

COMPLEMENTI DI ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONI

RICHIAMI DI CONCETTI RELATIVI ALLA COMUNICAZIONE SERIALE TRA DUE DTE

PRINCIPALI SEGNALI DELL'INTERFACCIA SERIALE RS232

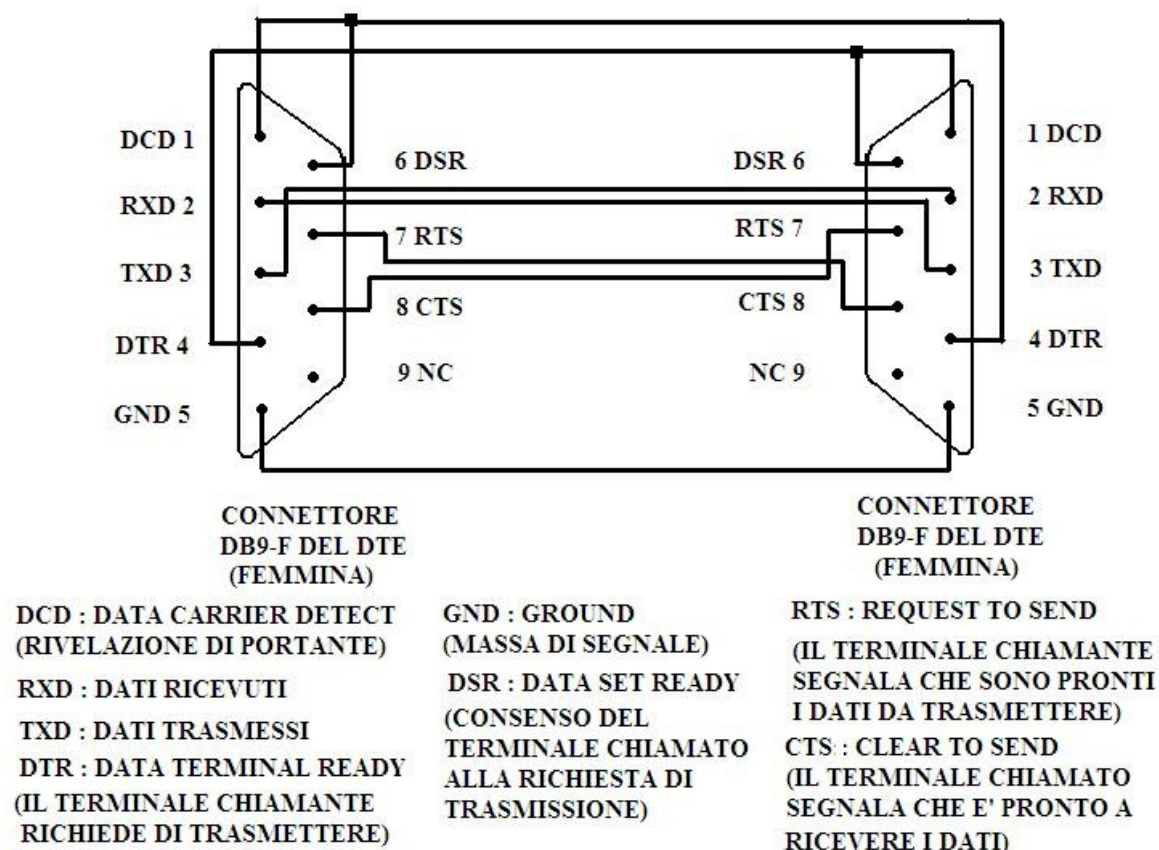
Un terminale dati (computer) (DTE: Data Terminal Equipment) ed un modem in banda base o fonico (DCE: Data Communication Equipment, dispositivo di comunicazione dati) vengono collegati tra loro attraverso l'interfaccia seriale RS232, che funziona bene per distanze fino a 15 metri e velocità di trasmissione (bitrate) fino a 19200 bps (bit/s).

I principali segnali dello standard EIA RS232 sono i seguenti:

- 1) TXD (Transmitted Data)- Il terminale attraverso questa linea invia al modem locale i dati da trasmettere.
- 2) RXD (Received Data)- Il modem locale attraverso questa linea riceve i dati trasmessi dal terminale remoto e li presenta al terminale al quale è collegato con l'interfaccia RS232.
- 3) DTR (Data Terminal Ready - Terminale Dati pronto) - Il terminale segnala al modem locale che è pronto a trasmettere. Questo segnale controlla contemporaneamente il collegamento del modem locale alla linea telefonica mediante un relè (relè di linea).
- 4) DSR (Data Set Ready - Risposta del modem locale al DTR del terminale) - Il modem locale comunica al terminale l'avvenuto collegamento alla linea telefonica.
- 5) RTS (Request To Send) - Il terminale avverte il modem locale che sono pronti i dati da trasmettere e chiede allo stesso di immettere la portante in linea.
- 6) CTS (Clear To Send - Risposta del modem locale all' RTS del terminale) - Il modem locale comunica al terminale di avere immesso la portante in linea.
- 7) DCD (Data Carrier Detect - Rivelazione di portante in arrivo) - Il modem locale segnala al terminale che è presente in linea la portante trasmessa dal modem remoto e che pertanto sono in arrivo dei dati.
- 8) RI (Ring Indicator) Il modem locale segnala al terminale una chiamata in arrivo da parte del terminale remoto.

COMUNICAZIONE SERIALE INCROCIATA TRA DUE DTE (TERMINALI) ATTRAVERSO L'INTERFACCIA RS232 (NULL MODEM)

COLLEGAMENTO NULL-MODEM
TRA DUE TERMINALI (DTE) CON L'INTERFACCIA RS232



Il collegamento NULL-MODEM (senza modem) viene impiegato per collegare localmente e direttamente, in modo incrociato, due terminali (DTE), per esempio due computer, attraverso l'interfaccia seriale RS232 secondo lo schema in figura. I segnali svolgono le seguenti funzioni:

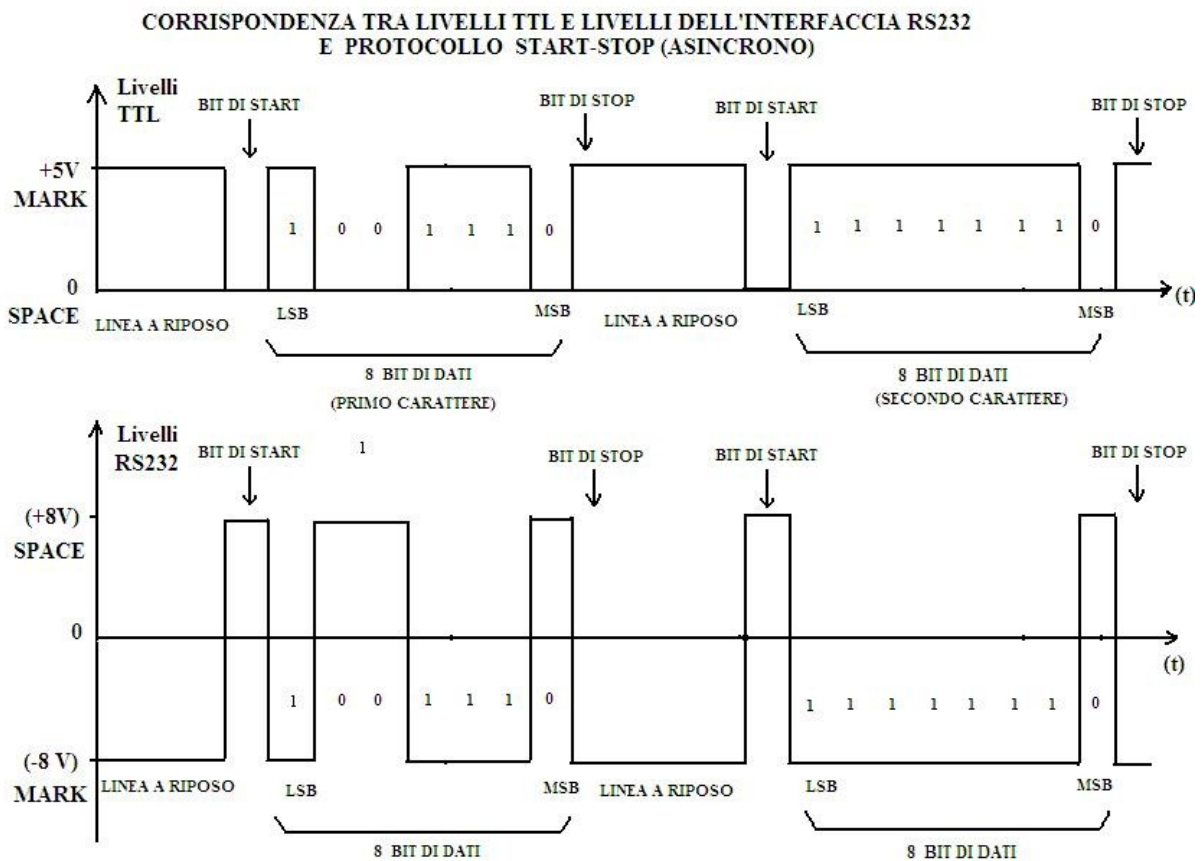
- 1) L'uscita TXD (Transmitted Data) di un terminale attraverso questa linea invia i dati da trasmettere all'ingresso RXD dell'altro terminale.
- 2) RXD (Received Data) - Un terminale attraverso questa linea riceve i dati trasmessi dall'altro terminale.
- 3) DTR (Data Terminal Ready - Terminale Dati pronto) - Un terminale segnala all'altro, attraverso gli ingressi DSR e DCD (collegati insieme), che è pronto a trasmettere. Il terminale ricevente a sua volta comunica al terminale trasmittente il proprio consenso alla ricezione dei dati, attivando la sua uscita DTR collegata agli ingressi DSR e DCD del terminale trasmittente.
- 4) RTS (Request To Send) - Un terminale avverte l'altro attraverso

l'ingresso CTS che sono pronti i dati da trasmettere. Il terminale ricevente a sua volta comunica al terminale trasmittente, attraverso l'ingresso CTS di questo, di essere pronto a ricevere i dati.

PROTOCOLLO ASINCRONO START-STOP

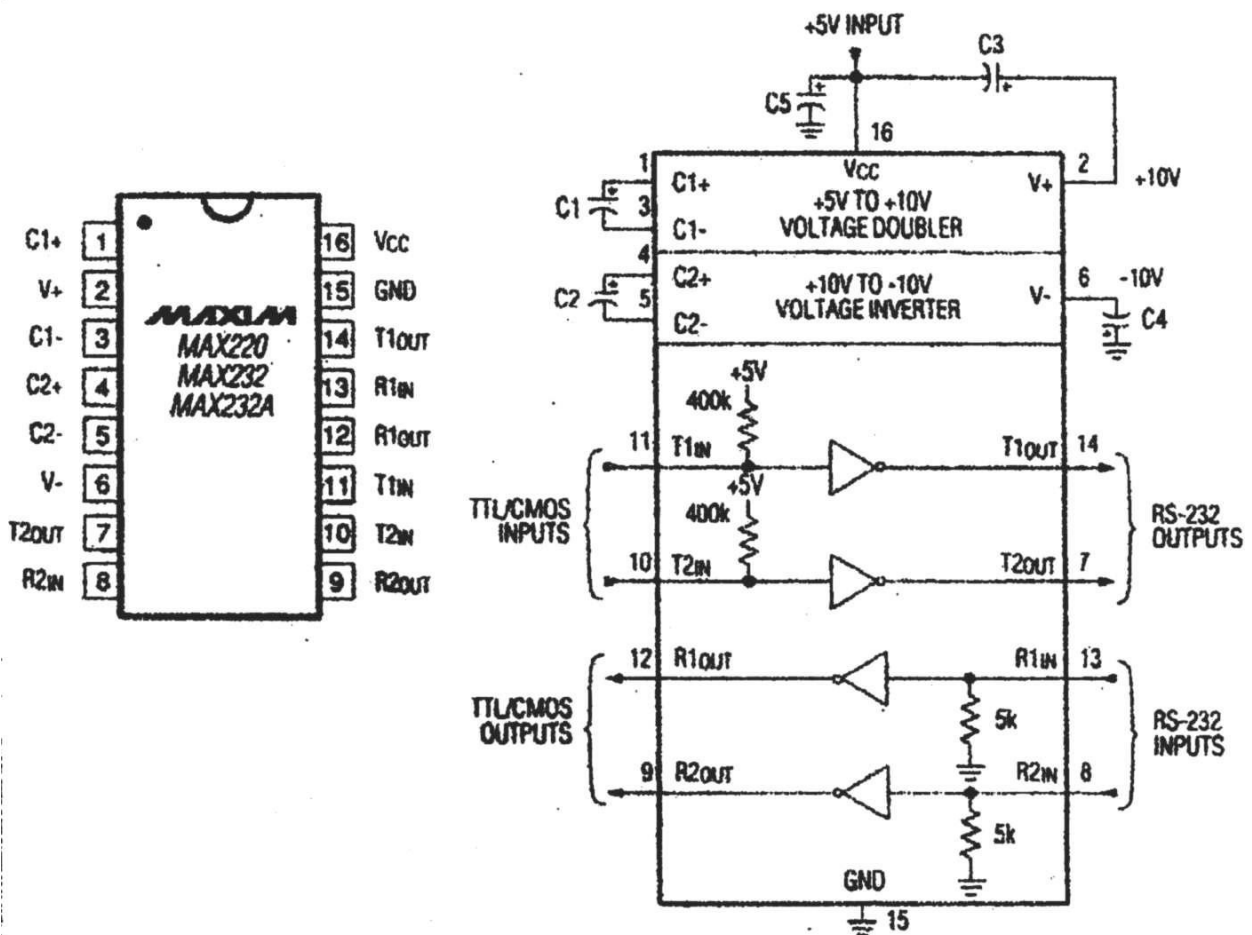
Il protocollo asincrono start-stop deriva dal sistema delle telescriventi (telex), nelle quali la linea (anello di corrente a 20 mA) si trovava inizialmente nello stato **mark** (corrente di 20 mA in linea). In coincidenza con la trasmissione di un carattere, la linea veniva interrotta (stato **space** di assenza di corrente) per un tempo di bit (di start) necessario a sincronizzare la telescrivente remota per la ricezione dei 5 bit di carattere (codice Baudot). Al termine della trasmissione del carattere la linea ritornava allo stato **mark** in attesa della ricezione del bit di start relativo al carattere successivo.

Lo standard RS232 funziona in modo analogo, associando lo stato **mark** (1 - linea a riposo) ad una tensione negativa compresa tra - 3 V e - 15 V (-8 V nell'esempio in figura) e lo stato **space** (0) ad una tensione positiva compresa tra + 3 V e + 15 V (+ 8 V nell'esempio in figura).



CARATTERISTICHE FUNZIONALI DEL CIRCUITO INTEGRATO D'INTERFACCIA MAX232

Per pilotare in trasmissione la linea di comunicazione seriale sono necessari dei drivers di linea, per la conversione dei livelli logici TTL forniti dal microcontrollore PIC16F876 in livelli di tensione RS232, mentre per convertire i livelli di tensione RS232 relativi ai dati ricevuti occorre impiegare dei ricevitori di linea in grado di fornire livelli logici TTL al microcontrollore. Entrambi i dispositivi sono disponibili nel circuito integrato Dual in Line MAXIM 232 a 16 pin.



Per quanto concerne i dati da trasmettere (linee d'uscita **T1out** e **T2out**, pin 14 e 7), i 2 drivers di linea (invertenti) contenuti nel circuito

integrato MAX232 convertono i livelli logici TTL relativi ai dati da trasmettere ed applicati agli ingressi **T1in** e **T2in** (pin 11,10) , in livelli logici di linea compatibili con lo standard americano EIA RS232-C (corrispondente allo standard CCITT V.24 al di fuori degli USA) ,ma invertiti rispetto ai livelli logici d'ingresso.

In particolare, quando si applica all'ingresso di un driver (pilota) della linea RS232 il livello logico basso (L, low => zero) (al massimo 0,8 V per livelli TTL), che si indica con il termine *space* derivante dalla terminologia telegrafica, all'uscita si ottiene, con $V_{cc} = +5 V$, una tensione di linea positiva pari a $(2 V_{cc} - 1,5) V = 8,5V$ (tensione massima, a vuoto, associata al livello *space*).

Quando invece si applica all'ingresso di un driver (pilota) della linea RS232 il livello logico alto (H, high => uno) (al massimo 5 V per livelli TTL), che si indica con il termine *mark* derivante dalla terminologia telegrafica, all'uscita si ottiene, con $V_{cc} = +5 V$, una tensione di linea negativa pari a $-(2 V_{cc} - 1,5) V = -8,5V$ (8,5 V è il massimo valore assoluto, a vuoto, della tensione associata al livello *mark*).

Si tenga presente, in proposito, che lo standard RS232 accetta livelli di tensione **space (0)** compresi tra + 3V e + 15 V e livelli di tensione **mark (1)** compresi tra - 3V e - 15V (le tensioni comprese tra - 3 V e +3 V rappresentano una regione di transizione e non sono riconosciute come segnali validi). Pertanto i drivers, avendo uscite attive al livello basso, in quanto agli 1 (mark) corrispondono tensioni negative ed agli 0 (space) tensioni positive, funzionano in base alla convenzione logica negativa.

Analogamente funzionano in base alla convenzione logica negativa i dispositivi receivers (ricevitori di linea), che convertono le tensioni di linea relative ai dati ricevuti ed applicate agli ingressi **R1in** ed **R2in** (pin 13,8) in livelli TTL disponibili alle uscite **R1out** ed **R2out** (pin 12,9).

Per quanto concerne invece i **segnali di controllo (di handshake)** dell'interfaccia **RS232**, (**DTR,DSR,RTS,CTS,DCD**, viene adottata la convenzione logica positiva, in base alla quale una tensione compresa tra + 3 V e + 15 V è associata allo stato 1 (attivo) ed una tensione negativa compresa tra - 3V e - 15 V è associata allo stato 0 (non attivo).

Il circuito integrato MAX232 presenta,rispetto ad altri dispositivi analoghi, il notevole vantaggio di richiedere un'unica tensione di alimentazione (+5V), che viene utilizzata per generare all'interno del

circuito integrato le tensioni $V_+ = +10V$ e $V_- = -10V$.

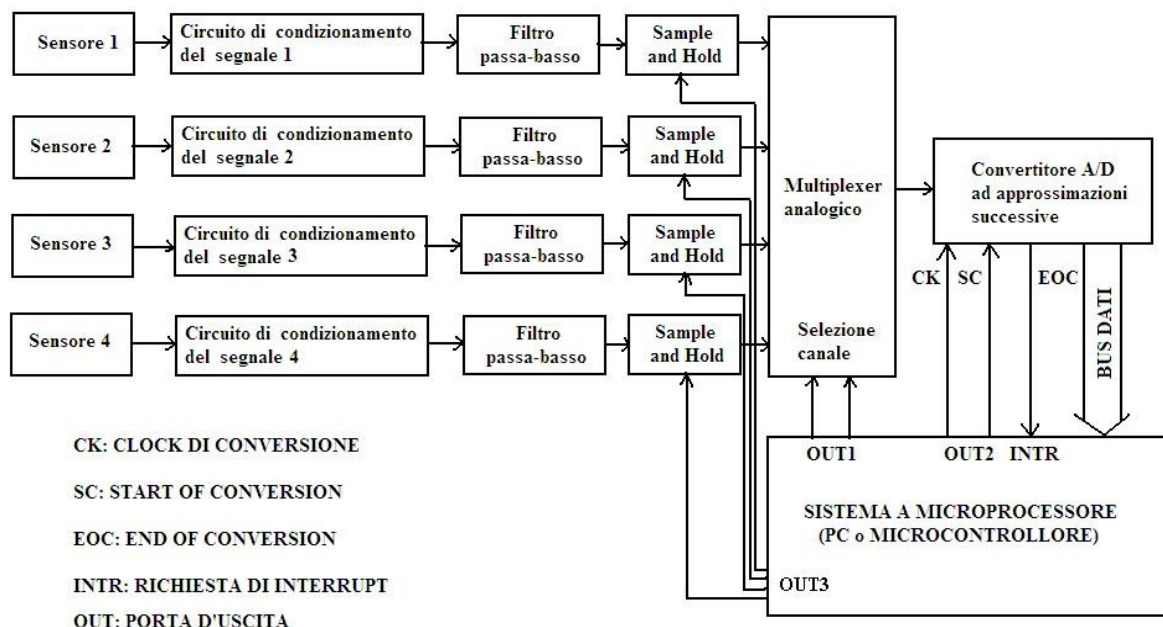
Per generarle si utilizza il principio della “pompa di carica”, che consiste nel caricare periodicamente a 5V e con polarità opportune, attraverso interruttori elettronici realizzati con transistor MOSFET e pilotati da un oscillatore, i condensatori C1, C2, C3 e C4, che fungono da serbatoi di energia elettrostatica per l'alimentazione del circuito integrato.

Il circuito a “pompa di carica” provvede a caricare periodicamente a 5 V due condensatori ed a collegarli in serie per ottenere tensioni doppie con polarità contrarie (+ 10 V e - 10 V). Successivamente le coppie di condensatori in serie si scaricano erogando corrente al carico, per ricaricarsi ciclicamente a + 5V. La frequenza dei cicli di carica-scarica ha un valore tanto maggiore quanto maggiore è l'intensità di corrente richiesta dal carico.

RICHIAMI DI CONTENUTI FONDAMENTALI

STRUTTURA DI UN SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI

SCHEMA A BLOCCHI DI UN SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI A 4 CANALI



Un sistema di acquisizione dati (DAS , Data Acquisition System) è un sistema a microprocessore dedicato all' acquisizione, digitalizzazione, memorizzazione e visualizzazione dei segnali analogici forniti da uno o più sensori di grandezze fisiche (temperatura, pressione, forza, intensità di corrente, umidità relativa, ecc...).

I sensori svolgono la funzione di trasdurre una generica grandezza fisica A in un segnale elettrico (tensione o corrente), e possono essere considerati come generatori ideali di corrente ($I = k_i A$) o di tensione ($V = k_v A$), controllati dalla grandezza fisica da acquisire.

Un sistema di acquisizione dati si definisce monocanale se è dotato di un unico sensore di una data grandezza fisica, multicanale se è dotato di due o più sensori della stessa grandezza fisica o di grandezze fisiche diverse.

Per esempio, una stazione meteorologica è un particolare sistema di acquisizione dati multicanale, dotato di più sensori, ciascuno dedicato alla misura di una data grandezza meteo (temperatura, pressione barometrica, umidità relativa, livello di precipitazione piovosa in mm, velocità e direzione del vento).

La figura mostra lo schema a blocchi di un particolare sistema di acquisizione dati a 4 canali costituito dai seguenti blocchi:

- a) N. 4 [sensori](#);
- b) N. 4 [circuiti di condizionamento](#);
- c) N. 4 [filtri passa-basso](#);
- d) N. 4 [sample and hold](#);
- e) N. 1 [multiplexer analogico](#) ;
- f) N. 1 [convertitore A/D con uscita seriale su bus IIC](#);

Un sistema di acquisizione dati può essere realizzato in vari modi, in funzione delle particolari specifiche progettuali, che dipendono dal tipo di grandezze fisiche da acquisire e dall'ambito applicativo (abitazioni, industrie, aziende sanitarie, sistemi di controllo ambientale e di protezione civile e del territorio, aziende di servizi del terziario avanzato, enti di ricerca,) nel quale il sistema è destinato ad operare.

Esempi:

- In ambito domestico tutti i sistemi di sicurezza (antifurto, antigas, antiallagamento, antincendio) sono particolari sistemi di acquisizione dati progettati per svolgere una o più funzioni (sistemi di sicurezza integrati) tra quelle citate. In questi casi il sistema è costituito da un insieme di sensori di vario tipo (contatti magnetici, sensori all'infrarosso passivo,

sensori di gas, sensori di fumo, sensori antincendio) e da alcuni dispositivi attuatori di allarme (sirene, combinatori telefonici, elettrovalvole di chiusura del gas o dell'acqua) collegati ad una centralina gestita da un microcontrollore, cioè da un microcomputer single-chip (CPU + EEPROM + RAM + PORTE di I/O);

-Nell'ambito dei sistemi di protezione civile e del territorio si utilizzano reti nazionali di monitoraggio sismico , di monitoraggio dell' inquinamento ambientale (chimico ed elettromagnetico), di monitoraggio idrografico (cioè del livello delle acque marine, dei fiumi e dei laghi) e stazioni meteorologiche collegate alla rete meteorologica globale utilizzata per le previsioni del tempo. In questi casi si tratta di reti locali, regionali e geografiche di acquisizione dati, gestite da computer di grande capacità di elaborazione o da supercomputer, come nel caso della rete meteorologica mondiale del WMO (World Meteorological Organization, con sede centrale a Ginevra);

- In ambito sanitario tutti i sistemi di diagnostica per immagini (TAC - Tomografia Assiale Computerizzata, NMR - Risonanza Magnetica Nucleare, PET- Tomografia ad emissione di positroni, ecografia) e di monitoraggio in tempo reale dei parametri clinici dei pazienti nei vari reparti clinici e chirurgici, sono gestiti da computer dedicati, cioè da workstation di media e grande capacità comprendenti speciali schede di cattura di immagini attraverso sensori CCD e di acquisizione di parametri clinici (temperatura corporea, pressione arteriosa, frequenza cardiaca, elettrocardiogramma, elettroencefalogramma) e biologici (tasso glicemico, concentrazione di ossigeno e di anidride carbonica nel sangue, trigliceridi, colesterolo, ecc...);

- In ambito industriale citiamo tutti i sistemi di acquisizione delle varie grandezze fisiche (forza, coppia, pressione, posizione lineare ed angolare, velocità, accelerazione, temperatura, concentrazione di gas) da sottoporre a monitoraggio in tempo reale in un processo produttivo.

In questi casi tutte le grandezze fisiche trasdotte in segnali elettrici dai sensori del sistema industriale (impianto siderurgico, centrale elettrica, acquedotto, oleodotto, sistema di trasporto dell'energia elettrica o del gas metano, raffineria) sono acquisite ed elaborate da uno o più calcolatori di processo di grande potenza.

-In particolare citiamo, su piccola scala, i sistemi di acquisizione dati e controllo che servono a garantire il regolare funzionamento di una

macchina utensile, di un'auto, di un robot, di un climatizzatore, di una lavatrice, di una fotocopiatrice, di una stampante. In questi casi tutti i sensori che trasducono le grandezze fisiche in segnali elettrici ed i dispositivi di controllo (attuatori) che consentono modificare le grandezze fisiche in modo tale da far funzionare regolarmente il sistema, sono gestiti da una centralina basata, a seconda della complessità del sistema, su un microcontrollore (per es. nelle lavatrici, nei climatizzatori e nelle stampanti) o su un computer costituito da una scheda madre con microprocessore di potenza adeguata e relative schede di interfaccia (es. centralina di controllo di un'auto).

SENSORI

In un sistema di acquisizione dati i sensori costituiscono le interfacce fisiche tra i dispositivi di elaborazione dei segnali elettrici acquisiti e le corrispondenti grandezze fisiche da monitorare in funzione del tempo. Un sensore è un dispositivo avente la funzione di fornire un segnale elettrico, sotto forma di tensione o di corrente, di valore teoricamente proporzionale a quello della grandezza fisica che si desidera acquisire. Per ottenere un segnale elettrico di valore linearmente dipendente da una qualsiasi grandezza fisica (temperatura, pressione, forza, flusso luminoso, ecc.), si utilizza un dispositivo, il sensore, il cui funzionamento si basa sulla variabilità di una grandezza fisica elettrica, per esempio resistenza, capacità o induttanza, in funzione della grandezza fisica da misurare.

Per esempio, sfruttando la variabilità della resistenza elettrica dei metalli e dei semiconduttori al variare della temperatura, si realizzano dei particolari sensori di temperatura, le termoresistenze al platino, che consentono, previa taratura, di dedurre la temperatura in funzione della resistenza misurata.

Analogamente, sfruttando la variabilità della resistenza in funzione degli sforzi meccanici di trazione o di compressione, si realizzano gli estensimetri, utilizzati per misurare forze, pesi e pressioni.

Si definisce caratteristica di trasferimento la curva che rappresenta l'andamento del segnale elettrico generato dal sensore in funzione della grandezza fisica che si considera.

In pratica accade molto raramente che tale caratteristica corrisponda, anche approssimativamente, alla legge di proporzionalità diretta $V = k G$, oppure

$I = k G$, dove V e I rappresentano rispettivamente la tensione o la corrente fornita dal sensore, k è una costante di taratura e G è la grandezza fisica da acquisire.

Generalmente la caratteristica di trasferimento si allontana in modo più o meno pronunciato dal modello ideale, a causa di alcuni errori, quali l'errore di offset e l'errore di linearità.

L'errore di offset consiste nel fatto che il segnale elettrico fornito è diverso da zero anche quando la grandezza fisica ha valore nullo.

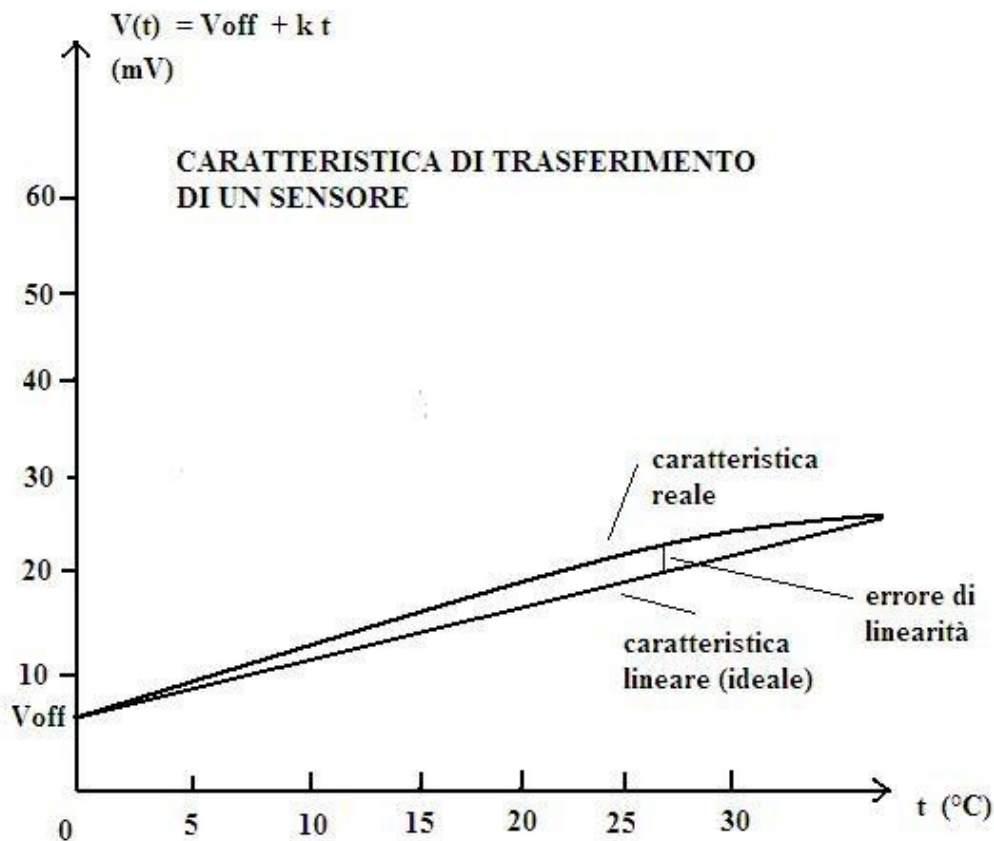
Per esempio, un estensimetro può fornire una tensione diversa da zero, anche quando non venga sottoposto a forze.

In tal caso, supponendo che la caratteristica sia lineare, si ha:

$$V = V_{\text{off}} + K F,$$

dove V_{off} è la tensione di offset, K è la costante di taratura ed F è l'intensità della forza. L'errore di linearità si definisce come il massimo scarto, in valore assoluto, nel range nominale di funzionamento del sensore, tra la caratteristica reale e la caratteristica ideale, avendo considerato, in questo caso, come ideale, la caratteristica lineare $V = V_{\text{off}} + K F$, passante per gli estremi di quella reale, cioè per i punti $(F=0, V=V_{\text{off}})$ e $(F=F_{\text{max}}, V=V_{\text{max}})$.

(Con F_{max} e V_{max} indichiamo rispettivamente il valore massimo della grandezza fisica F ed il valore massimo della tensione V nel range nominale).



I sensori, in base al principio di funzionamento, si distinguono in:
 sensori attivi, se forniscono direttamente un segnale elettrico, in tensione o in corrente, in funzione della grandezza fisica
 (per es.: $V = k T$, o $I = k P$);

sensori passivi, se si utilizza la variabilità di una grandezza elettrica, per es. la resistenza, la capacità o l'induttanza, in funzione della grandezza fisica da acquisire, per ottenere una tensione o una corrente dipendenti dal valore della grandezza, mediante l'inserimento del sensore in un circuito di misura.

Per esempio, inserendo una termoresistenza in un circuito a ponte di Wheatstone si ottiene una tensione di squilibrio del ponte, dipendente dalla temperatura.

In base al principio fisico utilizzato i sensori si distinguono in:

1) Resistivi, se si basano sulla variabilità della resistenza elettrica in funzione degli sforzi meccanici (piezoresistivi), o della temperatura (termoresistivi), o del campo magnetico (magnetoresistivi), o dell'intensità di illuminamento (fotoresistivi);

- 2) Piezoelettrici, se si basano sul campo elettrico generato nei cristalli piezoelettrici (per es. il quarzo) da sforzi meccanici di trazione, compressione o taglio;
- 3) Termoelettrici, se si basano sulle forze elettromotrici termoelettriche generate per effetto Seebeck da giunzioni metalliche mantenute a temperature diverse (termocoppie);
- 4) Fotovoltaici, se si basano sulle forze elettromotrici generate per effetto fotovoltaico da una giunzione semiconduttrice PN, colpita da radiazioni infrarosse, visibili, ultraviolette, X, γ o da particelle cariche;
- 5) Fotoelettrici, se si basano sulla fotocorrente che si ottiene, per effetto fotoelettrico, nelle celle fotoelettriche a vuoto (fotodiodi a vuoto), nei fotodiodi semiconduttori e nei fototransistor;
- 6) Ad effetto Hall, se si basano sulle forze elettromotrici generate in particolari materiali, generalmente semiconduttori, percorsi da corrente e sottoposti a campi magnetici;
- 7) Capacitivi, se si basano sulla variabilità della capacità elettrica di un condensatore in funzione dell'umidità (igrometri) o della costante dielettrica dell'isolante posto tra le armature (sensori di livello).
- 8) Induttivi, se si basano sulla variabilità dell'induttanza di un avvolgimento dotato di un nucleo ferromagnetico estraibile (sensori di posizione-spostamento);
- 9) Elettromagnetici, se si basano sulla legge dell'induzione elettromagnetica (di Faraday - Neumann - Lenz) (sensori di posizione-spostamento, di prossimità);
- 10) A riluttanza variabile, se si basano sulla variabilità della riluttanza di un circuito magnetico dotato di parti mobili (sensori di posizione-spostamento, di prossimità);
- 11) Potenzimetrici, se si basano sulla variabilità della tensione fornita da

un partitore potenziometrico regolabile (reostato o potenziometro) in funzione dello spostamento del cursore (sensori di posizione-spostamento);

12) Piezoacustici e ultrasonici, se si basano sulle forze elettromotrici piezoelettriche generate da particolari materiali ceramici sottoposti ad onde meccaniche (sensori di distanza);

13) Elettrochimici, se si basano sui potenziali elettrochimici generati da celle elettrolitiche speciali, costituite da coppie di elettrodi sensibili a determinati ioni o radicali chimici (sensori di ioni), oppure sulla variabilità della conducibilità di particolari materiali in presenza di gas o vapori (sensori di gas e di vapori);

14) Biologici, se si basano sulle forze elettromotrici generate da celle elettrolitiche speciali in presenza di enzimi o di altre biomolecole (sensori per analisi cliniche).

CIRCUITI DI CONDIZIONAMENTO

I circuiti di condizionamento, uno per ciascun sensore, svolgono la funzione di adattare i valori di tensione o di corrente forniti dai vari sensori al fondo scala del convertitore analogico/digitale, che fornisce per ciascuna grandezza acquisita un codice binario (a 8, 12, 16, o 32 bit) che la rappresenta in forma digitale, consentendone l'elaborazione, la memorizzazione e la visualizzazione mediante un display a LED o un monitor (con tubo a raggi catodici, a cristalli liquidi o al plasma).

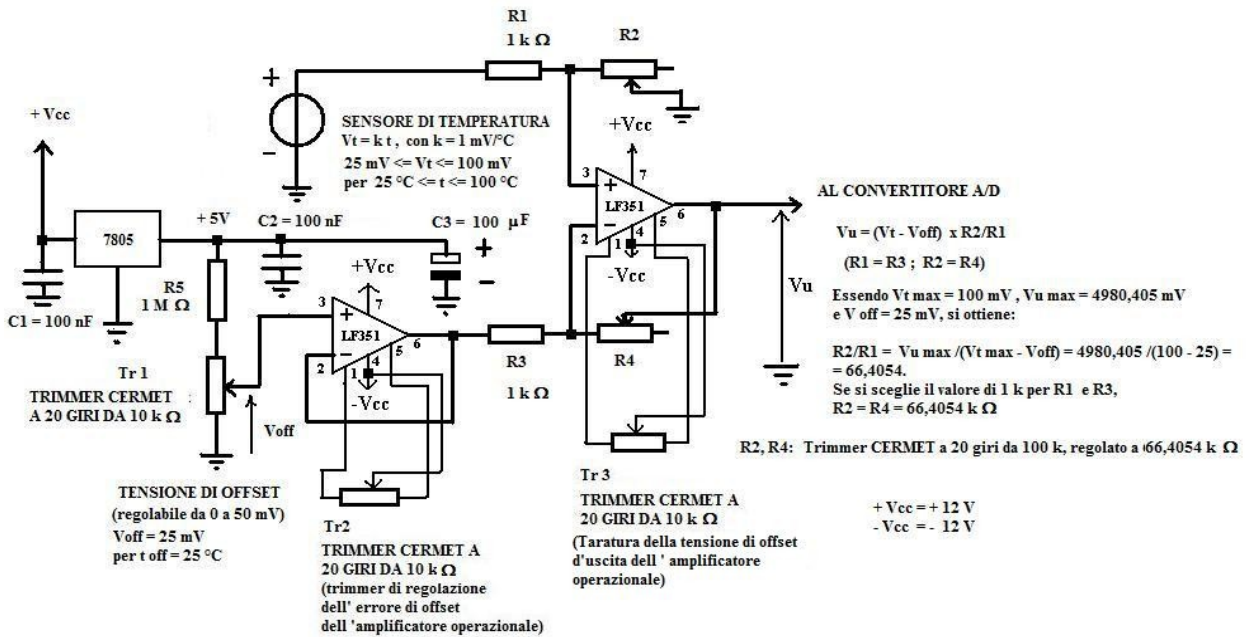
La necessità dei circuiti di condizionamento si spiega considerando che convertitori A/D (a 8, 12, 16 o 32 bit) accettano una tensione massima d'ingresso (tensione corrispondente al massimo valore del codice binario d'uscita) di 5 V o 10 V, che generalmente è molto maggiore delle tensioni (dell'ordine dei μV o dei mV) fornite dai vari sensori. Pertanto occorre amplificare opportunamente i segnali dei sensori per adattarli alla tensione d'ingresso di fondo scala dei convertitori A/D, altrimenti, dati i piccolissimi valori delle tensioni fornite dai sensori, verrebbero generati soltanto i primi livelli di tensione (quantizzati) dell'intera scala di livelli disponibili, una volta fissata la tensione stabilizzata di riferimento da fornire al convertitore A/D per farlo funzionare secondo le specifiche rilevabili dai datasheets. Per esempio, se la tensione stabilizzata di riferimento è $V_{\text{rif}} = 5 \text{ V}$ ed il convertitore A/D è a 8 bit, i livelli di tensione disponibili per la quantizzazione e la digitalizzazione del segnale analogico d'ingresso sono $2^8 = 256$ e la risoluzione del convertitore, che è la minima variazione della tensione d'ingresso necessaria per far variare il codice d'uscita di ± 1 bit meno significativo (LSB, Least Significant Bit), è pari a $V_{\text{rif}}/256 = 5/256 = 19,531 \times 10^{-3} \text{ V} = 19,531 \text{ mV}$. Di conseguenza, i livelli di quantizzazione assegnati dal convertitore al segnale analogico d'ingresso sono multipli di 19,531 mV e variano da 19,531 mV (codice binario d'uscita 00000001 = 01H) a $19,531 \times 255 = 4,9804 \text{ V}$ (codice binario di fondo scala, 11111111, FFH). Se si collegasse direttamente all'ingresso analogico del predetto convertitore un sensore, per es. di temperatura ($V = k_v t$), caratterizzato nell'intervallo di temperatura centigrada $25 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ da una costante k_v di $1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, le tensioni fornite varierebbero, al variare della temperatura, da 25 mV a 100 mV, mentre i codici binari d'uscita varierebbero da 00000001 (25 mV è infatti maggiore del primo livello, 19,531 mV, ma minore del secondo livello, $2 \times 19,531 = 39,062 \text{ mV}$) a

00000101 (100 mV è infatti maggiore del quinto livello, $5 \times 19,531 = 97,655$ mV, ma minore del sesto livello, $6 \times 19,531 = 117,186$ mV). Verrebbero pertanto utilizzati soltanto 5 dei 256 livelli di tensione del convertitore, con un pessimo impiego dello stesso. Se invece il segnale di 100 mV (massimo) fornito dal sensore fosse amplificato di $(255 \times 19,531) \text{ mV} / 100 \text{ mV} = 49,80$ volte, inserendo tra il sensore ed il convertitore A/D un opportuno circuito di condizionamento (amplificatore con guadagno 49,80), con una temperatura di 100°C verrebbe applicata al convertitore A/D una tensione massima di $49,80 \times 100 = 4980 \text{ mV} = 4,98 \text{ V}$, corrispondente al massimo codice binario (1111111 = FFH). Se si utilizzano sensori con uscita in corrente $I = k_i A$, bisogna impiegare come circuito di condizionamento un convertitore corrente/tensione (I/V), in grado di convertire la corrente fornita dal sensore in una tensione ad essa proporzionale. Per esempio, se si impiegasse un sensore di temperatura con uscita in corrente (generatore di corrente controllato dalla temperatura, tipo AD590) $I = k_i T$, con $273^\circ\text{K} \leq T \leq 373^\circ\text{K}$ e $k_i = 1 \mu\text{A}/^\circ\text{K}$, nell'intervallo $0^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}$, corrispondente a temperature in gradi Kelvin ($T = t + 273$) variabili da 273°K a 373°K , si otterrebbe una corrente variabile da $273 \mu\text{A}$ a $373 \mu\text{A}$. Utilizzando lo stesso convertitore a 8 bit dell'esempio precedente ed inserendo un semplice convertitore corrente/tensione costituito da un amplificatore operazionale avente nel circuito di reazione negativa un resistore da $4,98/373 \times 10^{-6} = 13,351 \text{ k}\Omega$, la tensione applicata al convertitore varierebbe da $273 \times 10^{-6} \times 13,351 \times 10^3 = 3,64 \text{ V}$ (codice d'uscita = $3,64/0,019531 = 186,37 \Rightarrow 186 = \text{BAH} = 10111010$) a $373 \times 10^{-6} \times 13,351 \times 10^3 = 4,98 \text{ V}$ (codice d'uscita FFH = 1111111).

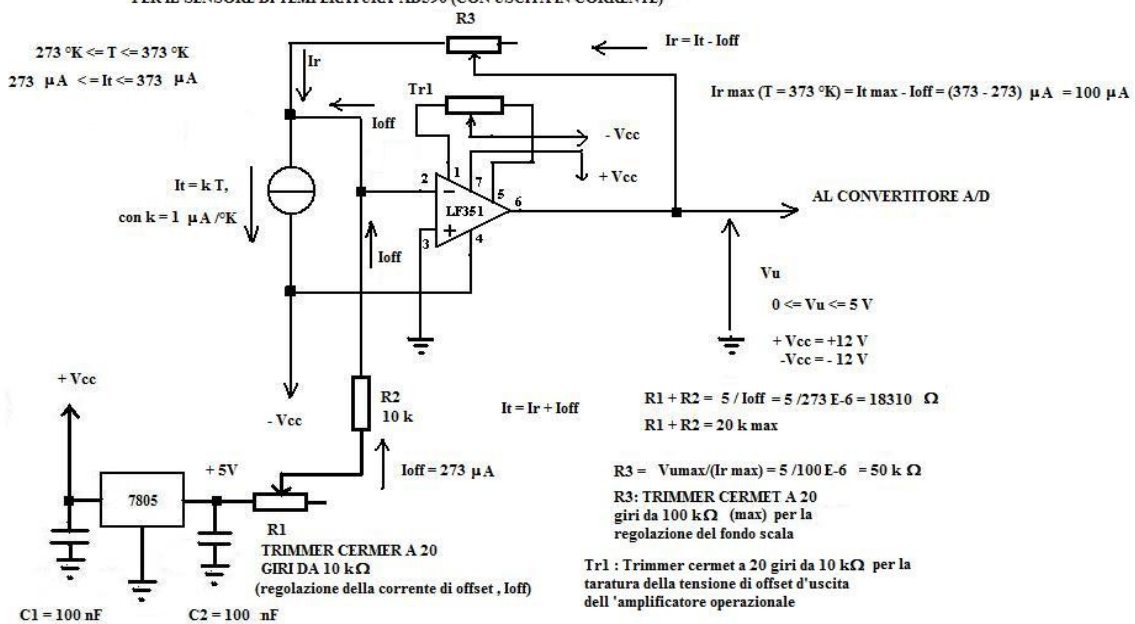
Se si considera, d'altra parte, che in entrambi gli esempi non vengono sfruttati tutti i 256 livelli di tensione disponibili, da 19,531 mV a $255 \times 19,531 \text{ mV} = 4980 \text{ mV} = 4,98 \text{ V}$, è evidente l'esigenza di perfezionare il circuito di condizionamento in modo tale da detrarre il cosiddetto offset del sensore, corrispondente alla tensione minima (25 mV) o alla corrente minima ($273 \mu\text{A}$), relative al particolare intervallo di temperatura considerato (da 25°C a 100°C nel caso del sensore con uscita in tensione e da 0°C a 100°C nel caso del sensore con uscita in corrente). In tal modo si otterrebbe il minimo codice d'uscita 00H = 00000000 in corrispondenza della temperatura minima (rispettivamente 25°C e 0°C) ed il massimo codice d'uscita (FFH = 11111111) in corrispondenza della temperatura massima (100°C in entrambi gli esempi), in relazione all'intervallo di

temperatura prestabilito a seconda delle esigenze progettuali.

CIRCUITO DI CONDIZIONAMENTO PER UN SENSORE DI TEMPERATURA CON USCITA IN TENSIONE



CIRCUITO DI CONDIZIONAMENTO (CONVERTITORE CORRENTE/TENSIONE CON ELIMINAZIONE DELL'OFFSET) PER IL SENSORE DI TEMPERATURA AD590 (CON USCITA IN CORRENTE)

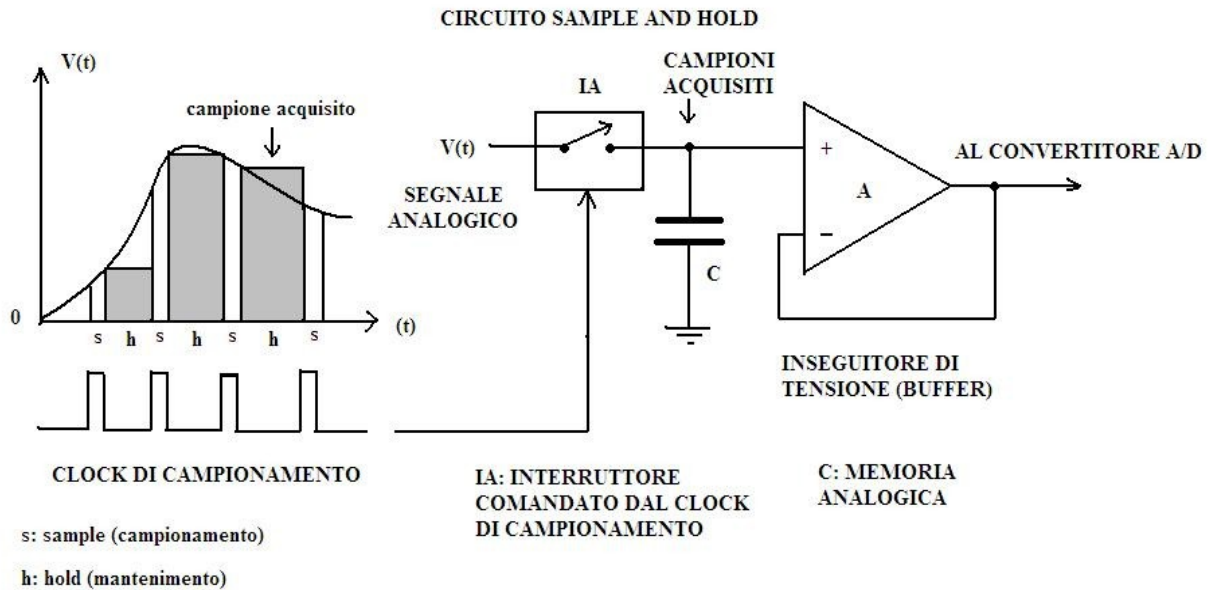


FILTRI PASSA-BASSO ANTI-ALIASING

I filtri passa-basso, uno per ciascun canale, sono detti anche filtri anti-aliasing, in quanto la loro funzione è quella di limitare al valore f_{\max} lo spettro del segnale da campionare, rispettando il teorema di Shannon, che impone, al fine di non perdere informazione, di scegliere una frequenza di campionamento f_c almeno doppia della massima frequenza f_{\max} , facendo passare senza attenuazione tutti i segnali con frequenza minore della frequenza di taglio a - 3dB, $f_T = f_{\max}$, ed attenuando in misura crescente (almeno in ragione di 60 dB/decade) tutti i segnali con frequenza maggiore di f_T .

Esempio: Qualora sia necessario acquisire segnali elettrocardiografici, la cui massima frequenza è intorno a 2,5 Hz (considerando una frequenza cardiaca massima di 150 battiti al minuto = $150/60 = 2,5$ Hz), è necessario che la frequenza di taglio del filtro passa-basso sia intorno ai 10 Hz, in modo tale da attenuare fortemente tutti i disturbi a frequenza di rete (50 Hz) che inquinano il debole segnale utile (intorno a qualche mV). Viene in tal modo eliminata la maggior parte delle frequenze estranee (*alias*) allo spettro del segnale da acquisire, da cui il nome di filtro anti-aliasing.

CIRCUITO SAMPLE AND HOLD



I circuiti sample-and-hold (di campionamento e mantenimento), uno per ciascun canale, svolgono la funzione di campionare il segnale chiudendo un interruttore analogico collegato ad un condensatore (che funge da memoria analogica) per un tempo molto breve rispetto al tempo T_{conv} che il convertitore impiega per fornire il codice di conversione (il tempo di conversione T_{conv} varia da qualche ns a qualche μs a seconda del tipo di convertitore impiegato e della rapidità di variazione dei segnali da acquisire.) Dopo il campionamento del segnale, effettuato con una frequenza, fornita dal sistema a microprocessore (vedi schema a blocchi, porta d'uscita OUT3), pari almeno al doppio della massima frequenza presente nello spettro del segnale da acquisire (Teorema di Shannon), il condensatore del circuito sample-and-hold rimane carico ad una tensione pari a quella del campione di tensione acquisito, consentendo al convertitore A/D di funzionare regolarmente, in quanto viene applicato al suo ingresso analogico un segnale costante per tutto il tempo di conversione.

L'impiego del circuito sample-and-hold si richiede soltanto per l'acquisizione di segnali rapidamente variabili durante il tempo di conversione (per esempio, segnali vocali e segnali video).

Il circuito sample-and-hold non è pertanto necessario qualora si debbano acquisire segnali forniti da sensori di grandezze fisiche lentamente

variabili durante il tempo di conversione (temperatura, pressione, ecc..), in quanto il segnale lentamente variabile si considera costante, in prima approssimazione, durante il tempo di conversione.

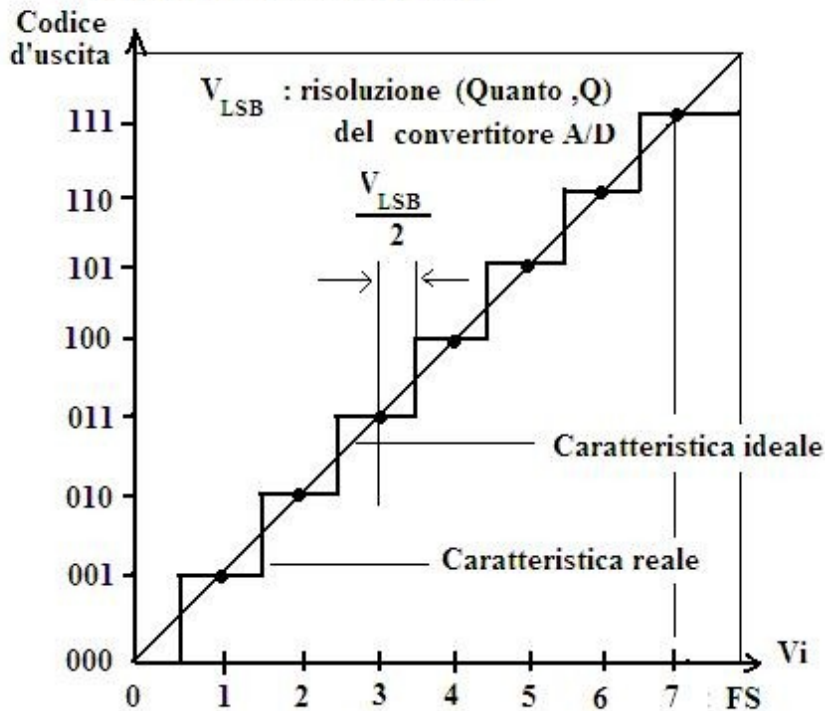
MULTIPLEXER ANALOGICO

Il multiplexer analogico è costituito da tanti interruttori analogici quanti sono i canali da acquisire. Ciascun interruttore viene chiuso durante il tempo di conversione mediante un impulso rettangolare fornito da un decoder interno, le cui linee d'indirizzo vengono pilotate sequenzialmente e ciclicamente dal software del sistema. Nel sistema in figura le due linee d'indirizzo del multiplexer analogico a 4 canali vengono pilotate dalla porta d'uscita OUT1 del sistema a microprocessore.

CONVERTITORE A/D CON USCITA SERIALE SU BUS IIC

Il convertitore A/D, che riceve sequenzialmente e ciclicamente i campioni dei segnali da acquisire dall'uscita del multiplexer analogico, è del tipo ad approssimazioni successive. Il clock di conversione CK e l'impulso SC di Start of Conversion vengono forniti dalla porta OUT2 del sistema a microprocessore, mentre la linea EOC di End of Conversion è collegata ad un ingresso di interrupt mascherabile del sistema a microprocessore. L'uscita digitale del convertitore è collegata al BUS DATI del sistema a microprocessore.

CARATTERISTICA DI TRASFERIMENTO DI UN CONVERTITORE A/D A 3 bit



Segnale analogico espresso in $V_{\text{LSB}} = \text{Tensione di fondo scala}/2^n = \text{FS}/2^n$
(n = 3 bit)

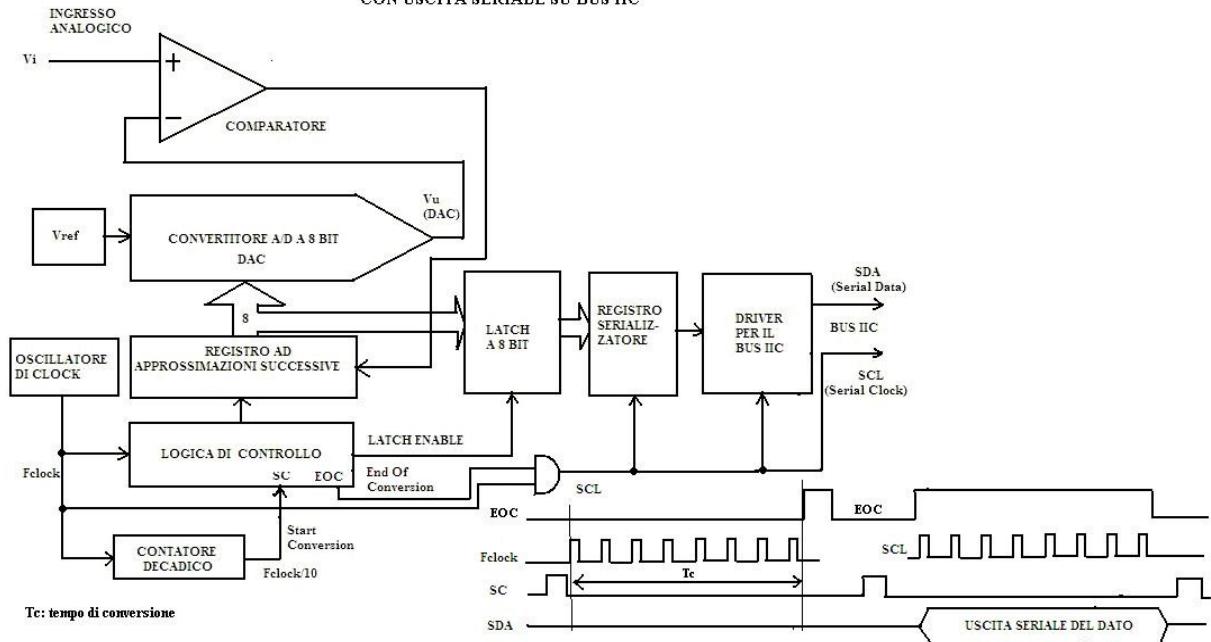
$$\text{Errore di quantizzazione} : \pm \frac{V_{\text{LSB}}}{2} = \pm \frac{Q}{2}$$

La figura mostra la caratteristica di trasferimento di un convertitore A/D, che al fine di semplificare la spiegazione si suppone abbia una risoluzione di 3 bit, corrispondente a 8 livelli quantizzati.

In ascissa si pongono i valori del segnale analogico (tensione) d'ingresso, da 0 a 7 volte il valore della risoluzione del convertitore (quanto Q), V_{LSB} , pari alla tensione di fondo scala divisa per il numero (8) dei livelli di tensione con i quali il segnale viene quantizzato, mentre in ordinata si riportano i codici a 3 bit corrispondenti ai livelli di tensione numerati da 0 (000) a 7 (111).

La retta a 45° passante per i punti medi di ciascun intervallo di ampiezza V_{LSB} rappresenta la caratteristica di un convertitore ideale con un numero di bit così grande da ridurre a valori piccolissimi l'ampiezza V_{LSB} degli intervalli di quantizzazione. L'errore intrinseco di quantizzazione è pari a $\pm V_{\text{LSB}}/2$.

CONVERTITORE A/D A 8 BIT AD APPROSSIMAZIONI SUCCESSIVE
CON USCITA SERIALE SU BUS IIC



Infatti, se si tiene presente che la risoluzione di un convertitore A/D è la minima variazione che deve subire il segnale analogico d'ingresso per far variare il codice binario d'uscita di +/- 1 bit meno significativo (LSB), si comprende come, prendendo come tensione di riferimento V_i quella corrispondente al punto medio di uno qualsiasi dei segmenti orizzontali di ampiezza pari al quanto $Q = V_{LSB}$, sia necessaria una variazione in più o in meno di $Q/2 = V_{LSB}/2$ per far variare di 1 bit il codice d'uscita: per esempio, se $V_i = 5Q$ (codice d'uscita 101), bisogna aumentare o diminuire V_i di $Q/2$ per ottenere, rispettivamente, il codice d'uscita 110 o 100.

FUNZIONAMENTO DEL CONVERTITORE A/D CON USCITA SERIALE SUL BUS IIC

Supponendo che il convertitore A/D sia a 8 bit e faccia parte del chip di un sensore “intelligente” con uscita seriale su bus IIC (in questo caso si richiede un funzionamento continuo, *(free running)* ed indipendente dalla temporizzazione del sistema a microprocessore) e che l'impulso SC (Start of Conversion) di avvio conversione venga ottenuto dividendo per 10 (con un contatore) la frequenza del clock di conversione (fornito da un oscillatore), la conversione del segnale analogico V_i viene effettuata secondo quanto segue:

1) All'arrivo dell'impulso di Start Conversion e del primo impulso di clock la logica di controllo del chip pone a 1 il bit più significativo (ottavo bit, MSB - Most Significant Bit) del registro ad approssimazioni successive (SAR o RAS), collegato all'ingresso di un convertitore D/A (digitale-analogico) la cui uscita, se si suppone che il convertitore sia a 8 bit, presenta al comparatore una tensione pari alla metà del valore di fondo scala ($FS = V_{ref}/256$). Per esempio, se $V_{ref} = +5V$, la tensione applicata all'ingresso non invertente del comparatore è $V_u = V_{DAC} = 128 \times 5 / 256 = 2,5 V$ ($128 \Rightarrow 10000000$).

2) Il comparatore effettua il primo confronto tra V_i e $V_u = V_{DAC}$. Se V_i è maggiore di $V_u = 2,5 V$, viene fornito al registro RAS il livello logico alto, che conferma il valore 1 inizialmente assegnato a MSB. Se invece V_i è minore di $V_u = 2,5 V$, viene fornito al registro RAS il livello logico basso, che resetta il bit 1 inizialmente assegnato a MSB.

3) All'arrivo del secondo impulso di clock a logica di controllo del chip pone a 1 il bit successivo (settimo bit) del registro ad approssimazioni successive (SAR o RAS); pertanto la tensione $V_u = V_{DAC}$ generata dal convertitore D/A nel passo precedente, qualora l'ottavo bit sia stato confermato come 1, è pari a $3,75 V$ ($11000000 \Rightarrow 128 + 64 \Rightarrow 192 \times 5/256 = 3,75 V$); qualora invece l'ottavo bit sia stato resettato, la tensione $V_u = V_{DAC}$ è pari a $1,25 V$ ($01000000 \Rightarrow 64 \times 5/256 = 1,25 V$).

4) Il comparatore effettua il secondo confronto tra V_i e $V_u = V_{DAC}$. Se V_i è maggiore di $V_u = V_{DAC}$, viene fornito al registro RAS il livello logico alto, che conferma il valore 1 inizialmente assegnato al settimo bit. Se invece V_i è minore di $V_u = V_{DAC}$, viene fornito al registro RAS il livello logico basso, che resetta il valore 1 inizialmente assegnato al settimo bit.

5) Il funzionamento procede in modo analogo per effetto dei successivi 6

impulsi di clock fino al completamento della conversione.

Completata la conversione, il codice presente nel registro RAS viene copiato nel latch d'uscita attivando l'uscita di abilitazione LATCH ENABLE.

6) La linea EOC (End Of Conversion), attivata al termine della conversione, abilita l'uscita seriale dei dati, nell'ordine da LSB a MSB, attraverso il registro serializzatore (PISO , Parallel In Serial Output), collegato al driver del BUS IIC. Il clock di trasmissione (SCL - Serial Clock) del codice binario ottenuto si ottiene dalla AND del clock di conversione e del segnale EOC.

7) Il decimo impulso del clock di conversione determina la generazione di un ulteriore impulso di Start Conversion (SC), che dà inizio ad una nuova conversione A/D.