC	Receive Twister-Pair Common
2	SRI	Signal Rate Indicator	21	GND	Spare Twister-Pair Return
3	n/c	Spare	22	/SD	Transmit Data TPR
4	SD	Transmit Data	23	GND	Transmit Timing TPR
5	ST	Transmit Timing	24	GND	Receive Timing TPR
6	RD	Receive Data	25	/RS	Request To Send TPR
7	RTS	Request To Send	26	/RT	Receive Timing TPR
8	RR	Receiver Ready	27	/CS	Clear To Send TPR
9	CTS	Clear To Send	28	IS	Terminal In Service
10	LL	Local Loopback	29	/DM	Data Mode TPR
11	DM	Data Modem	30	/TR	Terminal Ready TPR
12	TR	Terminal Ready	31	/RR	Receiver TPR
13	RR	Receiver Ready	32	SS	Select Standby
14	RL	Remote Loopback	33	SQ	Signal Quality
15	IC	Incoming Call	34	NS	New Signal
16	SF/SR	Select Frequency/Select Rate	35	/TT	Terminal Timing TPR
17	TT	Terminal Timing	36	SB	Standby Indicator
18	TM	Test Mode	37	SC	Transmitt Twister Pair Common
19	GND	Signal Ground			

In questo caso la trasmissione avviene in *modo bilanciato*. In questo caso cioè sono previsti due conduttori per il trasferimento del segnale tra il trasmettitore ed il ricevitore. Ciò consente di trasferire dati su lunghe distanze a velocità elevata, con elevata immunità alle interferenze. Infatti le tensioni indotte nel canale di trasmissione dal rumore dovuto al circuito di ritorno (ground) o dai transistori di commutazione appaiono al ricevitore come segnali di modo comune.

Poiché quest'ultimo ha uno stadio d'ingresso del tipo differenziale, questi disturbi non producono effetti significativi (viene amplificata solo la differenza tra il potenziale dei due ingressi). Gli svantaggi sono essenzialmente il costo maggiore e la necessità di utilizzare doppi "twisted".

Tab. 6. Principali caratteristiche dello standard RS485.

Tipo di trasmissione	Bilanciata
Tipo di Logica	negata
Tensione di uscita differenziale	$\leq 6V$
Massima velocità di Trasmissione	10 Mbps
Lunghezza massima	1200m
Tipo di comunicazione	Half duplex o full duplex
Massimo numero di drivers	1
Massimo numero di ricevitori (unità di carico)	32 (per problemi di impedenza di carico)

Lo standard EIA RS-422-A (1978) prevede la trasmissione in una sola direzione (modo simplex) fino a 1200m, con capacità trasmissiva massima di 10 Mb/s (su lunghezze inferiori). Il canale trasmissivo può avere fino a 10 ricevitori.

- **STANDARD EIA-RS485**

Questa interfaccia introdotta nel 1983 costituisce un potenziamento della RS422, di cui conserva le caratteristiche essenziali, per il collegamento di più terminali su di un unico bus.

Esso prevede la comunicazione in modo half-duplex su un numero esteso di periferiche (multi-point). Il numero massimo di periferiche (unità di carico) previsto è 32.

La versatilità e l'elevato numero di periferiche previste da questo standard ne fanno una base per altri standard trasmissivi. Infatti RS-485 rappresenta le specifiche a livello fisico del modello OSI di altri standard a cui si farà qualche cenno nel seguito, quali lo SCSI o il Profibus ed in generale le reti locali.

In generale lo standard specifica solo le caratteristiche meccaniche ed elettriche dei dispositivi RS485, ma non dice nulla riguardo al protocollo da utilizzare per la comunicazione.

I costruttori di dispositivi 485 hanno negli anni implementato diversi protocolli, utilizzando diverse tecniche di codifica del dato. In Tab. 6 sono riportate le principali caratteristiche dello standard 485.

Tab. 7. Caratteristiche dei principali standards seriali EIA.

EIA	RS-232	RS-423-A	RS-422-A	RS-485
Modo operativo	single-ended	single-ended	differenziale	differenziale
Numero di trasmettitori (Tx) e ricevitori (Rx)	1 Tx 1 Rx	1 Tx 10 Rx	1 Tx 10 Rx	32 Tx 32 Rx
Lungh. max cavo [m]	15	1200	1200	1200
Capacità trasm.[bps]	20 k	100 k	10 M	10 M
Max tensione di modo comune [V]	±25	±6	6÷-0,25	12÷-7
Livello d'uscita [V]	±5	±3,6	±2	±1.5
	±15	±6	±5	±5
Carico in uscita [Ω]	3k÷7k	450 (min)	100 (min)	60 (min)
Resistenza d'ingresso di Rx [Ω];	3÷7	4	4	12
Sensibilità di Rx	± 3 V	± 200 mV	± 200 mV	± 200 mV

In Tabella 7 è rappresentato un riepilogo comparativo delle caratteristiche degli standard seriali presentati.

## 6 Standard paralleli

- *IEEE 488*

Questo standard permette il collegamento di periferiche costituite da singoli strumenti (livello intra-instrument). Le periferiche sono connesse attraverso una struttura party-line, nella quale i dati ed i comandi vengono trasmessi utilizzando le stesse linee, operando una opportuna decodifica di essi in base allo stato di alcune linee di controllo del bus e del valore del dato trasmesso. La Hewlett Packard è stata la prima ditta ad introdurre nel 1965 questo bus di comunicazione, con il nome di HP-IB, pubblicato nel 1975 dall'Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE) con la sigla IEEE-488. Altri enti hanno adottato lo stesso standard, con piccolissime modifiche, quali l'American National Standards Institute (ANSI) come MC1.1 e l'International Electrotechnical Commission (IEC) come IEC 625-1 (le principali differenze riguardano le forme dei connettori di collegamento al bus e le regole relative alla struttura dei messaggi trasferibili fra le periferiche).

Lo standard descrive le caratteristiche meccaniche, elettriche e funzionali dell'interfaccia, che i costruttori di strumentazione devono seguire al fine di rendere compatibili i loro prodotti con quelli di altri costruttori. Ogni strumento è collegato al bus attraverso un cavo che termina a ciascuna estremità con un connettore a 24 poli (Fig. 19).

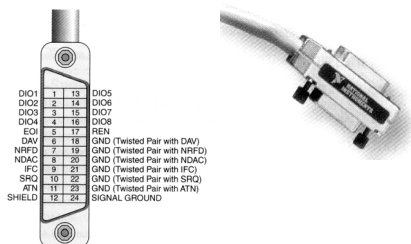


Fig. 19. Connettore IEEE-488.

In Figura 20 è mostrata una interfaccia per IEEE-488 per PC.

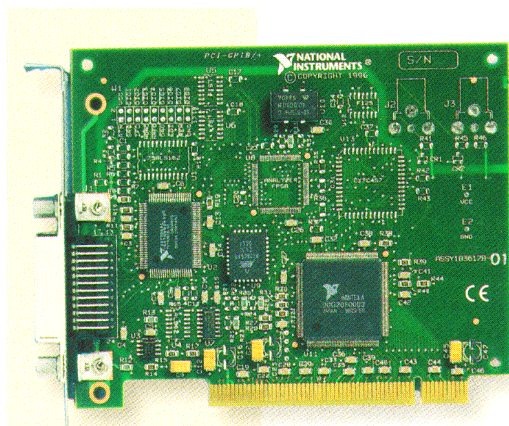


Fig. 20. Interfaccia IEEE-488 per PC.

Ogni dispositivo presente sul bus può eseguire le funzioni di ricevere (listener) o inviare (talker) comandi o dati, oppure di gestione del bus (controller).

- I dispositivi che assumono la funzione *listener* (quando vengono programmati dal controller) accettano dati e comandi dal bus. Dispositivi che funzionano solamente come listener sono display, stampanti, plotter, alimentatori programmabili, in quanto non eseguendo misure non devono inviare dati sul bus.
- I dispositivi che assumono la funzione *talker* (quando programmati dal controller) inviano dati sul bus ai listeners attivi. Sul bus non ci può essere più di un solo talker attivo per volta. Ci sono dispositivi che possono assumere solo la funzione talker e non la listener ed altri che possono assumerle entrambe. Ad esempio un multimetro è listener quando riceve dal bus i comandi di configurazione ed è talker quando invia sul bus il risultato della misura.
- Il *controller* gestisce il bus, invia comandi, riceve dati e bytes di stato (status) e gestisce il flusso dei dati. Anche il controller assume le funzioni di talker (per l'invio di comandi e dati) e di listener (per la ricezione dei dati e degli status). Sul bus ci possono essere più dispositivi che possono assumere la funzione di controller, ma sempre uno per volta.

Per inviare un comando ad un particolare strumento presente sul bus è necessario farlo precedere dall'*indirizzo* (address) dello strumento stesso. Ogni periferica ha un proprio indirizzo selezionato dall'operatore agendo su un selettore posto generalmente nella parte posteriore dello strumento, o programmandolo dalla tastiera frontale. L'indirizzo può assumere i valori 0-31, ma 31 normalmente non è usato in quanto viene utilizzato come comando di unlisten o di untalk, per disabilitare i listeners o i talkers attivi. Alcuni dispositivi con architettura interna complessa hanno due indirizzi: il primo (primary address) identifica lo strumento stesso mentre il secondo (secondary address) identifica il blocco interno. Ad esempio in un plotter il primo indirizzo potrebbe attivare l'interfaccia, mentre il secondo potrebbe attivare il movimento del pennino. Per evitare eventuali conflitti (uno strumento che risponde al comando indirizzato ad un altro) bisogna assolutamente evitare di assegnare lo stesso indirizzo a due diversi strumenti.

Come riportato in Tabella 8, l'indirizzo è costituito da 7 bit di cui i primi 5 bits (0-4) rappresentano l'indirizzo, mentre i bits 5 e 6 indicano che si sta inviando un indirizzo di talk (10) di listen (01), un comando (00) o un indirizzo secondario (11).

Tab. 8. Formato dell'indirizzo.

Bit number	6	5	4	3	2	1	0
Bus command	0	0	C	C	C	C	C
Listen address	0	1	L	L	L	L	L
Talk address	1	0	T	T	T	T	T
Secondary address	1	1	S	S	S	S	S

Lo standard IEEE-488 prevede tre gruppi di linee: il bus dati (8 segnali più 8 masse), le linee di controllo e trasferimento dati (3) e le linee di gestione dell'interfaccia (5).

Il *bus dati* è costituito da 8 linee di segnale che trasmettono l'indirizzo, i comandi, i dati di misura e lo stato. I dati sono trasmessi nel formato bit paralleli, bytes seriali (8 bit sono trasmessi parallelamente, mentre i bytes sono inviati serialmente).

In Figura 21 sono riportate le linee utilizzate per la trasmissione dei dati (e degli indirizzi) e per l'handshake.

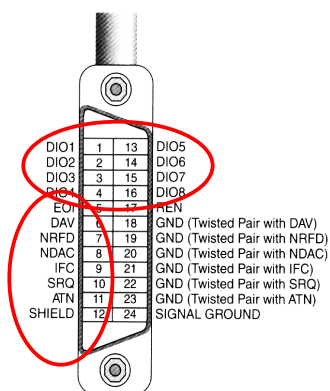


Fig. 21. Linee di indirizzamento ed Handshake.

I dati sono codificati in ASCII anche se altri formati sono ammessi quando è necessario comprimere i dati per aumentare la velocità di trasmissione (ad esempio formato BCD o binario).

Le linee di controllo del trasferimento dei bytes (di handshake) controllano il trasferimento dei dati che avviene quando tutti gli strumenti presenti sul bus sono pronti (ready) per il trasferimento. Operano in logica inversa : lo stato logico basso indica "vero" e quello alto "falso".

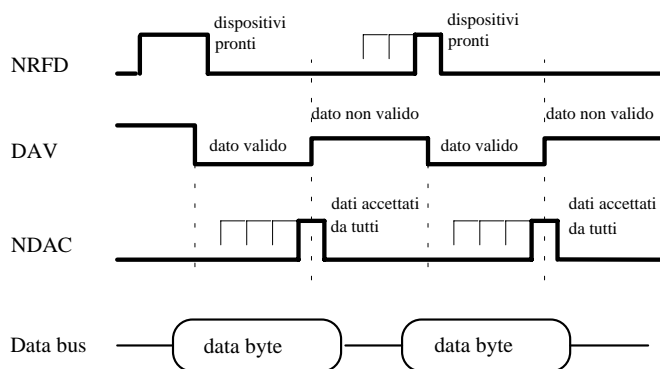


Fig. 22. Temporizzazione della trasmissione dei dati.

In Figura 22 è riportata la temporizzazione durante la trasmissione dei dati. La funzione delle tre linee di handshake durante il trasferimento dei dati è:

- DAV (Data Valid). Segnala la presenza di dati validi sul bus. Questa linea è controllata dal talker attivo. Essa normalmente è a livello logico alto e quando i dati sono validi viene posta a livello basso, segnalando ai listeners che possono eseguire la lettura.
- NRFD (Not Ready For Data). Questa linea, quando è a livello logico alto, indica al talker che tutti i listeners sono pronti a ricevere dati. Lo stato di questa linea è controllato dai listeners attivi. La linea NRFD resta a livello logico basso fin quando tutti i listeners non sono pronti alla ricezione dei dati. Quando un listener diventa pronto alla ricezione pone NRFD alto, ma poiché NRFD non cambia valore logico fin quando anche un solo listener è a livello basso, ne segue che NRFD opera alla velocità del dispositivo più lento presente sul bus.
- NDAC (Not Data Accepted). Indica se un dispositivo ha o non ha accettato un messaggio (1 byte). Questa linea è controllata dai listeners attivi. Dopo che il talker ha posto DAV a livello basso, i listeners attivi leggono i dati dal bus mantenendo NDAC a livello basso durante la lettura. Non appena viene completata la fase di lettura ogni listener pone questa linea a livello alto, ma NDAC resta a livello basso fin quando tutti i listeners hanno completato l'operazione. Quando NDAC assume valore logico alto, il trasferimento è completo ed il controllo del bus ritorna al controller.

Drivers e receivers sono realizzati con tecnologia TTL, ma assegnando stato logico 0 (false) al livello alto e stato logico 1 (true) al livello basso.

Su un bus possono essere collegati fino a 15 dispositivi (14 periferiche ed 1 controllore), collegati a stella e/o in cascata; la lunghezza totale del cavo deve essere <20 m.

In Tabella 9 è riportato il livello elettrico relativo ai livelli logici assunti dai segnali. La tensione di alimentazione deve essere inferiore a 5,25 V, rispetto al ground.

Tab. 9. Livello elettrico dei segnali.

Stato logico	Livello elettrico del segnale
0	$\geq 2,0V$ (Stato High)
1	$\leq 0,8 V$ (Stato low)

- **IEEE488: LINEE DI GESTIONE E COMANDI**

Ognuna delle *linee di gestione dell'interfaccia* è dedicata ad una specifica funzione:

- ATN (ATteNtion) indica la natura del dato trasmesso sul bus:
- ATN low: comando a tutti i dispositivi. È in questo modo che il controller programma il dispositivo indirizzato a divenire listener o talker.
- ATN high: dato per i listeners (programmati quando ATN low) da un talker. Gli altri dispositivi restano in stato di "idle" quando ATN è high.
- IFC (InterFace Clear). Consente di eseguire l'inizializzazione del bus. Pone il bus in stato di idle ed il controller disattiva i listeners ed il talker. Si usa quando c'è un malfunzionamento e si vuole eseguire il reset dell'interfaccia.
- REN (Remote ENable). Consente di porre lo strumento nella modalità di funzionamento remoto. Quando è a livello basso lo strumento si attiva per ricevere comandi dall'interfaccia. Quando è a livello alto invece riceve comandi dal pannello frontale.
- SRQ (Service Request). Funziona come linea di interrupt. Un dispositivo può richiedere attenzione dal controller (ad es. quando ha terminato la misura ed è pronto a trasmettere dati).
- EOI (End Or Identify). Opera insieme ad ATN. Con ATN ed EOI a livello logico basso inizia un parallel poll, cioè una operazione che consente al controller di ottenere informazioni da un dispositivo (un bit che viene letto da una delle linee dati).

Con ATN a livello alto ed EOI a livello basso si segnala l'ultimo byte in un blocco di dati.

Altri comandi non utilizzano linee dedicate, ma vengono inviati utilizzando le linee dati; essi sono: comandi universali e comandi indirizzati.

I *comandi universali* sono indirizzati a tutti i dispositivi configurati per rispondere ad essi. Tre di essi sono trasmessi su una singola linea di gestione dell'interfaccia (comandi monolinea), senza eseguire la fase di handshake, e sono:

- ATN (ATteNtion);
- REN (Remote ENable);
- IFC (InterFace Clear).

Altri cinque comandi sono trasmessi sul bus dati, e sono:

- DCL (Device CLear). Esegue il reset dei dispositivi, anche se non indirizzati dal controller.
- LLO (Local LockOut). Disabilita il controllo in modo locale (manuale) dello strumento, che viene riabilitato ponendo REN a livello alto.
- SPE (Serial Poll Enable). Simile al parallel poll escluso che il controller interroga ogni dispositivo uno per volta. Il dispositivo interrogato risponde con un byte di stato quando indirizzato come talker. Può essere utile per vedere ad esempio chi ha inviato un SRQ.
- SPD (Serial Poll Disable). Disabilita il serial poll.
- PPU (Parallel Poll Unconfigure). Esegue il reset dei dispositivi configurati per eseguire il parallel poll, ripristinando il normale funzionamento del bus.

I comandi indirizzati sono diretti ai soli dispositivi indirizzati come listener.

- GET (Group Execute Trigger). Questo comando sincronizza tutti gli strumenti ad es. ad eseguire la misura simultaneamente.
- GTL (Go To Local). Questo comando abilita uno strumento ad operare in modo locale.
- SDC (Selected Device Clear). Questo comando esegue il reset di un dispositivo.
- TCT (Take ConTrol). Comando mediante il quale il controller attivo passa la gestione del bus ad un altro controller.
- PPC (Parallel Poll Configure). Questo comando configura i listeners indirizzati a rispondere al successivo comando di PPE e PPD. PPE (Parallel Poll Enable) configura i dispositivi a segnalare il loro stato operativo con un singolo bit da inviare su una particolare linea dati, PPD (Parallel Poll Disable) disabilita i dispositivi a rispondere.

I *drivers* sono open collector per le linee SRQ, NRFD, NDAC, DIO 1-8 (per applicazioni di parallel polling); sono open collector o three-state per DAV, IFC, ATN, REN, EOI, DIO 1-8 (per applicazioni che non sono di parallel polling).

## 7 Sistemi di interfaccia basati su backplane bus

Questo tipo di bus si riferisce a sistemi nei quali la trasmissione dei dati avviene in modo parallelo mediante una *motherboard*, cioè mediante una scheda inserita nella parte posteriore del cestello sulla quale sono inseriti sia i cavi (o piste stampate sulla stessa scheda) costituenti il bus che i connettori che ne consentono il collegamento agli strumenti su scheda (Fig. 23).

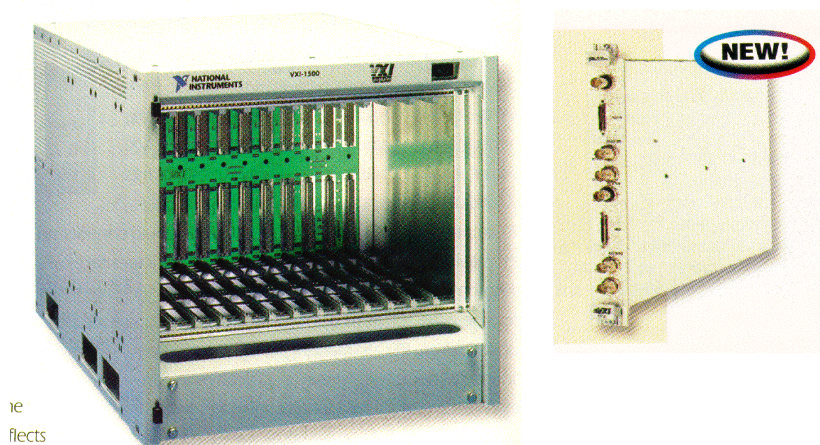


Fig. 23. Immagine di un backplane bus e di uno strumento di tipo VXI.

Esso è sostanzialmente costituito da linee per il trasferimento dati, da linee di indirizzo (per indirizzare la memoria o l'I/O), da linee di controllo (es. read, write, DMA request, ...) e da alcune linee di alimentazione delle schede.

La lunghezza del bus è generalmente inferiore al metro poiché lunghezze superiori comportano un carico capacitivo elevato che limita la frequenza di trasferimento dei dati.

Diversi sono i backplane bus standard quali ad esempio:

- CAMAC (IEEE 583, ....)
- Multibus I (IEEE 796)
- Multibus II (IEEE P1296)
- VME (IEEE P1019)
- VXI (IEEE 1155).

La realizzazione di strumenti su scheda consente il vantaggio di risparmiare un alimentatore per ogni strumento (basta uno per tutti) ed anche il pannello frontale di comando, del tutto inutile durante la programmazione remota.

- *STANDARD IEEE 1155 (VXI)*

Una delle più recenti e significative innovazioni è costituita dallo standard VXI, introdotto nel 1987 e diffuso in tutto il mondo. Esso fa riferimento ad un “mainframe” che dispone di alcuni (fino a 13) “slot” in cui si possono inserire degli strumenti modulari su scheda, che possono consentire la realizzazione di sistemi automatici di misura.

L'architettura del bus VXI, di tipo aperto, consente l'adozione di strumentazione modulare su scheda basata sul bus VME, da cui prende il nome (VMEbus eXtensions for Instrumentation).

In tal modo viene garantita la compatibilità operativa fra i moduli prodotti da diverse case costruttrici ed inseriti nello stesso cestello. Lo standard VXI definisce i requisiti meccanici, elettrici funzionali ed operativi del cestello e dei dispositivi in esso inseriti. Sono previste 4 dimensioni standard, come mostrato in Fig. 24.

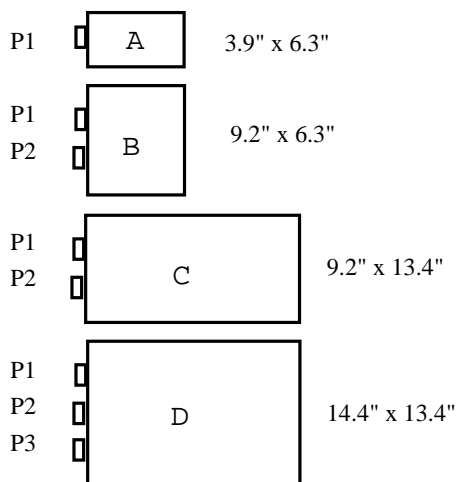


Fig. 24. Dimensioni standard dei moduli VXI.

Il dispositivo posto all'estrema sinistra del cestello è un dispositivo speciale, detto *Slot 0* che genera il clock di sistema ed i segnali di configurazione e di sincronizzazione (trigger). Esso mediante un opportuno software (*Resource Manager*) identifica i dispositivi del sistema, assegna gli indirizzi logici, configura la memoria e stabilisce le gerarchie.

I moduli VXI posseggono un banco di registri attraverso i quali esplicano le proprie funzionalità di indirizzamento. Tali registri sono presenti in ogni dispositivo VXI e consentono al dispositivo posto allo Slot0 di identificare il tipo, modello e costruttore e lo spazio di indirizzo.

Il consorzio del *VXIbus* ha definito un protocollo a parole seriali, modellato sulla base del protocollo di comunicazione del bus IEEE 488, che specifica alcuni comandi di interfaccia comuni e fondamentali (come il reset, il trasferimento di un blocco, la richiesta di stato e di interrupt dello strumento). In seguito è stato introdotto un linguaggio che rende disponibili i comandi necessari per la configurazione della misura e/o del segnale (SCPI) e fa riferimento non al tipo di strumento, ma solo alle sue funzioni: è, perciò, applicabile ad una ampia varietà di dispositivi ed anche a generazioni successive dello stesso strumento.

Un sistema VXI può essere controllato con tre diverse modalità (vedi Fig. 25):

- mediante un computer su scheda inserito direttamente nello slot 0 (embedded); questa soluzione consente di ottenere le massime prestazioni in termini di velocità di comunicazione;
- mediante un computer esterno connesso al sistema VXI mediante un canale ad alta velocità (Multisystem eXtension Interface o MXI) collegato allo slot 0; questa soluzione non è la migliore in termini di velocità, ma consente l'utilizzo di un computer esterno di costo inferiore;

Il sistema VXI è organizzato secondo diversi tipi di bus a cui sono delegate specifiche funzioni:

- un bus di clock costituito da due segnali di temporizzazione a 10 e 100 MHz ed un segnale di sincronismo ECL;
- un bus di trigger costituito da 8 segnali di trigger TTL e 6 ECL;
- un bus locale che consente di realizzare una struttura daisy-chain per le comunicazioni tra moduli adiacenti;
- un bus che consente di sommare e gestire più segnali analogici;
- un bus usato dal controllore per l'identificazione degli strumenti inseriti nel cestello (12 linee, ognuna delle quali collegano lo Slot 0 ad un solo Slot del bus);
- un bus costituito da sette diverse tensioni di alimentazione.

- mediante un computer esterno connesso al sistema VXI mediante un bus IEEE-488 collegato allo slot 0: la velocità di trasmissione è particolarmente bassa, ma il sistema può essere utilizzato come se fosse uno strumento tradizionale, sfruttando al massimo le risorse HW e SW già disponibili.

Oggi sono disponibili oltre 1000 prodotti commerciali di più di 250 fornitori;

I principali vantaggi introdotti da questo nuovo tipo di bus sono:

- l'elevato "throughput" (capacità di compiere molte operazioni in una unità di tempo), che riduce i tempi di misura e migliora la funzionalità del sistema;
- l'adozione di standard aperti per i quali esistono più fornitori e che quindi consentono di massimizzare la flessibilità e minimizzare l'obsolescenza;
- la possibilità di ottenere significative riduzioni di spazio;
- il costo ridotto del sistema nell'arco della sua intera vita utile;

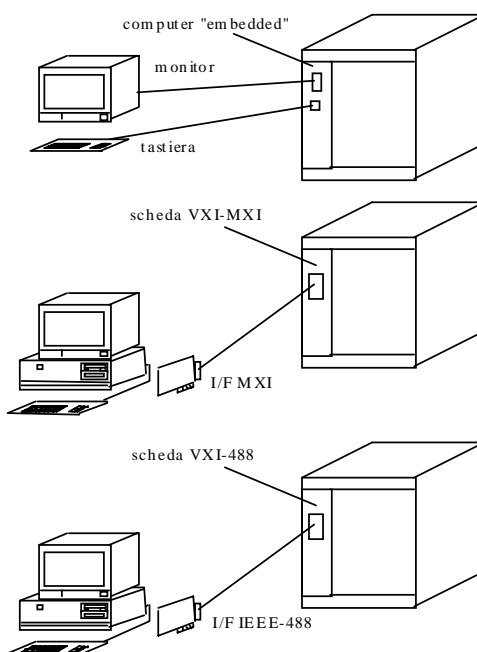


Fig. 25. Esempio di sistemi VXI-bus.

- il miglioramento delle prestazioni, grazie alla precisa temporizzazione e sincronizzazione;
- la disponibilità di software (SW) standard per la configurazione e la programmazione del sistema.

I protocolli di comunicazione di VXI sono contraddistinti da più livelli: *message-based*, *register-based*, *memory ed extended*.

Il livello più basso è il *register-based*: la programmazione avviene scrivendo direttamente nei registri hardware delle informazioni binarie ed offre come vantaggi elevata velocità di trasferimento e semplicità dell'interfaccia con il VXI. I dispositivi che hanno solo queste capacità di comunicazione si dicono dispositivi *Register-Based*.

Il livello *extended* permette di superare l'inconveniente di dover programmare in binario perché esiste un dispositivo intermedio, il *commander* (con funzioni di *controllore*), che provvede a tradurre messaggi ad alto livello in informazioni binarie, in modo da poter pilotare direttamente i dispositivi su scheda ad esso connessi (*servants*).

Il livello *memory* funziona come un *register-based* ed è specializzato per il trasferimento veloce di grandi quantità di dati.

I dispositivi *Message-Based* hanno anche i Registri di Comunicazione e possono comunicare seguendo uno specifico protocollo (Word Serial Protocol). Esso ha molte analogie con il protocollo IEEE 488, perché a questo livello i dispositivi comunicano tra loro con messaggi ASCII, in modo asincrono. In questo caso aumentano le capacità del canale di comunicazione.

## 8 Standard per l'automazione di impianti complessi

Nel settore dell'automazione di impianti complessi, stanno emergendo nuove necessità, legate al fatto che i sistemi automatici possono facilitare l'attività produttiva non solamente attuando il controllo del processo, ma anche intervenendo nella gestione e supervisione del processo produttivo globale. Una delle motivazioni principali è legata alla necessità di migliorare la qualità del prodotto, attraverso una diversa gestione dell'intero stabilimento (ISO 9000).

Si assiste quindi ad un aumento della richiesta di informazioni da parte dei vari dispositivi e strumenti dislocati nell'ambiente produttivo.

In quest'ambito vengono comunemente individuati tre diversi livelli gerarchici, relativamente al tipo di comunicazioni che intercorrono tra i vari dispositivi:

- livello di impianto;
- livello di unità produttiva;
- livello di processo.

Il *livello di impianto* è quello superiore e si riferisce alla trasmissione dei comandi di gestione dell'impianto stesso (gestione magazzino, piani di produzione, ..). Considerata la natura di queste informazioni, esse non richiedono particolari vincoli sui tempi di trasmissione. Inoltre il traffico non è costante ma può fluttuare considerevolmente nel tempo.

Al *livello di unità produttiva* è prevista la comunicazione tra più dispositivi che operano relativamente alla stessa unità di produzione, quali PLCs (Programmable Logic Controllers) e macchine a controllo numerico. I vincoli sui tempi di trasferimento sono in questo caso maggiori, poiché eventuali ritardi nella trasmissione di questi dati potrebbero produrre delle sospensioni o alterazioni del ciclo produttivo. Generalmente la soluzione che si adotta è quella dell'uso di reti trasmissive proprietarie (non standard).

Al *livello di processo* è prevista la comunicazione tra piccoli dispositivi (sensori, attuatori, PLC, trasmettitori, interfacce d'ingresso di microprocessori). La trasmissione delle informazioni implica tempi di risposta ben definiti ed è normalmente realizzata con collegamenti punto-punto.

- **DISPOSITIVI DI CAMPO**

I dispositivi di campo attualmente in uso (sensori, attuatori e controllori) possono essere classificati in tre categorie:

- dispositivi con I/O analogica;
- dispositivi ibridi con I/O analogica e digitale;
- dispositivi con I/O digitale.

I primi sono generalmente connessi al dispositivo di I/O di un sistema di controllo mediante linee ad anello di corrente. Ogni dispositivo ha un suo collegamento (punto-punto).

I secondi possono essere utilizzati sia con sistemi di comunicazione analogici che con quelli digitali, come ad esempio i dispositivi a tecnologia smart.

Se integrati con dispositivi completamente analogici, essi richiedono linee di comunicazione dedicate, anche se queste linee possono essere utilizzate per trasmettere informazioni aggiuntive, abilitando la modalità di trasmissione digitale. Se i dispositivi utilizzati sono tutti ibridi, è possibile utilizzare bus condivisi per la trasmissione delle informazioni.

I dispositivi completamente digitali, generalmente richiedono specifiche interfacce hardware e driver software per la loro gestione. Questa necessità, a prima vista non eccessivamente onerosa, rappresenta lo svantaggio maggiore di questi dispositivi ed un freno alla loro diffusione.

- **TECNOLOGIA SMART**

Attualmente la maggior parte degli impianti realizzati prevede il collegamento con anello di corrente a 4-20 mA (vedi in seguito). La sostituzione di tutte le apparecchiature per migrare verso un sistema a bus di campo comporta un grande investimento.

Per ovviare a questo problema sono state proposte delle soluzioni miste quali quelle *smart* che prevedono l'integrazione della trasmissione a 20 mA con la trasmissione tipo bus di campo, come avviene con il protocollo HART (Highway Addressable Remote Transducer). In questo caso al segnale analogico che rappresenta l'informazione nell'anello di corrente vengono sovrapposti degli impulsi digitali che rappresentano informazioni aggiuntive. Il collegamento è ancora del tipo punto-punto.

Nel caso di sistemi che operano in tempo reale essendo già disponibile l'informazione di processo trasmessa con l'anello di corrente non è giustificata la trasmissione dei dati digitali a velocità elevata. Quindi la metodologia trasmissiva per ciò che concerne il controllo del processo è quella classica, mentre la trasmissione digitale viene utilizzata per la configurazione remota o per la diagnosi, compiti che non richiedono velocità trasmissive elevate. Ciò però rappresenta un limite di questa soluzione, poiché è pur vero che la sua adozione consente nell'immediato di ridurre i costi di investimento, migliorando le prestazioni dell'impianto, però per un passaggio ad un sistema completamente digitale sarà sempre necessario sostituire tutti i dispositivi di comunicazione.

È questo forse il motivo principale per cui esistono diverse soluzioni che adottano il protocollo HART, ma esse sono tra loro incompatibili nel senso che non è possibile attendersi che apparecchiature prodotte da costruttori diversi interagiscano senza bisogno che vengano introdotte sostanziali modifiche.

- *BUS DI CAMPO*

In questo ambito si va diffondendo la necessità del controllo di dispositivi di processo (o di campo) attraverso un sistema di comunicazione digitale basato su un bus detto *bus di campo* (Fieldbus) in sostituzione dei collegamenti punto-punto. In particolare la topologia di collegamento a stella tra un dispositivo di controllo e l'insieme di sensori ed attuatori ad esso collegati viene sostituita da una topologia a bus. Il bus può essere sia costituito sia da una coppia di cavi che da una fibra ottica.

I dispositivi di tipo fieldbus sono completamente digitali, ad alte prestazioni, con protocolli di comunicazione seriali bidirezionali. Essi sostituiscono completamente tutti e tre i tipi di dispositivi precedentemente illustrati e non solamente quelli analogici.

I dispositivi posti sul bus di campo sono al livello inferiore del sistema di controllo. Essi consentono l'esecuzione di funzioni anche complesse, ma sempre a basso livello, mentre non svolgono funzioni come quelle di coordinamento dell'attività di più processi.

Dovendo questo bus garantire la comunicazione al livello inferiore della gerarchia, le sue specifiche sono alquanto diverse da quelle delle comuni reti di comunicazione. Una delle specifiche principali è quella di consentire tempi di trasferimento sufficientemente piccoli relativamente alla dinamica del processo controllato. Un'altra specifica è quella di garantire questo trasferimento in modo affidabile in un ambiente di lavoro quasi sempre ostile, considerata la presenza di disturbi provenienti dalle apparecchiature circostanti (rumore elettrico), la necessità di prevedere un isolamento galvanico tra le apparecchiature per la presenza di sostanze corrosive (come nei processi chimici).

L'impiego del bus di campo consente di ridurre drasticamente i costi di progettazione, installazione e manutenzione dei sistemi di controllo di processo. In particolare il bus di campo sta sostituendo i collegamenti con segnali ad anello

di corrente a 20 mA, normalmente impiegati per pilotare processi ed impianti industriali.

I principali vantaggi offerti sono:

- la riduzione del numero e del costo dei collegamenti (stesso cavo per tutti i dispositivi);
- la possibilità di modificare facilmente il numero ed il tipo di trasduttori ed attuatori;
- la possibilità di eseguire un pre-trattamento dei dati (es. sensori intelligenti) che consente al sistema di controllo di utilizzare direttamente i dati ricevuti;
- la possibilità di utilizzare le stesse informazioni per più dispositivi (controllore, operatore, sistema di allarme,..) senza dover duplicare la strumentazione;
- la configurazione (es. cambio scala) e la taratura a distanza o l'esecuzione di prove di diagnosi.

In particolare si ritiene che l'uso di trasmettitori intelligenti consentirà di ridurre a metà le spese di manutenzione.

In Figura 26 è riportato uno schema a blocchi di un bus di campo che connette un sistema di misura e/o controllo con trasduttori (T) ed attuatori (A).

Fattori importanti per questo bus sono:

- i tempi di comunicazione, fondamentali nel caso di controllo in tempo reale;
- le tecniche di sincronizzazione del trasferimento dati;
- la capacità trasmissiva;
- l'immunità ai disturbi;
- la modularità ed espandibilità del sistema.

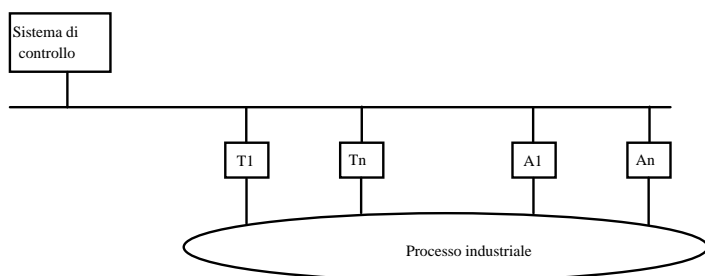


Fig. 26. Schema di principio di un bus di campo.

La standardizzazione in questo settore è molto importante ai fini di ridurre i costi ed i tempi di esecuzioni di installazioni costituite integrando le apparecchiature prodotte da costruttori diversi.

In altre parole, il fieldbus è una rete digitale di comunicazione che interconnette i controllori di processo con la strumentazione. In effetti nell'architettura di un sistema fieldbus sono previsti due blocchi principali, che possono essere interconnessi con un opportuno dispositivo detto "bridge":

- un bus a bassa velocità (H1), operante a 31,25 kb/s;
- un bus ad alta velocità (H2), operante ad 1 o 2 Mb/s.

Questa scelta è legata alla necessità di consentire sia ai costruttori di realizzare prodotti conformi a queste nuove specifiche che agli utilizzatori di sostituire gradualmente gli attuali dispositivi analogici.

Attualmente si sta lavorando alla definizione di uno standard internazionale che purtroppo non è ancora disponibile. Diversi sono i protocolli utilizzati per il trasferimento dei dati per cui si prevede che nel futuro saranno realizzate delle interfacce (gateway) per consentire l'interconnessione tra sistemi eterogenei.

- *FIELDBUS STANDARD*

La commissione ISA/IEC (Instrument Society of America/International Electrotechnical Committee) sta lavorando alla standardizzazione di questo bus dalla metà degli anni '80, riuscendo ad emettere uno standard per il solo livello fisico del bus (ISA Fieldbus SP50). Ciò a causa soprattutto della riluttanza da parte dei costruttori di accettare standard di tipo aperto, a causa dei grandi interessi dovuti all'elevato numero di dispositivi di tipo proprietario installati.

Diversi sono i protocolli proposti, quali il FIP ed il PROFIBUS.

Il *FIP* (Factory Instrumentation Protocol) è uno standard nazionale in Francia, mentre il *PROFIBUS* (PROcess FIEld BUS) è uno standard nazionale in Germania. Altri standards sono stati definiti, come CAN, VAN, LON, HART, J1850 ed Interbus-S, anche se nessuno di essi riesce a coprire tutte le applicazioni previste per questo bus.

Il FIP è orientato per applicazioni in cui il tempo di trasferimento è un fattore critico, mentre il PROFIBUS è orientato per sistemi costituiti da reti di unità produttive.

Un nuovo standard è in fase di sviluppo da parte della Fieldbus Foundation, nata nel 1994 dalla fusione di due organizzazioni:

- la ISP (Interoperable Systems Project Foundation)
- la WorldFIP/North America

e costituita da oltre 85 membri in ambito internazionale. Lo scopo principale è quello di fornire uno standard unico a livello internazionale.

Il livello fisico del bus, che specifica le caratteristiche elettriche e meccaniche dei collegamenti, segue lo standard del livello fisico IEC.

Il livello utente (Fig. 27), poiché definisce il modello software per l'interazione dell'utente con il sistema, è uno dei punti principali. Esso è costituito da due componenti principali:

- i blocchi funzione, che consentono di modellare funzioni di controllo di tipo standard;
- le descrizioni dei dispositivi, che consente di ottenere in modo automatico informazioni sui dispositivi di campo.

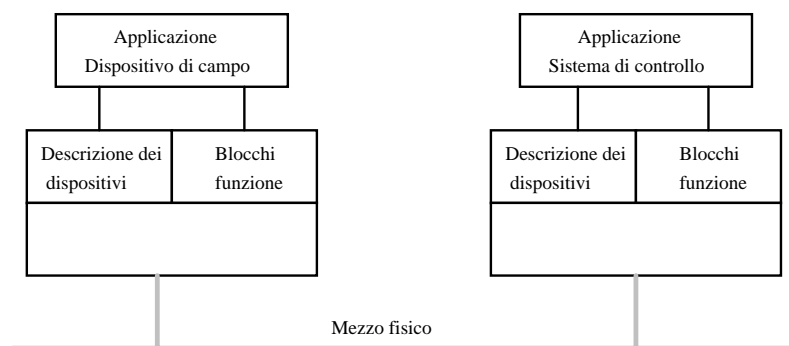


Fig. 27. Livello utente.

Le specifiche sui *blocchi funzione* definiscono un insieme di ingressi e di uscite, una modalità operativa (*mode structure*) ed un sottosistema di allarme (*alarm and event structure*). Un dispositivo a standard fieldbus è configurato per

operare con un insieme di blocchi funzione. Per utilizzarlo esso verrà configurato per eseguire un opportuno algoritmo e per comunicare con altri dispositivi o con il controllore centrale. Il sistema può essere visto non come un insieme di strumenti, ma come un insieme di blocchi funzione.

Questa modalità descrittiva nasce dall'evoluzione in atto in ambito industriale. Contrariamente ai vecchi sistemi in cui il processore centrale leggeva i dati da alcuni dispositivi, li elaborava secondo un opportuno algoritmo e quindi inviava comandi ad altri dispositivi, nei nuovi sistemi digitali anche i dispositivi di campo sono capaci di eseguire delle procedure software. Parte dell'elaborazione può essere quindi demandata a questi dispositivi intelligenti realizzando sistemi distribuiti. Il bus di campo è quindi una rete di controllo distribuita.

L'uso dei blocchi funzione consente la distribuzione e l'esecuzione delle funzioni di processo, garantendo la consistenza nella definizione sia delle funzioni che delle informazioni trasmesse.

Attualmente sono previste una decina di funzioni, anche se è previsto lo sviluppo di altre funzioni. Esse sono:

- ingresso discreto;
- uscita discreta;
- ingresso analogico (pressione, temperatura, flusso, livello);
- uscita analogica (trasduttore, posizione valvola);
- controllo PID;
- selezione di un segnale;
- carico manuale;
- .....

La *descrizioni dei dispositivi* è un meccanismo standard che permette ad un host di acquisire dai dispositivi dei messaggi che ne specificano le caratteristiche: nome del costruttore, numero di revisione software, blocchi funzione disponibili, capacità diagnostiche, ecc. Ciò elimina la necessità di eseguire modifiche al software di gestione in conseguenza della sostituzione o aggiunta di un

dispositivo. Esse sono sviluppate usando un linguaggio C-like, detto Device Description Language (DDL).

## 9 Ulteriori standard

- *SCSI*

L'interfaccia Small Computer Systems Interface (SCSI) è uno standard industriale ANSI per lo scambio di dati tra computer e periferiche. La trasmissione avviene con un parallelismo di un byte in modo bidirezionale su piccole distanze (<6 m). La velocità massima di  $5 \cdot 10^6$  trasferimenti al secondo (ad 8 bit) richiede la terminazione del bus, per evitare riflessioni. Essa può comunque essere estesa a  $10 \cdot 10^6$  di trasferimenti al secondo, che corrispondono ad 80 Mb/s, mediante l'utilizzo dello standard di comunicazione RS-485. Il bus prevede 18 linee:

- 8 linee di dati;
- 1 linea per il bit di parità;
- 9 linee di controllo.

È prevista una ulteriore evoluzione dello standard con bus a 16bit (160 Mb/s).

- *ANELLO DI CORRENTE 4-20 MA*

Il sistema ad anello di corrente (current loop) non è standardizzato a livello internazionale, anche se trova vastissima applicazione nel settore industriale per trasmettere, ad esempio, i segnali d'uscita di sensori e trasduttori ad un sistema di misura centralizzato. Il suo campo di utilizzo è quello della trasmissione su lunghe distanze o in ambienti affetti da rumore.

Il trasmettitore ha un generatore che controlla il livello di corrente nell'anello che lo collega al ricevitore, costituito da un circuito rivelatore di corrente (vedi Fig. 28). L'intensità della corrente trasmessa varia da 0 a 20 mA; il legame tra la corrente ed il valore trasmesso è generalmente di tipo lineare. Per

evitare che interruzioni dell'anello possano essere scambiati per trasmissione del valore inferiore della scala (0 mA), si utilizzano trasmettitori con portata di 4÷20 mA.

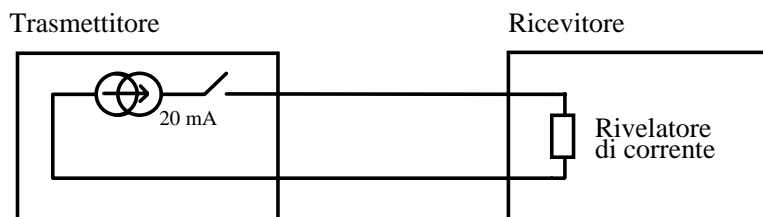


Fig. 28. Anello di corrente 4-20 mA.

Questa tecnica trasmissiva consente di eliminare il rumore di modo comune ed il problema legato alla richiusura dei segnali mediante il circuito di terra. Infatti la trasmissione in corrente ha il vantaggio che il circuito è a bassa impedenza (pochi ohm) con conseguente riduzione del livello di potenza del rumore indotto.

Su sistemi di questo tipo è possibile trasmettere anche segnali digitali. In questo caso si utilizzano due coppie di fili, ognuna delle quali trasmette dati in modo seriale. Un primo anello è costituito da un trasmettitore ad una estremità e di un ricevitore all'altra. L'altro anello consente la trasmissione in senso inverso in modo identico al primo.

Ogni anello ha un generatore di corrente, incorporato nel trasmettitore, che controlla il livello di corrente nell'anello. Il ricevitore è costituito da un rivelatore di corrente. Il sistema di trasmissione può prevedere anche l'adozione di più ricevitori.

Il valore logico '1' viene codificato con una corrente di 20 mA, mentre il valore logico '0' con una corrente di 0 (o 4) mA. La trasmissione dei dati avviene tramite un interruttore (switch) che provvede ad inviare impulsi di corrente attraverso il circuito. La codifica dei dati su questo canale seriale è la stessa definita per lo standard RS 232 (un bit di start, 7/8 bit per il dato ed 1/2 bit di stop).

La velocità di trasmissione è di 20 kb/s su distanze fino a 10 km. Per lunghe distanze è spesso preferito allo standard RS 232.

## 10 Programmazione dei sistemi automatici di misura

La programmazione della strumentazione elettronica di misura gioca oggi un ruolo sempre più determinante nello sviluppo di sistemi automatici di misura. Le funzioni che il software di misura assolve in tali sistemi sono molto diversificate: si passa dalla gestione dei diversi strumenti, al controllo delle interfacce hardware, alla comunicazione mediante l'utilizzo di appositi bus, alla implementazione della procedura di misura relativa alla particolare applicazione in oggetto. Come schematizzato nella Figura 29, l'architettura generale di un software per applicazioni di misura (d'ora in poi denominato SW) consiste di quattro elementi principali:

- i driver per le interfacce ai bus di comunicazione;
- i driver per gli strumenti;
- il programma di misura;
- il programma applicativo

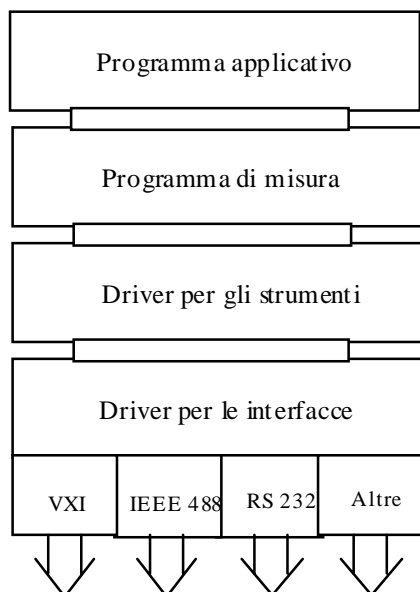


Fig. 29. Architettura generale del software di un sistema automatico di misura.

La comunicazione con la strumentazione impiegata avviene solitamente mediante interfacce standard (RS-232, IEEE 488, PC-bus, VXI), che sono viste

dal microprocessore del computer di controllo come un insieme di registri di memoria. Ogni azione che il microprocessore deve svolgere sul bus richiede l'esecuzione di operazioni di lettura e scrittura in aree di memoria che corrispondono ai registri delle interfacce. Ogni interfaccia dovrà perciò far uso di funzioni dedicate nelle quali siano presenti gli indirizzi dei propri registri. Per questo motivo tutti i costruttori di interfacce hanno sviluppato librerie dedicate, chiamate anche "driver", che vengono fornite a corredo delle schede di interfaccia.

I driver per gli strumenti contengono delle funzioni che permettono di configurare e gestire ogni singolo dispositivo senza che l'utente si preoccupi di tutti quei problemi legati alla sincronizzazione, alla perdita dei dati, al protocollo di comunicazione, ecc (funzioni ad alto livello). La loro disponibilità riduce drasticamente i costi di sviluppo perché consentono l'implementazione di un sistema completo senza dover apprendere come programmare i singoli strumenti.

I **programmi di misura** controllano l'esecuzione delle varie fasi del processo di misurazione, l'acquisizione ed il controllo dei dati, la conduzione e la gestione delle prove e della tempistica in generale.

Le principali funzioni che **l'applicazione utente** è chiamata a svolgere sono: l'elaborazione dei segnali, l'analisi dei dati, la loro trasmissione, condivisione e visualizzazione, l'interfacciamento con l'operatore, la gestione di database locali o remoti.

Solitamente il software applicativo è realizzato in opportuni **ambienti di programmazione** per applicazioni di misura. In essi è possibile la realizzazione di sistemi di misura svariati settori che vanno dalle applicazioni di laboratorio alla produzione e al collaudo automatico dei dispositivi, ecc. Il programmatore può scrivere un programma ad hoc oppure far ricorso a programmi generali dedicati ai diversi scopi. Le loro principali caratteristiche sono soprattutto la presenza di **librerie** (vedi nota) contenenti software per l'uso delle periferiche e per la gestione dell'interfaccia utente.

La funzione più importante posseduta da questi programmi di sviluppo è la generazione automatica delle stringhe di comando. Utilizzando pannelli frontali grafici tali ambienti riproducono il pannello di controllo della periferica così da consentire una interazione analoga a quella che si avrebbe utilizzando direttamente il pannello frontale. Il programmatore può quindi agire direttamente su questa per impostare le volute funzioni dello strumento: automaticamente il

programma, attraverso l'esame delle informazioni contenute nelle librerie, determina le necessarie stringhe di comando.

Tali ambienti possono essere suddivisi in due categorie: sistemi *command oriented* e sistemi *function oriented*. Nel primo caso il programmatore, a conoscenza di tutte le procedure necessarie per il funzionamento dello strumento, seleziona le diverse funzioni e ne comanda l'esecuzione. Il secondo modo di operare consiste nel focalizzare i processi che si susseguono nella esecuzione della misura desiderata per ricondurli a funzioni di base eseguibili dagli strumenti. In questo modo è il sistema di generazione che attiva una particolare funzione da selezionare. Con questo tipo di sistema il programmatore non deve più verificare la corrispondenza fra le stringhe di comando, ma si limita ad informare il sistema di generazione della sostituzione effettuata. Il programmatore può inoltre decidere se utilizzare questa stringa di comando immediatamente per verificare il corretto funzionamento, *gestione interattiva* del sistema, oppure se inserirla nel programma applicativo, *gestione sequenziale*.

La *gestione interattiva* sopperisce alla limitazione delle librerie di far uso delle loro funzioni al di fuori di un programma in esecuzione. Questa limitazione, imposta dalla struttura delle librerie, nega al programmatore la possibilità di effettuare semplici prove relative alla funzionalità del sistema. Tali sistemi permettono al programmatore di attivare il controller anche per una sola azione sul bus. Alcuni sistemi interattivi sono dotati di funzioni diagnostiche che forniscono immediatamente all'utente un rapporto contenente le informazioni relative allo stato logico delle linee del bus, al numero di caratteri trasmessi e alla eventuale causa di malfunzionamenti.

Uno dei pacchetti SW per strumentazione più diffusi è LabWindows/CVI, in ambiente Windows, un ambiente di sviluppo per la strumentazione virtuale in linguaggio ANSI C che gira su differenti piattaforme hardware e che rappresenta ormai di fatto uno standard industriale. Una menzione particolare meritano le librerie messe a punto per gli ambienti software di sviluppo e per la scrittura dei driver un cui modello generale è riportato in Fig. 30.

Va tuttavia segnalato che negli ultimi anni ha preso piede un nuovo approccio alla programmazione della strumentazione elettronica: la *programmazione grafica*. Essa consente di implementare tutte le tradizionali funzioni presenti nei linguaggi di programmazione, utilizzando una forma più leggibile ed immediatamente visualizzabile. Il suo impiego mantiene e semplifica

tutti gli usuali meccanismi per la realizzazione di cicli, salti condizionati, per la definizione di dati e strutture e per la manipolazione di dati. Il vantaggio più evidente è quello della possibilità di scrivere i programmi semplicemente collegando in modo opportuno icone, senza doversi concentrare su problemi di sintassi o di allocazione di memoria. Il più noto ambiente di programmazione grafica è senza dubbio il LabVIEW (National Instruments) che dispone di un compilatore grafico in grado di convertire il codice sorgente (diagrammi a blocchi) direttamente in un codice macchina. Sezioni di codice possono essere racchiuse in un'icona, per la quale l'utente definirà le connessioni di ingresso e di uscita in modo da consentirne l'impiego da parte di altri programmi.

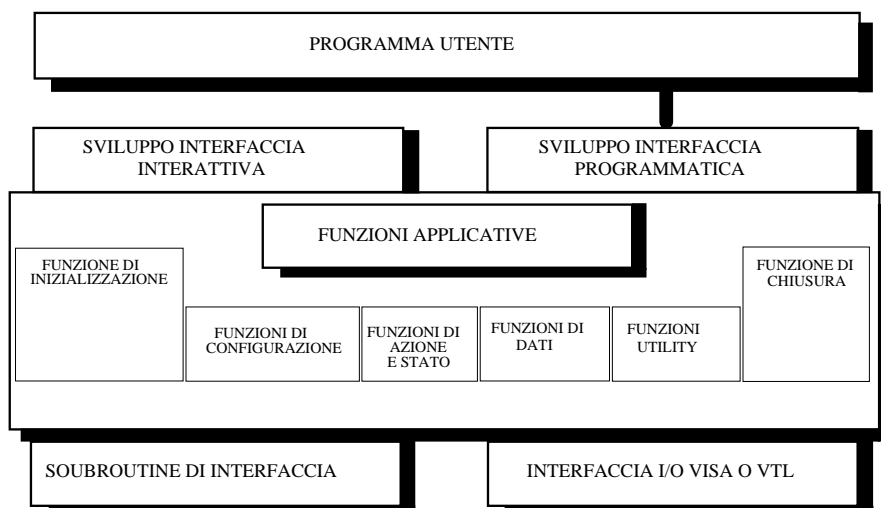


Fig. 30. Modello della struttura interna di un driver.

- *SCPI (Standard Command for Programmable Instruments)*

Quando si utilizza uno strumento comandandolo mediante il proprio pannello frontale è l'utente che seleziona la funzione e la portata più appropriata mentre, in un sistema automatico di misura, il controller sostituisce l'utente può selezionare le funzioni e le portate richieste dal processo di misura in corso.

In un sistema automatico di misura realizzato mediante un bus IEEE 488, ad esempio, per compiere queste selezioni il controller codifica i comandi da inviare alle periferiche mediante sequenze ordinate di byte (stringhe), che trasmette durante il funzionamento in modo dati del sistema. La programmazione delle periferiche è realizzata dal controller che invia, mediante la propria interfaccia, dei caratteri alla periferica che intende utilizzare. Le stringhe trasmesse dal controller devono essere compatibili a quelle che il costruttore dello strumento ha prescelto per l'attivazione delle diverse funzioni e che sono riportate sul manuale d'uso dello strumento. A titolo di esempio in Tabella 10 sono riportati i comandi relativi al funzionamento di un multimetro digitale.

Tab. 10. Esempio di stringhe di comando.

Comando	Funzione		Comando	Portata
F1	VDC		R0	Autorange ON
F2	VAC		R1	200 mV, 200 $\Omega$
F3	2 wire k $\Omega$		R2	2 V, 2 k $\Omega$
F4	4 wire k $\Omega$		R3	20 V, 20 k $\Omega$
F5	mA DC		R4	200 V, 200 k $\Omega$
F6	mA AC		R7	Autorange OFF

Le stringhe sono generalmente composte da due parti distinte, una "testa" alfabetica ed un eventuale "corpo" numerico. Volendo trasmettere più comandi alla stessa periferica non è necessario ricorrere più volte alla stessa procedura di indirizzamento ma, più semplicemente, si può trasmettere una sequenza di caratteri composta da stringhe elementari, individuate mediante speciali caratteri di separazione. In genere gli standard stabiliscono le regole per il trasferimento dei caratteri fra le diverse interfacce, ma non entrano nel merito del significato associato a questi caratteri. Ciò comporta, nel caso in cui uno strumento è sostituito con uno equivalente, la necessità di riconvertire i programmi di controllo. Alcuni costruttori si sono accordati per fare in modo che gli strumenti in grado di effettuare le stesse funzioni utilizzassero le stesse stringhe di comando. È stato in tal modo realizzato una standard denominato *SCPI* (Standard Command for Programmable Instruments).

Grazie all'impiego di questo linguaggio standard è possibile realizzare la totale compatibilità dei comandi di programmazione degli strumenti sia in senso orizzontale che verticale.

Con *compatibilità orizzontale* si intende l'unicità per strumenti diversi dei comandi relativi ad una stessa funzione di misura. Ad esempio (Fig. 31) il comando "TRIG" viene interpretato allo stesso modo sia da un oscilloscopio che da un contatore che da un voltmetro.

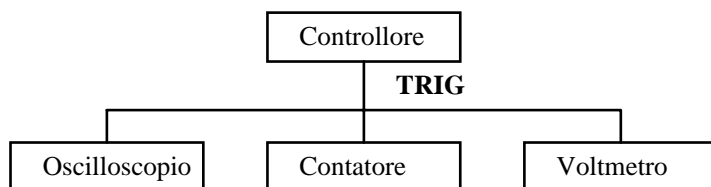


Fig. 31. Esempio di compatibilità orizzontale.

Per *compatibilità verticale* si intende l'unicità di significato per comandi inviati a strumenti dello stesso tipo, ma realizzati da costruttori diversi. Ad esempio (Fig. 32) il comando "MEAS" viene interpretato allo stesso modo da due multimetri. In tal modo è garantita la sostituibilità degli strumenti senza dover riscrivere il software.

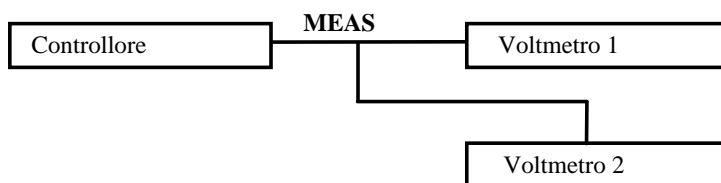


Fig. 32. Esempio di compatibilità verticale.

- **STRUMENTI VIRTUALI**

Gli strumenti di misura sono tradizionalmente costituiti da apparati a sé stanti (stand-alone) che sono utilizzati da un operatore mediante manopole, pulsanti, quadranti, grafici ed altri dispositivi di visualizzazione e regolazione. All'interno di tali apparati vi sono circuiti di alimentazione e circuiti elettronici specializzati per svolgere specifiche funzioni, come condizionatori di segnale,

convertitori A/D, microprocessori e memorie che convertono i segnali esterni, li analizzano e presentano i risultati all'utente su opportuni dispositivi di visualizzazione. Il tipo di misura, le caratteristiche e le prestazioni dello strumento sono definite dal costruttore e non possono essere modificate dall'utente.

La funzione di misura è attuata mediante uno specifico circuito elettronico analogico (strumenti a logica cablata), o mediante uno specifico algoritmo, tradotto in un programma memorizzato in opportune memorie (strumento a logica programmata).

Nella realizzazione di una misura con strumenti a logica programmata, si provvede all'implementazione dell'algoritmo di misura mediante specifiche istruzioni software, invece che mediante una particolare configurazione circuitale di tipo hardware.

La tendenza attuale però, riscontrata in molti settori industriali e scientifici, è quella di una sempre maggiore diffusione di personal computer (PC) e di workstation, che sono divenuti delle piattaforme di elaborazione potenti ed economiche. Questo fa sì che sempre più l'implementazione delle applicazioni di misura si basi sull'inserimento nel bus di schede a basso costo per l'acquisizione dei dati opportunamente gestiti da specializzati software di misura. Grazie a questa architettura le capacità di elaborazione dei nuovi strumenti sono di gran lunga maggiori di quelle degli strumenti tradizionali, stante la rapida evoluzione tecnologica dei computer che deriva dai forti investimenti fatti in questo settore in rapida espansione.

L'architettura aperta della nuova strumentazione consente all'utente di sviluppare sistemi di misura personalizzati, definendo sia il tipo di misura che le prestazioni dello strumento. Tali strumenti consentono la modifica delle funzioni di misura semplicemente modificando il programma di elaborazione dei dati acquisiti. Il loro funzionamento si basa quindi su un sistema di elaborazione a microprocessore che consente di qualificare una funzione di misura per mezzo di un algoritmo sviluppato dall'utente in luogo di una particolare configurazione circuitale hardware (HW). In altri termini, si può affermare che il tradizionale concetto che faceva corrispondere ad ogni misurazione uno strumento, viene modificato facendo corrispondere ad ogni misurazione un algoritmo; ciò rappresenta un vantaggio in termini di versatilità ed economicità di impiego dello strumento, in quanto la stessa struttura fisica può essere di volta in volta riconfigurata, per l'esecuzione della misurazione richiesta, senza intervenire

sull'HW, ma traducendo in programma di calcolo l'algoritmo relativo alla misurazione che si intende effettuare.

Strumenti di questo tipo vengono definiti *virtuali* per distinguerli da quelli tradizionali; il termine virtuale indica la caratteristica dello strumento di essere virtualmente uguale allo strumento tradizionale. I principali vantaggi che essi offrono sono:

- l'incremento delle prestazioni e della flessibilità del sistema, che presenta quindi una maggiore riconfigurabilità e riutilizzabilità;
- la riduzione dei costi di sviluppo e manutenzione.

Nella Tabella 11 si è riportato in modo sintetico un confronto tra questi due tipi di strumentazione.

Tab. 11. Confronto tra i due tipi di strumenti.

STRUMENTI TRADIZIONALI	STRUMENTI VIRTUALI
Definiti dal produttore	Definiti dall'utente
Funzionalità fissa e non modificabile	Funzionalità aperta e flessibile
L'HW è l'elemento caratteristico	Il SW è l'elemento caratteristico
Assolvono una funzione specifica	Sono orientati all'applicazione
Sono stand-alone con connettività limitata	Hanno una connettività estesa
Costi di sviluppo e manutenzione elevati	Il SW consente di ridurre al minimo i costi di sviluppo e manutenzione
Economia di scala minima	Massima economia di scala

Concettualmente uno strumento virtuale combina schede di acquisizione dati di tipo plug-in, strumentazione RS-232, IEEE-488 e VXI in un solo sistema, con la massima possibilità di personalizzazione da parte dell'utente. È possibile quindi creare un sistema completamente definito dall'utente e non dal produttore, strettamente a misura delle proprie esigenze. L'utente può definire pannelli frontali ed interfacce utente per un particolare strumento, ciascuno specifico per una particolare applicazione. È inoltre possibile rappresentare sul display più strumenti contemporaneamente.

In questo modo l'utente ritrova tutti i controlli che gli sono familiari e sui quali agire facilmente tramite il mouse o i cursori; può usufruire delle capacità elaborative dello strumento con una conoscenza solo minima del programma usato per implementare la funzione di misura; può modificare i pannelli esistenti o crearne dei nuovi per le proprie specifiche esigenze, utilizzando i sempre più

sofisticati programmi per la gestione e realizzazione di interfacce grafiche.

In conclusione, uno strumento di misura virtuale ha le seguenti caratteristiche peculiari:

- si usa in maniera molto simile ad uno strumento di tipo tradizionale;
- consente di effettuare misure e, contemporaneamente, di elaborare i dati ottenuti;
- può essere modificato e reso adatto per una vasta gamma di applicazioni, compatibilmente con il suo supporto hardware;
- può essere interfacciato con altri strumenti analoghi per la realizzazione non di una sola misura, ma di un set di misure;
- presenta, in linea di massima, un livello di affidabilità maggiore rispetto ad uno strumento tradizionale.

## 11 Appendice

### Problemi legati al campionamento e filtraggio anti aliasing

La struttura base di un sistema di misura basato sull'elaborazione numerica dei segnali è mostrata in Figura A1.

Prima di poter essere elaborati da un personal computer i segnali di misura

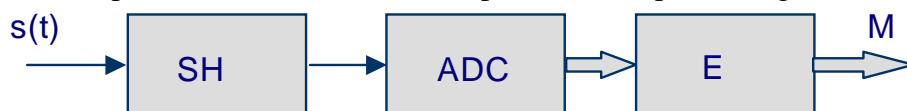


Fig. A1. Struttura base di un sistema di misura basato sull'elaborazione numerica dei segnali.

debbono essere convertiti in forma numerica. Come precedentemente spiegato lo strumento che effettua questa operazione è l'unità di conversione o convertitore Analogico digitale (ADC).

Si vuole porre adesso l'attenzione ai problemi che possono nascere quando si converte una informazione di misura analogica in forma numerica.

Il segnale  $s(t)$  (vedi Fig. A2) è un segnale continuo nel tempo e nelle ampiezze. Cioè qualsiasi sia l'intervallo di osservazione tale segnale è sempre rappresentato da un numero infinito di punti.

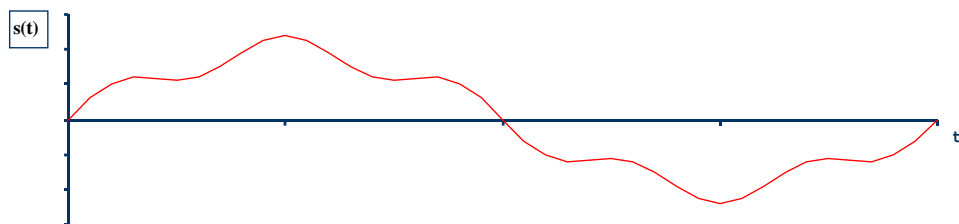


Fig. A2. Esempio di un segnale continuo  $s(t)$ .

Quando si effettua un campionamento il problema che bisogna porsi è se l'insieme finito dei valori campionati sia o meno rappresentativo del segnale continuo di partenza.

Nell'ipotesi di avere campionato il segnale di Figura A2 come riportato in Figura A3, è possibile intuitivamente affermare che il segnale campionato non sia rappresentativo del segnale reale.

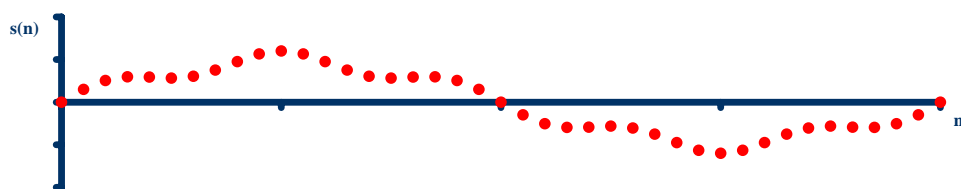


Fig. A3. Sequenza  $s(n)$  ottenuta campionando  $s(t)$  con un numero "sufficiente" di punti.

Analogamente sembra di poter affermare intuitivamente che il campionamento rappresentato in Figura A4 sia rappresentativo del segnale reali.

In altre parole, il problema fondamentale dell'elaborazione numerica di segnali è stabilire se e come una sequenza, ottenuta dal campionamento di un segnale tempo continuo, contiene le stesse informazioni del segnale di partenza. Bisogna, cioè, verificare se il contenuto informativo associato al segnale nel dominio del tempo continuo si mantiene inalterato attraverso l'operazione di campionamento. Un modo per risponde a tale problema consiste nel verificare se è possibile estrarre dal segnale ottenuto nel dominio del tempo discreto le stesse

informazioni associate al segnale nel dominio del tempo continuo.

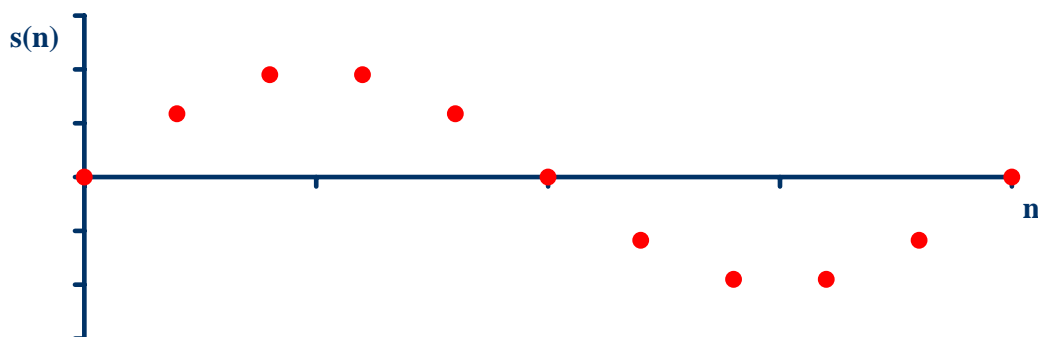


Fig. A4. Sequenza  $s(n)$  ottenuta campionando  $s(t)$  con “pochi” punti.

In caso contrario si può incorrere in due tipi di problemi:

- *alterazione del contenuto informativo;*
- *aggiunta di informazioni ridondanti.*

In ogni caso si parla di fenomeni di *aliasing*.

Il problema su enunciato può essere superato facendo riferimento ad un importantissimo teorema detto “*del campionamento*” od anche “*di Shannon*”

Questo teorema garantisce che se il segnale di partenza ha spettro limitato alla frequenza  $f_0$ , cioè se la massima frequenza presente nel segnale da campionare è  $f_0$ , allora la sequenza campionata contiene le stesse informazioni del segnale di partenza se la frequenza  $f_c$  di campionamento è tale che sia:

$f_c > 2 f_0$  Tale frequenza di campionamento dovrà allora essere considerata come la minima frequenza per cui è possibile estrarre dal segnale campionato  $s(n)$  le stesse informazioni presenti nel segnale analogico (continuo)  $s(t)$ .

In maniera duale, una volta fissata la massima frequenza di campionamento, è necessario verificare se essa è *minore* del doppio della massima frequenza presente nello spettro del segnale, cioè se la banda dei segnali che si vogliono studiare è maggiore di  $f_c/2$ .

La soluzione a questo problema può essere trovata antepoendo al sistema

di conversione A/D un filtro analogico, detto filtro anti aliasing (vedi Fig. A5).

Il filtro anti aliasing è un filtro passa basso, la cui frequenza di taglio deve essere posizionata in modo tale da eliminare tutte la componenti spettrali con frequenza  $f > 1/2T_c$ . L'utilizzo di

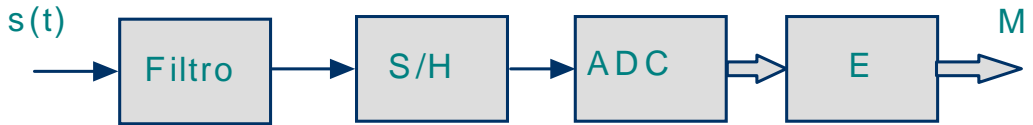


Fig. A5. Inserimento del filtro antialiasing.

## **BIBLIOGRAFIA**

- L. Olivieri, E. Ravelli, "Principi e applicazioni di elettrotecnica", CEDAM, Padova, 1989 - Parte prima
- L. Olivieri, E. Ravelli, "Principi e applicazioni di elettrotecnica", CEDAM, Padova, 1989 - Parte seconda
- V. Daniele, A. Liberatore, R. Graglia, S. Manetti, "Elettrotecnica", Monduzzi Editore, Bologna, 1994.
- G. Zingales, "Misure elettriche. Metodi e strumenti ", UTET, Torino, 1992.
- M. Savino, "Fondamenti di scienza delle misure", Nuova Italia Scientifica.
- A. Brandolini, P. Regoliosi, "Misure elettriche", Patron, 1983.
- L. Benetazzo, "Misure Elettroniche", Vol. I Strumentazione Analogica, Vol. II Strumentazione Numerica, Ed. CLEUP Padova, 1990.
- C. Offelli, M. Bertocco, D. Petri, "Strumentazione Numerica", Ed. Libreria Prog. 1991.
- U. Pisani, "Misure Elettroniche, strumentazione elettronica di misura", Politeko Edizioni-Torino, 1999.
- S. Pirani, "Sistemi automatici di misura e acquisizione dati", (Sottotitolo: IEEE 488.1), Società Editrice Esculapio, 1990
- L. Angrisani, A. Pietrosanto, "Sistemi di misura VXI: guida alla progettazione, all'uso ed alla valutazione delle prestazioni, CUES, 1996.
- L. Cristaldi, A. Ferrero, "Dagli strumenti a logica programmata agli strumenti virtuali", AEI, vol. 80, n. 4, 1993, pp. 407-413.