

1 Concetti introduttivi

Nello studio dei processi tecnologici è ricorrente la necessità di acquisire dati relativi a particolari grandezze fisiche con lo scopo di elaborarli e di agire di conseguenza sull'andamento del processo medesimo.

Questo modo di procedere è tipico dei sistemi di controllo.

Un classico esempio è la regolazione di temperatura di un forno che deve rimanere compresa in un determinato intervallo.

Nel caso specifico un possibile modo di procedere è il seguente:

- un trasduttore rileva il valore relativo alla grandezza da controllare (la temperatura);
- il valore rilevato viene trattato in modo tale da essere utilizzato da un sistema di elaborazione come per esempio un personal computer;
- il valore rilevato e adattato viene confrontato dal sistema di elaborazione con i valori di riferimento scelti;
- in relazione al risultato del confronto vengono messi in atto, attraverso dei dispositivi attuatori, gli azionamenti necessari come l'aumento o la diminuzione del volume di combustibile bruciato per ottenere il riscaldamento voluto.

Con termini più appropriati, dall'analisi dell'esempio citato si evidenzia la necessità di:

- *acquisire* dati;
- *elaborare* dati;
- *distribuire* dati.

Nell'ambito di un sistema di controllo si distinguono di conseguenza:

- sistemi di *acquisizione dati*;
- sistemi di *elaborazione dati*;
- sistemi di *distribuzione dati*.

Con il termine **acquisizione dati** si è soliti intendere quella particolare sequenza di operazioni che, attraverso i trasduttori, consente il prelievo dei dati relativi al sistema controllato e l'invio in forma adeguata al sistema di elaborazione.

Con il termine **distribuzione dati** si è soliti intendere quella particolare sequenza di operazioni che, in relazione ai risultati dell'elaborazione, pro-

duce dei segnali di comando che, attraverso gli attuatori, vanno a modificare le caratteristiche del sistema controllato.

In FIGURA 1 viene riportato lo schema a blocchi relativo a un generico sistema di acquisizione e distribuzione dati.

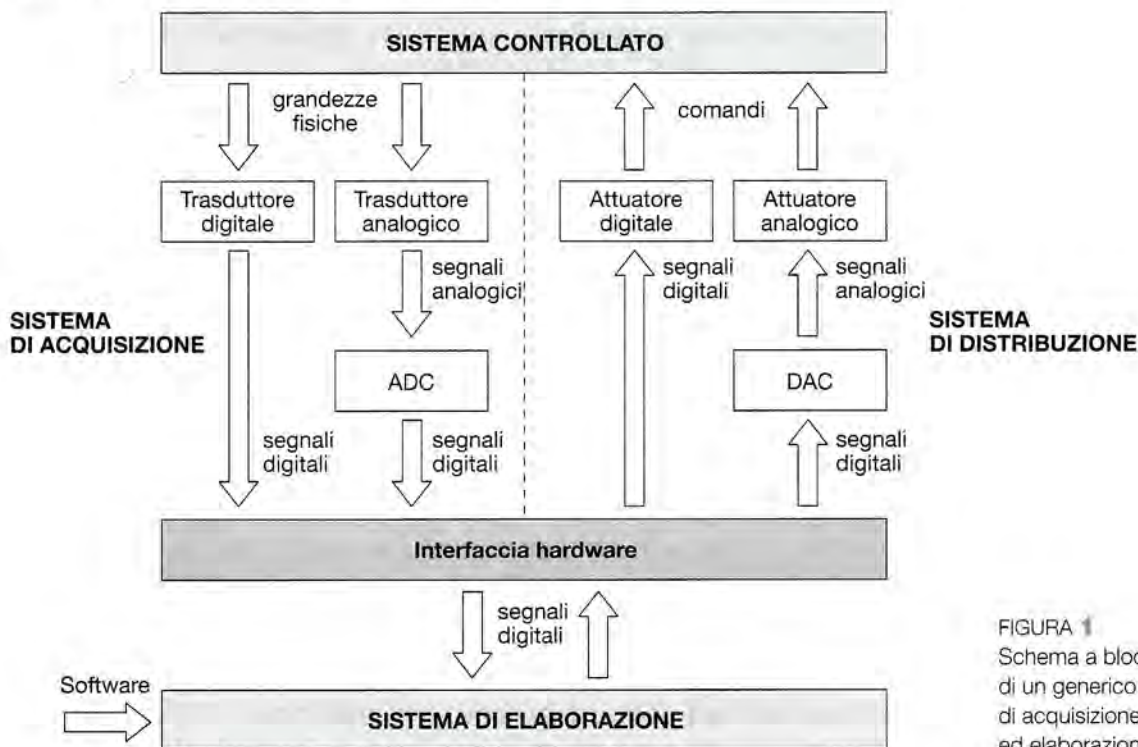


FIGURA 1
Schema a blocchi
di un generico sistema
di acquisizione
ed elaborazione dati.

È evidente la necessità di un'interfaccia hardware per il colloquio dei sistemi di acquisizione e distribuzione con il sistema di elaborazione.

I segnali che rilevano le grandezze fisiche e che comandano gli attuatori sono sia analogici sia digitali.

Il sistema di elaborazione (un controllore programmabile o un personal computer) è in grado di trattare soltanto segnali digitali.

Quando i dati vengono espressi in forma analogica si rendono necessarie delle operazioni di adattamento utilizzando due procedimenti tra loro opposti e rispettivamente denominati:

- conversione analogico/digitale (ADC o A/D);
- conversione digitale/analogica (DAC o D/A).

In un sistema di acquisizione si realizza la conversione analogico-digitale, in un sistema di distribuzione quella digitale-analogica.

Nello schema a blocchi riportato in FIGURA 2 viene evidenziata la collocazione dei sistemi di acquisizione e distribuzione dati nell'ambito di un sistema di controllo ad anello chiuso.



FIGURA 2
Schema a blocchi
di un sistema
di controllo
ad anello chiuso.

2 Acquisizione di segnali analogici

In FIGURA 3 viene riportato lo schema a blocchi relativo a un generico sistema di acquisizione in cui sono evidenziati gli elementi costitutivi essenziali.

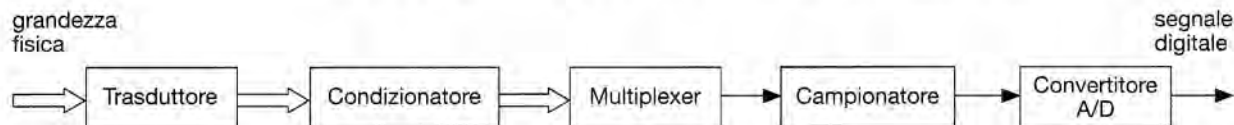


FIGURA 3
Schema a blocchi
di un sistema
di acquisizione dati.

Il sistema descritto è un generico *sistema multicanale* ossia un sistema in grado di acquisire più segnali.

Il **trasduttore** consente il rilevamento della grandezza da controllare e la sua conversione in un segnale elettrico compatibile con l'elaborazione successiva.

Si riassumono brevemente le caratteristiche di tale dispositivo:

- *segnale di ingresso*, in genere una grandezza fisica di tipo analogico e di piccolo valore;
- *segnale di uscita*, grandezza elettrica digitale o analogica rappresentativa dell'ingresso;
- *linearità*, parametro che garantisce la proporzionalità della conversione;
- *sensibilità*, parametro che indica l'ampiezza del segnale minimo rilevabile;
- *errore*, parametro che indica la differenza fra il valore reale e quello misurato.

Per migliorare la *precisione* della misura si possono usare *collegamenti a ponte*, come nel classico caso di misura di una resistenza.

Altri accorgimenti permettono di migliorare la *linearità* e la *sensibilità* della misura.

Il **condizionatore** si rende necessario quando il segnale fornito dal trasduttore non possiede caratteristiche tali da poter essere adeguatamente trattato dai dispositivi che devono elaborare il segnale.

Un *amplificatore ideale* deve presentare una resistenza di ingresso idealmente infinita in modo da non assorbire una corrente che interesserebbe il trasduttore stesso e potrebbe alterare la misura.

Un elemento circuitale di tipo elettronico che si presta particolarmente all'impiego nei sistemi di acquisizione è l'*amplificatore operazionale*. Oltre a possedere una resistenza di ingresso elevatissima esso è in grado, a seconda delle configurazioni adottate, di adempiere ad altre funzioni come per esempio la somma, l'integrazione e la derivazione.

Talvolta all'amplificatore è affidata anche la funzione di *isolamento* del circuito fra ingresso e uscita, ciò in caso di tensioni particolarmente elevate; l'isolamento viene di solito ottenuto con l'impiego di un trasformatore o mediante dispositivi ad *accoppiamento ottico*.

Rientrano tra le operazioni di condizionamento quelle che consentono di modificare le caratteristiche del segnale in modo da eliminare *disturbi* o *componenti parassite*.

I disturbi possono essere provocati da cause esterne tra le quali si citano le *interferenze elettrostatiche* o *magnetiche* e lo *scintillio* dovuto a rimbalzi di contatti o a brusche e improvvise variazioni di tensione.

I disturbi di questo tipo possono essere ridotti con appositi *schermi*.

Nel caso di cavi occorre proteggersi dalle influenze esterne mediante l'utilizzo di una guaina metallica che circonda il conduttore, costituita da fili intrecciati e collegati a massa.

Talvolta i segnali indesiderati sono invece presenti nella stessa grandezza da esaminare; si pensi per esempio alle *armoniche secondarie*, onde di frequenza multipla della fondamentale, che compaiono nei sistemi alimentati in alternata.

Per eliminarle occorre procedere a operazioni di *filtraggio* del segnale; il filtro da adottare in questi casi è il *filtro passa-basso*, capace di filtrare le componenti ad alta frequenza.

In altri casi può essere invece più indicato l'uso di *filtri passa-alto* come quando occorre filtrare le componenti a bassa frequenza di un segnale come quello della rete elettrica di alimentazione a 50 Hz.

Il **multiplexer** consente di selezionare il segnale che di volta in volta deve essere elaborato.

La sua presenza è necessaria per il fatto che i dispositivi che elaborano il segnale sono in grado di esaminarne soltanto uno per volta; si pensi per esempio di voler osservare la posizione, la velocità e l'accelerazione di un motore.

Il multiplexer, in questo caso analogico, ha il compito di selezionare le informazioni con la cadenza opportuna in modo tale che i segnali elettrici contenenti le informazioni relative alle tre grandezze siano rese disponibili, all'uscita dal multiplexer, su una sola linea.

Per ottenere questo il multiplexer è dotato di appositi ingressi che, opportunamente configurati, consentono la selezione del canale desiderato.

Il multiplexer non è ovviamente necessario quando si deve elaborare un solo segnale.

Il **campionatore** è un dispositivo che consente il prelievo di alcuni valori di un segnale in corrispondenza di determinati istanti dando origine a un segnale discreto.

L'operazione di *campionamento* rappresenta dunque la fase in cui nel segnale originario vengono individuati quei valori che successivamente subiranno la conversione nel formato digitale.

In FIGURA 4 viene riportato un esempio di forma d'onda analogica e del corrispondente segnale campionato.

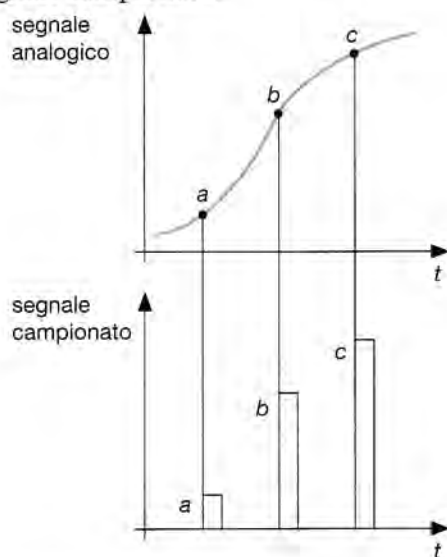


FIGURA 4
Passaggio dal segnale analogico al segnale campionato.

Dal punto di vista matematico il segnale campionato risulta dal prodotto tra il segnale analogico originale e un treno d'impulsi.

Indicando con $x(t)$ il segnale analogico e con $\delta(t - t_i)$ il treno d'impulsi, per il segnale campionato $x_c(t)$ si ottiene la seguente espressione:

$$x_c(t) = \sum_{i=0}^{\infty} x(t_i) \delta(t - t_i)$$

Per esempio per il segnale esponenziale

$$x(t) = e^{-10t}$$

e considerando un treno di impulsi che si susseguono a distanza di 1 s risulta in particolare l'espressione:

$$x_c(t) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{-10i} \delta(t - i)$$

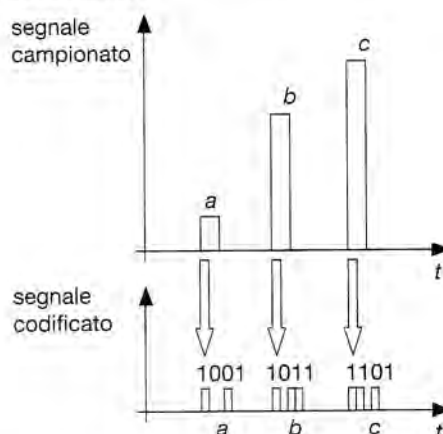
Il dispositivo campionatore assolve anche a una seconda funzione denominata di *mantenimento*, un procedimento che consente di conservare inalterato il valore assunto in quell'istante dal segnale campionato per tutto il tempo necessario per la successiva codifica del segnale.

Il **convertitore D/A** adatta i segnali analogici provenienti dal sistema controllato a quelli caratteristici dei dispositivi tipicamente digitali che li devono elaborare.

Il segnale campionato viene codificato, ossia trasformato, in un segnale digitale; la rappresentazione sarà tanto più precisa quanto maggiore è il numero di bit del valore digitale ottenuto.

In FIGURA 5 viene riportato un esempio di segnale discreto e del corrispondente segnale codificato.

FIGURA 5
Passaggio dal segnale campionato al segnale codificato.



3 Distribuzione di segnali analogici

FIGURA 6
Schema a blocchi di un sistema di distribuzione dati.

segnale digitale



In FIGURA 6 viene riportato lo schema a blocchi relativo a un generico sistema di distribuzione in cui sono evidenziati gli elementi costitutivi essenziali.

Il sistema descritto è un generico *sistema multicanale* ossia un sistema in grado di distribuire più segnali contemporaneamente.

Il **convertitore D/A** converte il segnale digitale proveniente dal sistema di elaborazione in un segnale analogico facendo quindi corrispondere a ogni combinazione di bit un valore di tensione.

La grandezza analogica in uscita non può assumere valori continui ma soltanto un insieme ben determinato di valori di entità proporzionale al numero dei bit d'ingresso.

Il **demultiplexer** invia il segnale analogico sul canale selezionato in relazione alla configurazione assunta da appositi ingressi.

Per ottenere questo il demultiplexer è dotato di appositi ingressi che, opportunamente configurati, consentono la selezione del canale desiderato.

Il **filtro** e l'**amplificatore di potenza** modificano la natura del segnale adattandolo alle caratteristiche dell'attuatore selezionato.

L'**attuatore** è l'elemento che agisce sul sistema modificandone quando richiesto le caratteristiche.

4 Dispositivi per il campionamento e il mantenimento

Le operazioni di campionamento e mantenimento vengono svolte da circuiti elettronici opportunamente predisposti per tale scopo e denominati **moduli S/H** (*Sample/Hold* ovvero *campionamento e mantenimento*).

Il segnale da convertire viene prelevato a intervalli di tempo molto ravvicinati ma sufficienti per completare la successiva codifica.

Il modulo S/H opera in modo tale che ogni *campione* del segnale venga mantenuto in memoria dal medesimo fino all'arrivo di quello successivo.

Il prelevamento del segnale in determinati istanti non deve avvenire casualmente ma in modo tale che non si verifichi una perdita di informazione rispetto al segnale di origine per consentire la sua ricostruzione quando questo viene richiesto.

Tra ogni campione prelevato e convertito deve trascorrere un tempo pari almeno a quello dovuto al fatto che il componente non è ideale ma genera dei ritardi interni.

4.1 Frequenza di campionamento

Per una più accurata ricostruzione del segnale appare evidente che:

- maggiore è il numero di campioni prelevati tanto più fedele è la ricostruzione del segnale originale;
- se il segnale varia velocemente, ed è quindi caratterizzato da alte frequenze, maggiore sarà il numero di campioni che occorrerà prelevare.

A conferma di quanto asserto si osservi la FIGURA 7 in cui viene rappresentato il campionamento di un segnale ottenuto tramite quattro prelievi.

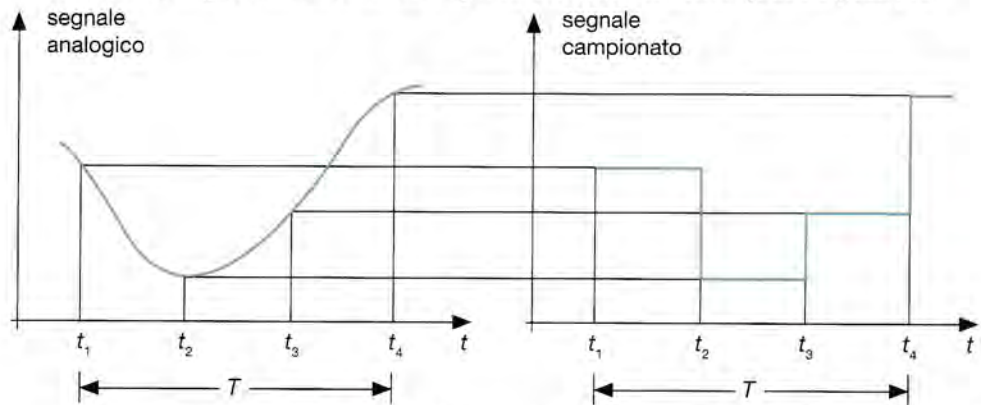


FIGURA 7
Campionamento
ottenuto tramite
quattro prelievi.

Se si osserva la FIGURA 8 in cui viene rappresentato il campionamento del medesimo segnale ottenuto tramite sette prelievi effettuati nello stesso intervallo di tempo si evidenzia il fatto che se il numero di campioni è maggiore la rappresentazione grafica del segnale ottenuto appare più vicina a quella del segnale di ingresso di quanto non lo sia quella precedente.

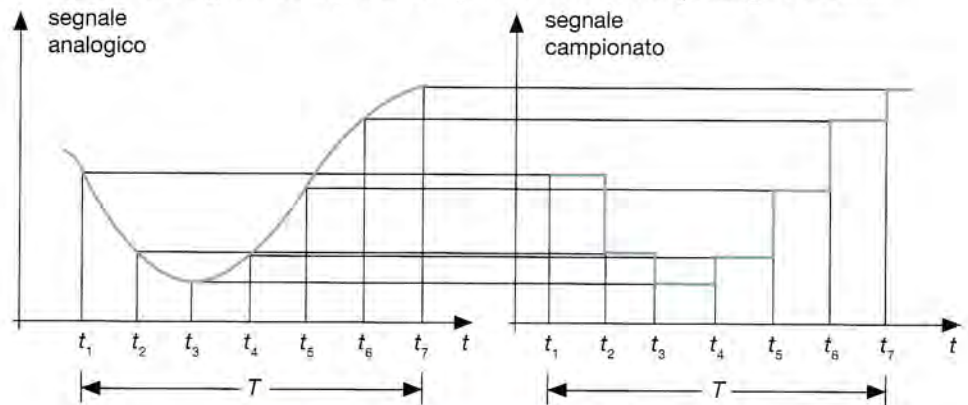


FIGURA 8
Campionamento
ottenuto tramite
sette prelievi.

- Si definisce **periodo di campionamento** l'intervallo di tempo che intercorre fra un istante di prelevamento e quello a esso successivo.

Per garantire un corretto funzionamento del convertitore il valore di ogni campione viene memorizzato per il tempo necessario a effettuare la codifica.

- La **frequenza di campionamento** rappresenta il numero di campioni prelevati in un secondo.

Tra frequenza di campionamento f_c e periodo di campionamento T_c sussiste la seguente relazione di proporzionalità inversa:

$$f_c = \frac{1}{T_c}$$

4.2 Teorema del campionamento

- Il **teorema del campionamento** o **teorema di Shannon** consente di stabilire il numero minimo di valori da prelevare per non perdere l'informazione presente nel segnale analogico originario.

La condizione da osservare viene espressa con la relazione

$$f_c \geq 2f_M$$

in cui f_M rappresenta la componente di frequenza più elevata del segnale in esame.

Per soddisfare la condizione imposta dal teorema di Shannon occorre ricavare il numero minimo di campioni che deve essere prelevato in un determinato intervallo di tempo.

Tale numero minimo N risulta dal numero di campioni al secondo f_c per la durata dell'intervallo t ; si esprime utilizzando la relazione:

$$N = f_c t = 2 f_M t$$

Nel caso di forma d'onda sinusoidale con frequenza f il campionamento deve essere realizzato in modo tale che risulti:

$$f_c \geq 2f$$

In questo caso, se si prende in considerazione il tempo corrispondente al periodo T e si pone

$$f_c = 2f$$

per la condizione di Shannon si ricava:

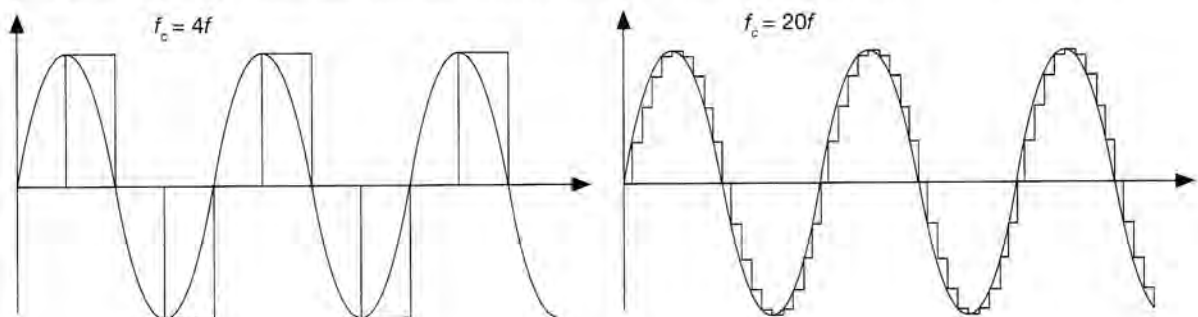
$$N = f_c T = 2fT = 2$$

Per ogni periodo T è quindi sufficiente prelevare 2 campioni.

Se si desidera ottenere una migliore conversione si imposta una frequenza di campionamento più alta.

Un esempio evidente viene riportato in FIGURA 9 in cui un segnale sinusoidale di frequenza f viene campionato con frequenza $4f$ e con frequenza $20f$.

FIGURA 9
Campionamento
di un segnale sinusoidale
a due frequenze differenti.

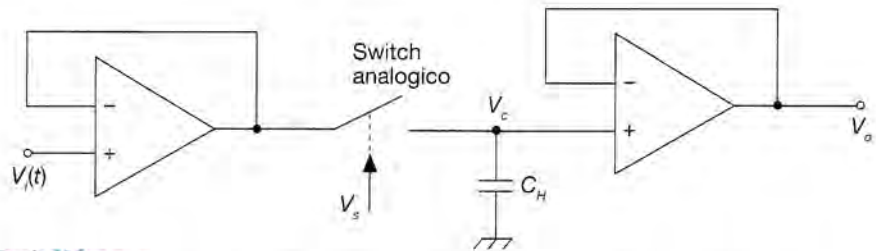


4.2 Caratteristiche dei moduli S/H

Per esaminare le caratteristiche di un *modulo S/H* si consideri lo schema elettrico semplificato riportato in FIGURA 10 in cui si evidenziano i seguenti segnali elettrici coinvolti nel funzionamento del dispositivo:

- $V_i(t)$ è il segnale analogico da convertire;
- V_s è il segnale di controllo (o segnale di campionamento) di tipo digitale applicato all'interruttore;
- V_c è il valore di tensione ai capi del condensatore;
- V_o è il valore di tensione all'uscita del dispositivo.

FIGURA 10
Schema elettrico
semplificato
di un modulo S/H.



Fasi di lavoro

Il circuito lavora in due fasi distinte rispettivamente denominate:

- *fase di campionamento (modo sample);*
- *fase di mantenimento (modo hold).*

Nella *fase di campionamento* l'interruttore analogico è chiuso e il condensatore C_H si carica rapidamente alla tensione d'ingresso; il valore istantaneo d'ingresso di $v(t)$ viene riportato ai capi del condensatore.

Nella *fase di mantenimento* l'interruttore analogico è aperto e i due circuiti risultano separati, il condensatore rimane carico e la tensione in uscita (pari a quella del condensatore) risulta costante assicurando quindi la stabilità richiesta dal processo di conversione.

La posizione dell'interruttore viene determinata dal livello del segnale di controllo che è un'onda quadra in cui il livello logico alto caratterizza il *modo sample*, il livello logico basso il *modo hold*.

Temporizzazione

I tempi caratteristici del controllo vengono denominati:

- *tempo di apertura;*
- *tempo di acquisizione;*
- *tempo di decadimento.*

Il *tempo di apertura* è quello che intercorre tra l'istante in cui viene impartito il comando che provoca l'apertura dell'interruttore e l'effettivo campionamento del segnale.

Il *tempo di acquisizione* è quello che occorre perché la tensione ai capi del condensatore passi dal valore precedente a quello attuale.

Il *tempo di decadimento* indica la capacità di mantenere il valore del campione prelevato.

Elementi costitutivi

I principali componenti interni sono:

- *gli amplificatori operazionali;*
- *l'interruttore elettronico;*
- *il condensatore.*

Gli *amplificatori operazionali* hanno la funzione di migliorare le caratteristiche elettriche del circuito.

Per accelerare la fase di acquisizione è necessario che il condensatore si carichi velocemente e si scarichi lentamente in modo da mantenere il valore acquisito per tutto il tempo necessario.

L'amplificatore operazionale disposto in ingresso consente di ottenere una resistenza estremamente bassa, caratteristica che velocizza la fase di carica.

Per mantenere il valore del campione è opportuno poi che la resistenza accoppiata in uscita al condensatore sia la più alta possibile.

Si ottiene ciò ponendo all'uscita del condensatore stesso un secondo amplificatore operazionale che presenta una resistenza di ingresso teoricamente infinita.

L'**interruttore analogico**, comandato dal segnale di campionamento, permette di prelevare il *campione* nell'istante voluto.

Il circuito elettronico equivalente all'interruttore viene realizzato con un componente elettronico quale è per esempio il *transistor a effetto di campo JFET*; una tensione alta sul *gate* provoca la conduzione fra *drain* e *source*, condizione equivalente alla chiusura di un interruttore.

Il **condensatore**, per un buon funzionamento del circuito, deve contemporaneamente possedere i seguenti requisiti:

- caricarsi velocemente per diminuire il tempo di acquisizione;
- mantenere il valore acquisito per ridurre il tempo di decadimento.

Poiché la costante di tempo di un circuito RC è data dal prodotto tra resistenza e capacità, si comprende che per quanto riguarda la capacità le caratteristiche richieste sono fra loro contraddittorie e pertanto il suo valore deve essere scelto in modo da realizzare un soddisfacente compromesso.

Per tenere sotto controllo il tempo di decadimento è necessario che:

- la corrente di perdita del condensatore sia ridotta (e ciò si ottiene scegliendo un condensatore di buona qualità);
- l'interruttore garantisca un'alta impedenza di isolamento.

Il condensatore può essere già presente all'interno del circuito integrato che realizza il dispositivo S/H o collegato esternamente come componente discreto.

5 Dispositivi per la conversione analogico-digitale

► Un **convertitore analogico-digitale** (in forma abbreviata convertitore A/D, o ancora più sinteticamente ADC) è un dispositivo che converte una grandezza analogica in una grandezza digitale.

È bene precisare che la fase di *conversione* del segnale comprende sia la fase di *campionamento* sia quella di *codifica*.

Tali operazioni possono essere svolte da due differenti dispositivi o da un unico dispositivo.

Prima di essere utilizzato dal *convertitore* il segnale da elaborare deve passare attraverso un circuito di *condizionamento*, che lo renda adatto ai valori di tensione tipici dei dispositivi preposti alla conversione.

La conversione da *analogico* a *digitale* determina una perdita di informazioni.

5.1 Grandezze caratteristiche

Le grandezze caratteristiche di un *convertitore analogico-digitale* sono:

- *ampiezza massima* del segnale da convertire;
- *numero di bit* con cui si realizza la codifica;

- *passo di quantizzazione;*
- *risoluzione;*
- *errore di quantizzazione;*
- *tempo di conversione.*

Ampiezza massima

È l'ampiezza massima della grandezza dopo che ha subito le opportune operazioni di condizionamento.

L'ampiezza massima è quindi predeterminata e dipende dal tipo di convertitore usato.

Numero di bit

Il numero di bit con cui rappresentare il numero binario che risulta dalla conversione dipende dall'*accuratezza* che deve possedere il dispositivo; è evidente che se n è il numero di bit della sequenza binaria, i livelli possibili sono 2^n .

Passo di quantizzazione

La prima operazione da compiere, denominata *quantizzazione dell'intervallo di misura*, è la divisione del campo di valori del segnale d'ingresso in tanti intervalli.

A ciascun valore compreso nell'intervallo di misura della grandezza analogica viene fatta corrispondere una determinata sequenza binaria.

Per comprendere meglio il meccanismo di suddivisione e la corrispondente assegnazione della sequenza binaria si può fare riferimento all'esempio concreto riportato in FIGURA 11.



FIGURA 11
Esempio di conversione analogico-digitale.

La tensione d'ingresso è compresa tra 0 V e 32 V.

Dividendo il campo dei valori del segnale d'ingresso in intervalli di uguale ampiezza è possibile associare a ognuno di essi un codice binario.

Considerando tre bit in uscita il numero di combinazioni di elementi binari individuati da tre bit è otto.

Ogni intervallo ha pertanto in questo caso un'ampiezza pari a 4 V.

La grandezza digitale in uscita può quindi assumere otto livelli distinti detti *livelli di quantizzazione*; la grandezza analogica d'ingresso nell'intervallo compreso tra 0 V e 4 V assume in uscita il valore binario *000*, tra 4 V e 8 V assume il valore *001* e così fino all'intervallo compreso tra 28 V e 32 V al quale corrisponde il valore *111*.

La distanza tra un livello e l'altro viene definita con il termine **passo di quantizzazione** e viene indicata con Q ; in questo caso il *passo di quantizzazione* vale 4 V.

È evidente che se n è il numero di bit della sequenza binaria, i livelli di quantizzazione possibili sono 2^n .

Risoluzione

La *risoluzione* rappresenta la variazione della grandezza di ingresso corrispondente alla minima variazione di valore della sequenza binaria che la rappresenta; la *risoluzione* coincide con l'ampiezza del *passo di quantizzazione*.

Indicando con R la risoluzione e con V_{iM} la tensione massima di ingresso si ottiene:

$$R = \frac{V_{iM}}{2^n}$$

Nell'esempio la risoluzione vale 4 V risultando in effetti uguale all'ampiezza dell'intervallo.

La *risoluzione* può anche essere espressa come l'*ampiezza percentuale di ogni intervallo*; definendo con N il numero degli intervalli risulta:

$$R\% = 100 \frac{1}{N} = 100 \frac{1}{2^n}$$

Nell'esempio considerato si ha una risoluzione percentuale del 12,5%.

Errore di quantizzazione

La conversione comporta inevitabilmente degli *errori di quantizzazione* poiché a ogni intervallo continuo in ingresso corrisponde in uscita una sola sequenza digitale; la conversione sarà tanto più precisa quanto maggiore è la suddivisione in intervalli di una grandezza analogica.

Sempre facendo riferimento al solito esempio si può rilevare che l'*errore massimo* che si commette nella conversione risulta pari al passo di quantizzazione.

Per tutti i valori compresi tra 0 V e 4 V per esempio la grandezza digitale corrispondente è 000; riconvertendo si otterrebbe un valore analogico pari a 0 V e, di conseguenza, si commetterebbe un errore massimo pari a 4 V; il medesimo ragionamento può essere ripetuto per gli altri livelli.

Tempo di conversione

Il *tempo di conversione* è il tempo che occorre all'ADC per convertire il valore della tensione di ingresso in un codice binario.

L'intervallo di tempo che intercorre tra un campione e quello successivo vale al massimo

$$T_c = \frac{1}{2f_M}$$

in cui f_M è la frequenza massima del segnale.

La conversione deve terminare prima dell'arrivo di un nuovo valore; indicando con T_{cn} il tempo di conversione, è necessario quindi che sia soddisfatta la condizione:

$$T_{cn} < T_c$$

Esistono due forme costruttive tipiche di convertitori *ADC* così denominate:

- *convertitori parallelo;*
- *convertitori a retroazione.*

Convertitore parallelo

In un convertitore parallelo tutti i bit del risultato vengono determinati simultaneamente; la conversione risulta molto veloce ma, per ottenere una risoluzione elevata, il circuito diventa complesso.

Gli *ADC paralleli*, detti anche *simultanei* o *flash*, sono convertitori estremamente veloci usati per segnali di ingresso ad alta frequenza.

I tempi di conversione sono sull'ordine delle decine di ns.

Lo schema a blocchi semplificato di un convertitore parallelo viene riportato in FIGURA 12.

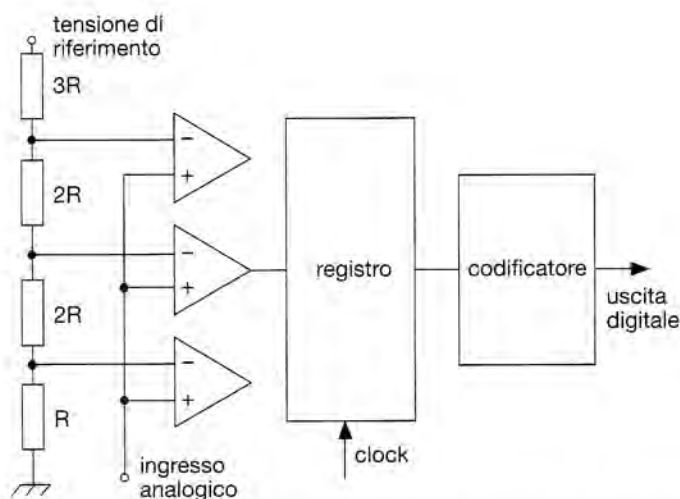


FIGURA 12
Schema a blocchi
semplificato
di un convertitore
parallelo.

I componenti principali dello schema sono i comparatori, in questo caso tre. Mentre all'ingresso non invertente di ogni comparatore viene inviata contemporaneamente la tensione analogica da convertire, all'altro ingresso viene inviata attraverso un partitore di tensione una parte proporzionale della tensione di riferimento.

Poiché l'informazione prodotta all'uscita dei comparatori non è in codice si rende necessario un circuito di codifica che renda disponibile la sequenza di bit desiderata.

È chiaro che tanto maggiore è il numero dei comparatori tanto maggiore è la precisione con la quale avviene la conversione; in particolare con tre comparatori si hanno due bit in uscita; per ottenere tre bit occorrono sette comparatori.

Convertitori a retroazione

Caratteristica comune dei convertitori a retroazione è la presenza di un ramo di retroazione che consente il confronto con la tensione analogica di ingresso.

La conversione non è simultanea come nel convertitore parallelo ma avviene per passi successivi per cui i tempi di conversione sono più lenti.

Tra i *convertitori a retroazione* si distinguono le seguenti tipologie costruttive:

- *convertitori ad approssimazioni successive;*
- *convertitori a gradinata;*
- *convertitori a incremento e decremento;*
- *convertitori a integrazione.*

Il loro funzionamento si differenzia per il metodo utilizzato per raggiungere il risultato finale della conversione.

La tipologia più comune è quella denominata *ad approssimazioni successive*.

Elemento essenziale del circuito è una rete logica sequenziale costituita da un *registro ad approssimazioni successive SAR* che genera delle sequenze di bit secondo un particolare procedimento matematico.

Un convertitore digitale-analogico trasforma le sequenze di bit in una tensione di riferimento che viene confrontata da un comparatore con la tensione incognita (ingresso analogico); quando la differenza tra le due tensioni risulta minore di un valore prefissato la conversione si arresta e in uscita è disponibile il codice binario corrispondente all'ultima sequenza convertita.

Lo schema a blocchi semplificato di un convertitore ad approssimazioni successive viene riportato in FIGURA 13.



FIGURA 13
Schema a blocchi
semplificato
di un convertitore
ad approssimazioni
successive.

6 Dispositivi per la conversione digitale-analogica

► Un **convertitore digitale-analogico** (in forma abbreviata convertitore D/A, o ancora più sinteticamente DAC) è un dispositivo che converte una grandezza digitale in una grandezza analogica.

La grandezza digitale in ingresso viene solitamente definita in termini di bit a ciascuno dei quali viene assegnato un determinato peso a seconda del codice scelto; la grandezza analogica in uscita non può assumere valori continui ma soltanto un insieme ben determinato di valori di entità proporzionale al numero dei bit d'ingresso.

Per comprendere meglio il principio su cui si basa la conversione D/A si

può fare riferimento alla FIGURA 14 in cui viene riportato l'andamento nel tempo di una grandezza digitale in ingresso e il corrispondente andamento nel tempo della tensione analogica in uscita.

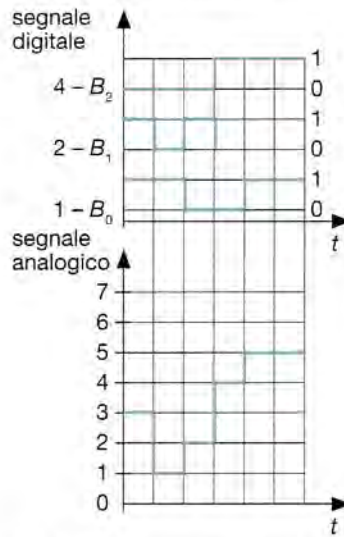


FIGURA 14
Esempio di conversione
digitale-analogica.

Il segnale d'ingresso a tre bit può assumere tutte le otto possibili configurazioni binarie; il segnale in uscita, analogico, può assumere un numero finito di valori di tensione pari al numero delle configurazioni binarie in ingresso. Per gli errori e i parametri caratteristici dei convertitori D/A si può fare riferimento a quelli dei convertitori A/D .

6.1 Forme costruttive

Si distinguono in relazione alla struttura del circuito e quindi al meccanismo di conversione; le due tipologie più comuni vengono denominate:

- convertitori a resistori pesati;
- convertitori $R-2R$.

Convertitore a resistori pesati

Per comprendere il meccanismo di conversione del convertitore a resistori pesati viene fatto riferimento allo schema riportato in FIGURA 15 che rappresenta il caso particolare di un convertitore con tre bit d'ingresso.

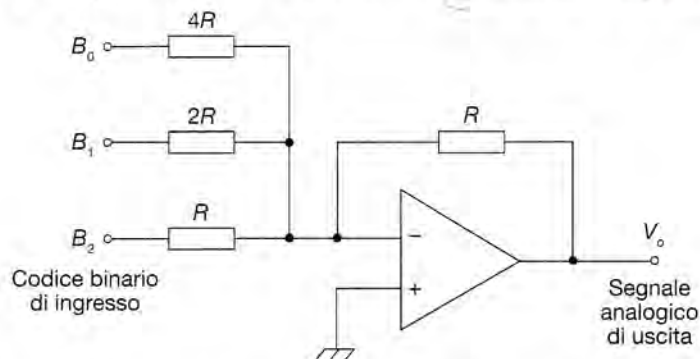


FIGURA 15
Schema di un convertitore
a resistori pesati
con tre bit d'ingresso.

Gli elementi che compongono lo schema sono una rete di resistori e un circuito sommatore.

La rete di resistori è composta da elementi aventi valori di resistenza diversi a seconda dell'ingresso a cui sono collegati; in particolare la resistenza legata al bit meno significativo avrà il valore più alto, quella successiva la metà del valore precedente e così di seguito.

Il circuito sommatore è costituito da un amplificatore operazionale in configurazione invertente.

In presenza di tensione su uno degli ingressi (cioè corrisponde al caso di un bit posto a uno logico) nel corrispondente resistore scorre una corrente proporzionale al valore di resistenza (che rappresenta il peso che ha quel particolare bit nel codice binario).

Nel caso di presenza di tensione su più ingressi il segnale originario viene ricostruito sommando le correnti che scorrono nei diversi resistori.

Convertitore R-2R

Il convertitore R-2R evita l'uso di resistori di differenti caratteristiche e valori impiegando resistori aventi valori di resistenza uguale o doppia rispetto a un valore di base R.

Lo schema corrispondente, sempre relativo a un convertitore con tre bit d'ingresso, viene riportato in FIGURA 16.

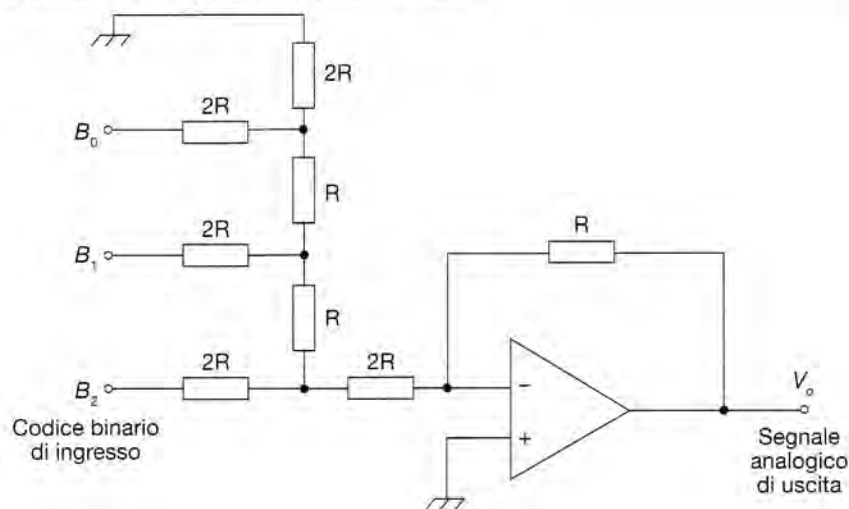


FIGURA 16
Schema
di un convertitore R-2R
con tre bit d'ingresso.

La rete di resistori posta all'ingresso del convertitore viene realizzata in modo tale che da ciascun nodo venga vista, sia verso l'alto sia verso il basso, una resistenza equivalente pari a $2R$.

Una corrente che giunga a un nodo qualsiasi subisce un dimezzamento, dovendo seguire percorsi a resistenza uguale; la somma delle correnti all'ingresso dell'operazionale ricostruisce in questo modo i pesi dei bit dei segnali di provenienza.

7 Applicazioni

Per chiarire l'argomento vengono di seguito proposti due esempi applicativi in cui il computer elabora i dati provenienti dalla linea di acquisizione e, in base ai risultati prodotti, agisce di conseguenza sugli attuatori attraverso la linea di distribuzione.

Si supponga di voler controllare tramite personal computer lo stato di carica di una batteria.

Il personal deve acquisire i dati relativi ai valori di tensione della batteria, elaborare i dati acquisiti e agire di conseguenza in modo tale che:

- se il valore di tensione è inferiore al minimo prefissato si deve accendere un *LED* rosso e la batteria deve essere collegata all'alimentatore per essere ricaricata;
- se è superiore al massimo prefissato si deve accendere un *LED* verde e la batteria deve essere collegata al carico;
- se si trova nella fascia intermedia si deve accendere un *LED* giallo e la batteria deve essere sempre collegata al carico;
- si visualizzi sullo schermo il valore di tensione acquisito.

Soluzione

Si distinguono tre fasi e precisamente:

- la fase di acquisizione dei dati relativi allo stato di carica della batteria;
- la fase di elaborazione dei dati da parte del personal che deve provvedere al confronto tra le tensioni;
- la fase di distribuzione nella quale vengono prodotti i dati necessari al corretto funzionamento degli utilizzatori (alimentatore, batteria, *LED*).

Per entrare maggiormente nei dettagli del sistema nel suo complesso si utilizzi lo schema a blocchi ad anello chiuso riprodotto in FIGURA 17 in cui si evidenzia che:

- al sistema di acquisizione corrisponde il ramo diretto;
- al sistema di distribuzione il ramo di retroazione.

Acquisizione dati

L'acquisizione dei dati avviene inviando a un convertitore *ADC* opportunamente temporizzato il valore analogico della tensione della batteria campionato attraverso un modulo *S/H*.

Il condizionatore di segnale deve adattare i livelli di tensione provenienti dalla batteria a quelli richiesti dal convertitore.

Il dato digitale disponibile all'uscita del convertitore viene inviato a una *scheda di interfaccia* che mette in

comunicazione il personal con i dispositivi periferici e con il convertitore.

Componente fondamentale della scheda deve essere un'*interfaccia programmabile* capace di trasmettere dati in parallelo sia in ingresso sia in uscita (*I/O parallelo*).

La configurazione delle linee di *I/O* deve essere controllata tramite software (per questo motivo l'*interfaccia* si dice *programmabile*).

La scheda deve essere provvista di un connettore che la mette in comunicazione con la scheda madre del personal a sua volta provvista di connettori (*I/O channel connectors*) disponibili per operazioni di *I/O*.

Distribuzione dati

La distribuzione dei dati avviene utilizzando un'*interfaccia di potenza* essenzialmente costituita da un componente integrato (*driver di potenza*) che, attraverso l'*interfaccia programmabile*, riceve sotto forma di livelli logici le informazioni derivanti dall'elaborazione del programma che valuta lo stato di carica della batteria.

Il *driver di potenza* comanda il relè che collega in modo opportuno batteria, alimentatore e carico e i tre *LED* che indicano lo stato di carica della batteria.

Elaborazione dati

Per l'acquisizione e la distribuzione dei dati è necessario un programma scritto utilizzando le istruzioni di ingresso e uscita previste dai più noti linguaggi di programmazione; questi abilitano il passaggio di dati e indirizzi e attivano i segnali di lettura e scrittura.

Il programma che gestisce il sistema deve in particolare consentire lo svolgimento delle seguenti operazioni:

- abilitare il campionamento del segnale;
- abilitare i segnali di inizio conversione;
- ricevere i segnali di fine conversione;
- abilitare l'*interfaccia programmabile* alla ricezione dei dati;
- prelevare i dati dall'*interfaccia*;
- trasformare il valore digitale in valore analogico e visualizzarlo;
- confrontare lo stato di carica ricevuto con i valori massimi e minimi ammessi;
- sulla base del confronto pilotare le periferiche.

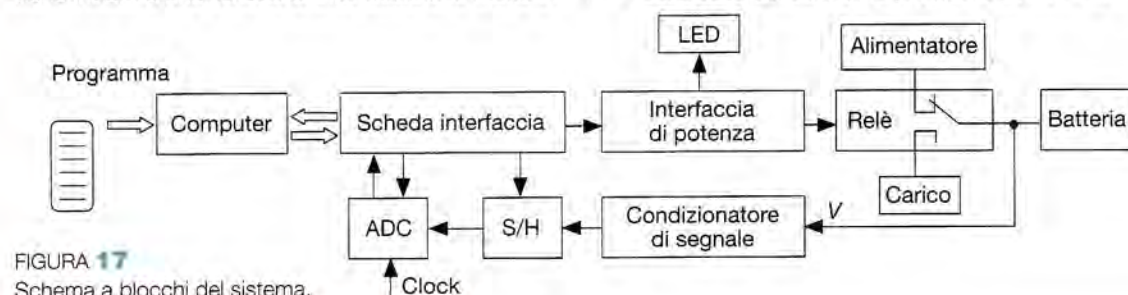


FIGURA 17
Schema a blocchi del sistema.

Si supponga di voler controllare tramite personal computer la temperatura di un liquido immerso in una vasca e sottoposto a riscaldamento.

Il personal deve acquisire i dati relativi ai valori di temperatura provenienti da trasduttori opportunamente disposti in diversi punti della vasca, elaborare i dati acquisiti e agire di conseguenza in modo tale da:

- azionare un dispositivo riscaldatore qualora la media delle temperature rilevate sia superiore a un valore prefissato e far accendere un LED per segnalare l'avvenuto azionamento del riscaldatore;
- non azionare il riscaldatore se questa condizione non si verifica.

Soluzione

Si distinguono tre fasi e precisamente:

- la fase di acquisizione che deve provvedere al prelievo dei dati relativi alla temperatura;
- la fase di elaborazione dei dati da parte del personal che deve provvedere a confrontare la media dei valori di temperatura rilevati con la soglia prefissata;
- la fase di distribuzione che ha il compito di produrre i segnali necessari per il corretto funzionamento del riscaldatore e per l'accensione del LED che segnala l'inserzione del riscaldatore stesso.

Per entrare maggiormente nei dettagli del sistema nel suo complesso si utilizzi lo schema a blocchi ad anello chiuso riprodotto in FIGURA 18 in cui si evidenzia che:

- al sistema di acquisizione corrisponde il ramo diretto;
- al sistema di distribuzione il ramo di retroazione.

Acquisizione dati

L'acquisizione dei dati avviene inviando a un convertitore ADC opportunamente temporizzato il valore analogico delle temperature misurate; poiché la temperatura è una grandezza fisica che, per sua natura, varia lentamente nel tempo non è necessario utilizzare un modulo S/H.

Poiché i valori di temperatura rilevati attraverso i sensori devono essere convertiti uno per volta è pertanto necessaria la presenza di un multiplexer per la selezione del segnale da convertire.

I condizionatori di segnale devono adattare i livelli di tensione provenienti dai sensori a quelli richiesti dal convertitore.

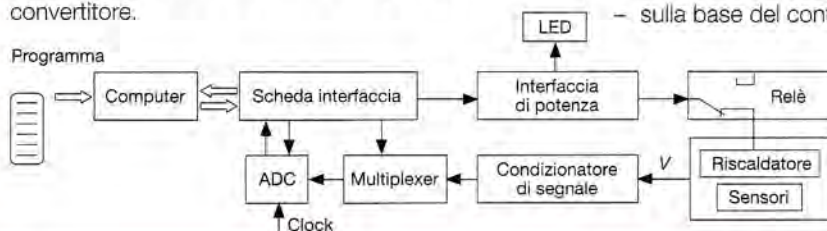


FIGURA 18
Schema a blocchi
del sistema.

Il dato digitale disponibile all'uscita del convertitore viene inviato a una *scheda di interfaccia* che mette in comunicazione il personal con i dispositivi periferici e con il convertitore.

Componente fondamentale della scheda deve essere un'*interfaccia programmabile* capace di trasmettere dati in parallelo sia in ingresso sia in uscita (I/O parallelo).

La configurazione delle linee di I/O deve essere controllata tramite software (per questo motivo l'interfaccia si dice programmabile).

La scheda deve essere provvista di un connettore che la mette in comunicazione con la scheda madre del personal a sua volta provvista di connettori (I/O channel connectors) disponibili per operazioni di I/O.

Distribuzione dati

La distribuzione dei dati avviene utilizzando un'interfaccia di potenza essenzialmente costituita da un componente integrato (*driver di potenza*) che, attraverso l'*interfaccia programmabile*, riceve sotto forma di livelli logici le informazioni derivanti dall'elaborazione del programma che valuta la temperatura del liquido.

Il *driver di potenza* comanda il relè che provvede all'azionamento dell'elemento riscaldatore e il LED che segnala l'avvenuto azionamento.

Elaborazione dati

Per l'acquisizione e la distribuzione dei dati è necessario un programma scritto utilizzando le istruzioni di ingresso e uscita previste dai più noti linguaggi di programmazione; questi abilitano il passaggio di dati e indirizzi e attivano i segnali di lettura e scrittura.

Il programma che gestisce il sistema deve in particolare consentire lo svolgimento delle seguenti operazioni:

- abilitare il multiplexer alla selezione del canale;
- abilitare i segnali di inizio conversione;
- ricevere i segnali di fine conversione;
- abilitare l'interfaccia programmabile alla ricezione dei dati;
- prelevare i dati dall'interfaccia;
- calcolare la media delle temperature acquisite;
- trasformare il valore digitale in valore analogico e visualizzarlo;
- confrontare la media delle temperature con il valore di soglia prefissato;
- sulla base del confronto pilotare le periferiche.

8 Applicazioni con Multisim

Il programma di simulazione *Multisim* è uno strumento di *progettazione* che fornisce all'utente tutti i componenti e gli strumenti necessari per creare con il computer un progetto senza fare ricorso a componenti e strumenti reali.

Il programma offre una simulazione mista completa, analogica e digitale, ed un'analisi grafica della forma d'onda, consentendo di progettare il circuito, quindi di analizzarlo utilizzando gli strumenti e le opzioni d'analisi fornite dal programma.

Allo stato attuale l'ultima versione del programma è *Multisim 11*.

Il programma viene di seguito utilizzato per analizzare il funzionamento dei dispositivi che operano la conversione del segnale da analogico a digitale e viceversa, molto importanti nell'ambito dei sistemi di acquisizione e distribuzione dati.

I componenti e gli strumenti che si utilizzano in queste esercitazioni sono i seguenti:

- *PULSE_VOLTAGE*, generatore di forme d'onda impulsive selezionato dalla libreria *Sources*;
- *DC_POWER*, generatore di continua selezionato dalla libreria *Sources*;
- *GROUND*, punto a potenziale nullo selezionato dalla libreria *Sources*;
- *RESISTOR*, resistore selezionato dalla libreria *Basic*;
- *OPAMP_3T_VIRTUAL*, amplificatore operazionale selezionato dalla libreria *Analog* (gruppo *ANALOG_VIRTUAL*);
- *DCD_HEX*, display a 7 segmenti selezionato dalla libreria *Indicators* (gruppo *HEX_DISPLAY*);
- *HEL-700-T0A*, sensore RTD selezionato dalla libreria *Misc* (gruppo *TRANSDUCERS*);
- *ADC*, convertitore analogico-digitale a 8 bit selezionato dalla libreria *Mixed* (gruppo *ADC_DAC*);
- *SWITCH*, interruttore selezionato dalla libreria *Basic*;
- *VOLTMETER*, voltmetro selezionato dalla libreria *Indicators*;
- *MULTIMETER*, strumento selezionato da *Simulate* e *Instruments*.

In particolare vengono esaminate le caratteristiche del sensore RTD.

In FIGURA 19 viene riportata la finestra di dialogo che consente la selezione del sensore RTD.

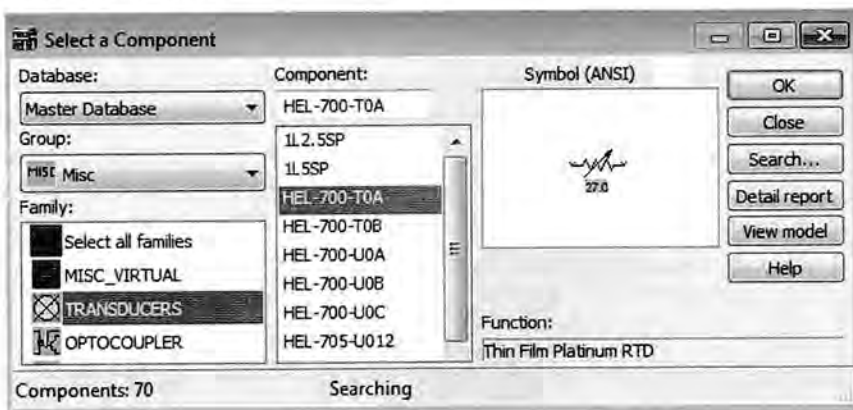


FIGURA 19
Selezione del componente
sensore RTD.

Il sensore è in grado di misurare temperature comprese tra -200°C e 540°C ; la sua resistenza vale 100 alla temperatura di 27°C .

Il componente è interattivo in quanto in fase di simulazione si può modificare il valore della temperatura premendo il tasto T o spostando il cursore di cui il componente stesso è dotato.

Per modificare le caratteristiche del sensore si deve accedere, dal menu che viene visualizzato puntando il componente e premendo il pulsante destro del mouse, alla finestra delle proprietà riprodotta in FIGURA 20.

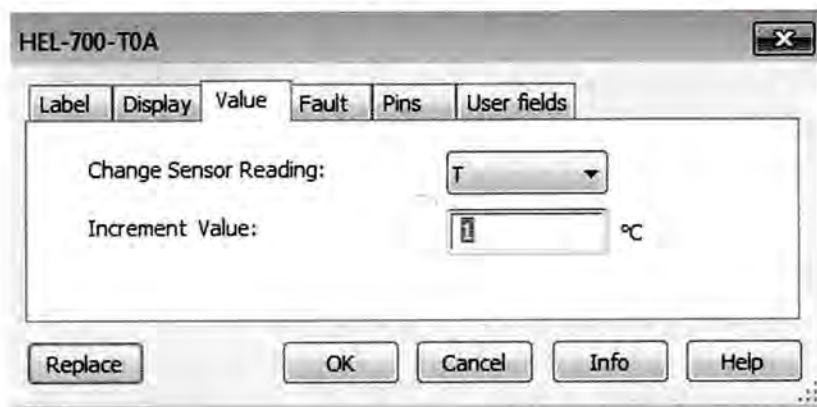


FIGURA 20
Finestra delle proprietà
del sensore RTD.

Le proprietà che si possono modificare sono:

- il tipo di sensore di lettura;
- l'incremento di temperatura determinato dalla pressione del tasto.

8.1 Esercitazioni

Vengono di seguito proposte alcune esercitazioni di simulazione riguardanti i seguenti argomenti:

- esercitazione 1 – Conversione digitale-analogica tramite convertitore a resistori pesati
- esercitazione 2 – Conversione analogico-digitale tramite convertitore integrato
- esercitazione 3 – Conversione analogico-digitale e digitale-analogica di un segnale

Esercitazione 1 – Conversione digitale-analogica tramite convertitore a resistori pesati

Scopo dell'esercitazione è di simulare il comportamento di un convertitore digitale-analogico a resistori pesati a 8 bit.

Come tensione di riferimento si può utilizzare un generatore di tensione continua da 5 V.

Utilizzando un resistore di reazione avente resistenza pari a 10 k , i resistori relativi ai singoli bit hanno resistenze di valore progressivo compreso tra 10 k (per il bit più significativo) e 1280 k (per il bit meno significativo).

Ciascun bit d'ingresso viene configurato in relazione alla posizione assunta dal corrispondente interruttore, un componente interattivo che viene aziona-

to agendo sul pulsante destro del mouse; quando viene collegato a massa il bit corrispondente assume il valore 0 logico, viceversa assume il valore 1 logico.

L'amplificatore operazionale scelto è del tipo virtuale a tre terminali.

Per visualizzare la tensione analogica prodotta in uscita si utilizza un multimetro.

Vengono effettuate quattro prove di simulazione.

Nella prima prova di simulazione, quella riprodotta in FIGURA 21, viene riportato lo schema del circuito con gli otto interruttori tutti collegati a massa e quindi con l'uscita a 0 V.

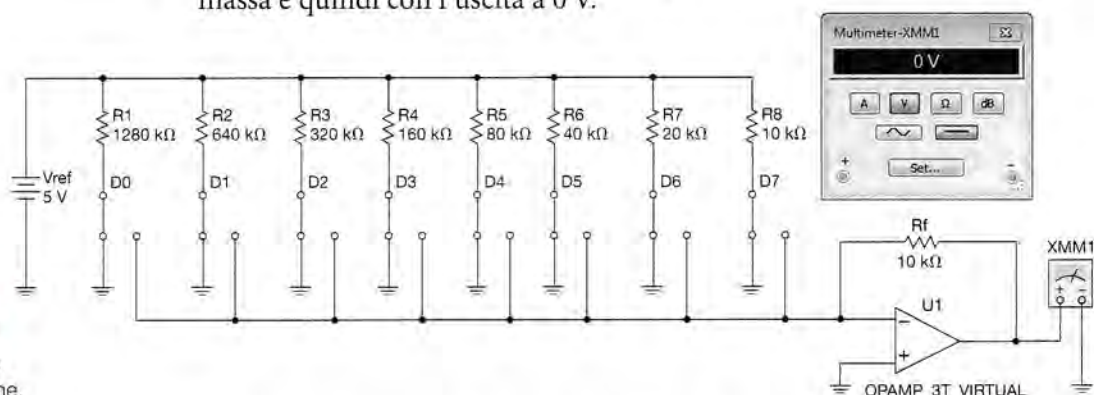


FIGURA 21
Prima prova
di simulazione.

Nella seconda prova di simulazione, quella riprodotta in FIGURA 22, viene riportato lo schema del circuito quando è a 1 logico il bit più significativo che ha quindi un peso pari a 5 V.

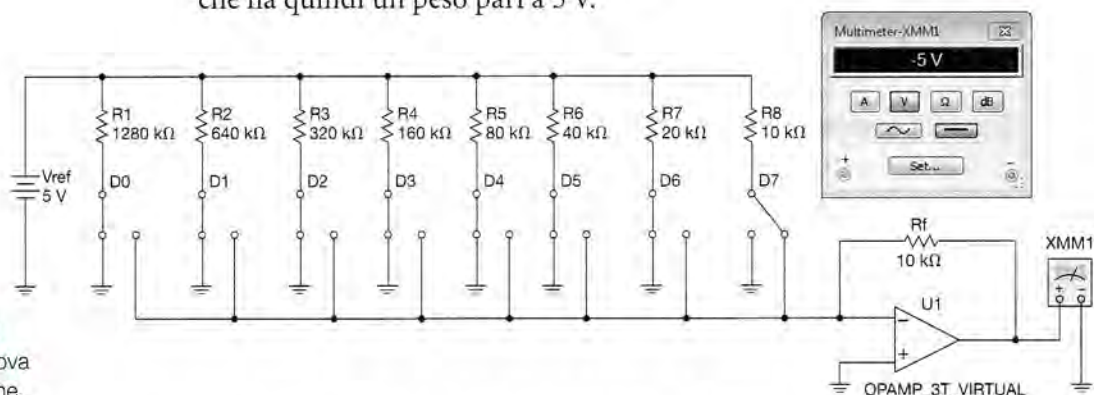


FIGURA 22
Seconda prova
di simulazione.

Nella terza prova di simulazione, quella riprodotta in FIGURA 23, viene riportato lo schema del circuito quando è a 1 logico il bit meno significativo che ha quindi un peso pari a circa 39 mV.

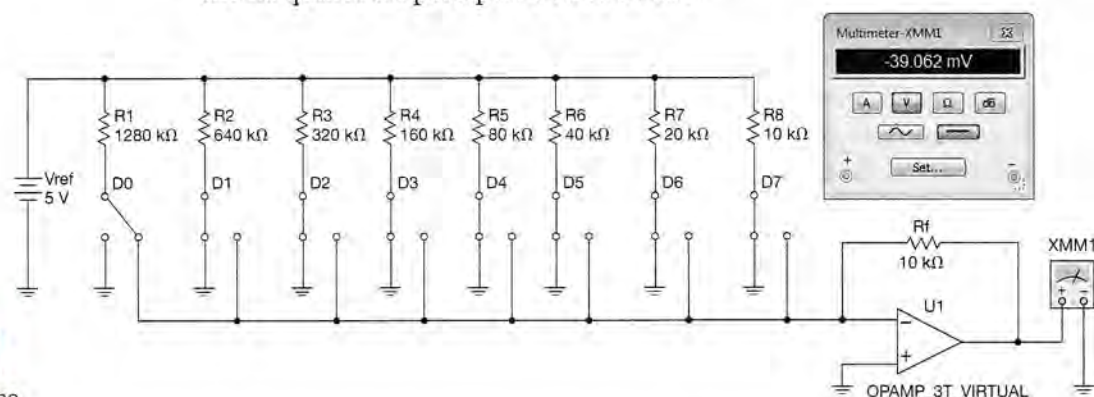
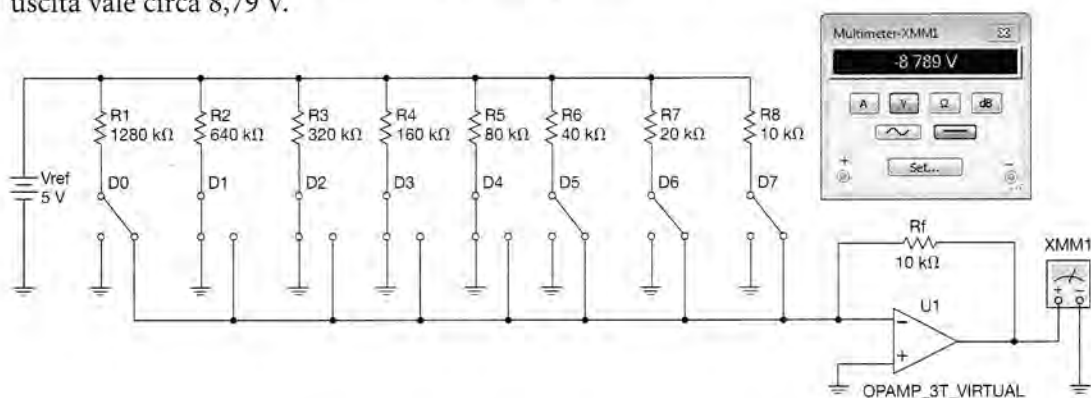


FIGURA 23
Terza prova
di simulazione.

Nella quarta prova di simulazione, quella riprodotta in FIGURA 24, viene riportato lo schema del circuito quando sono a 1 logico i due bit più significativi e quello meno significativo; il corrispondente valore analogico in uscita vale circa 8,79 V.



Esercitazione 2 - Conversione analogico-digitale tramite convertitore integrato

Scopo dell'esercitazione è simulare il comportamento di un convertitore analogico-digitale che ha come ingresso il segnale proveniente dal sensore di temperatura RTD del tipo HEL-700-T0A tarato per incrementi di temperatura di 1 °C.

La resistenza del sensore vale 100 Ω alla temperatura di 27 °C.

I risultati della conversione vengono visualizzati sul display a 7 segmenti DCD_HEX.

Un voltmetro viene utilizzato per visualizzare il valore analogico della tensione d'ingresso.

Il convertitore è un ADC integrato a 8 bit.

Le tensioni di riferimento positiva (+10 V) e negativa (-10 V) vengono realizzate utilizzando dei DC_POWER.

All'ingresso SOC (Start Of Conversion) viene collegato il generatore di tensione impulsiva PULSE_VOLTAGE che presenta le seguenti caratteristiche:

- ha valore iniziale nullo;
- l'ampiezza dell'impulso è di 5 V;
- la durata dell'impulso è di 5 ms su un periodo di 10 ms.

Vengono effettuate tre prove di simulazione.

Nella prima prova, quella riprodotta in FIGURA 25, viene riportato lo schema del circuito con il sensore tarato per una temperatura di 0 °C; la tensione visualizzata sul voltmetro è di 0 V in quanto la resistenza del partitore è stata scelta in modo tale da ottenere questo valore; come risultato della conversione sul display compare il corrispondente valore esadecimale 80 che si trova al centro dell'intervallo di misura.

Nella seconda prova, quella riprodotta in FIGURA 26, viene riportato lo schema del circuito con il sensore tarato per una temperatura di 10 °C; la tensione visualizzata sul voltmetro è di 191 mV; come risultato della conversione sul display compare il corrispondente valore esadecimale 82; si evidenzia il fatto che in questo intervallo di misura il coefficiente di temperatura vale circa 19 mV/°C.

FIGURA 24
Quarta prova
di simulazione.

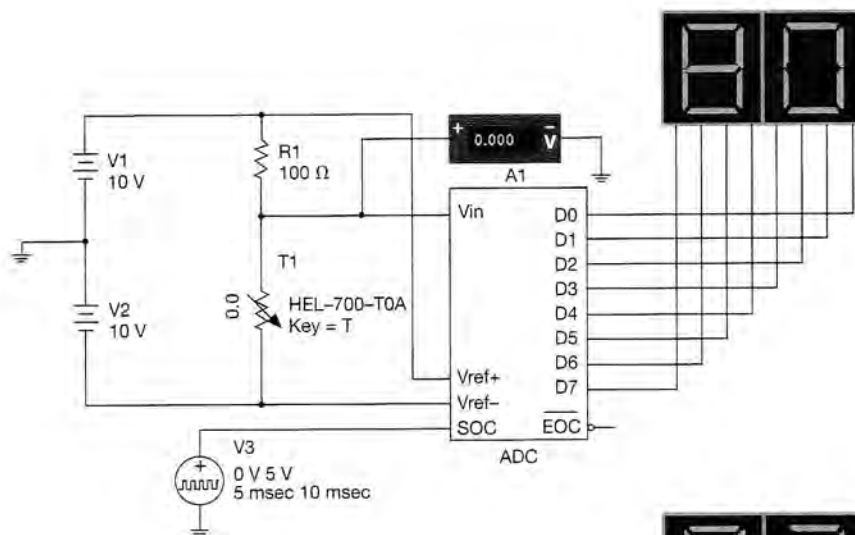


FIGURA 25
Prima prova
di simulazione.

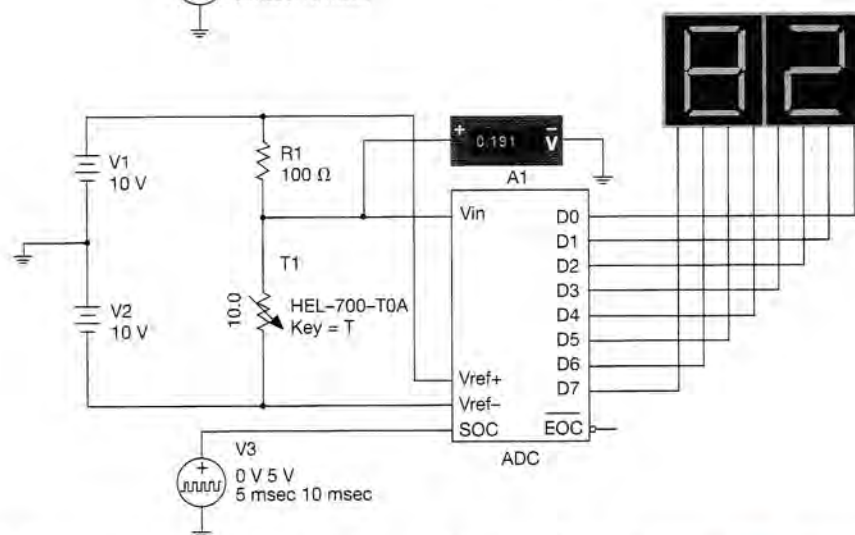


FIGURA 26
Seconda prova
di simulazione.

Nella terza prova di simulazione, quella riprodotta in FIGURA 27, viene riportato lo schema del circuito con il sensore tarato per una temperatura di 100 °C; la tensione visualizzata sul voltmetro è di 1,614 V; come risultato della conversione sul display compare il corrispondente valore esadecimale 94; si evidenzia il fatto che il coefficiente di temperatura ha assunto un valore pari a circa 16 mV/°C.

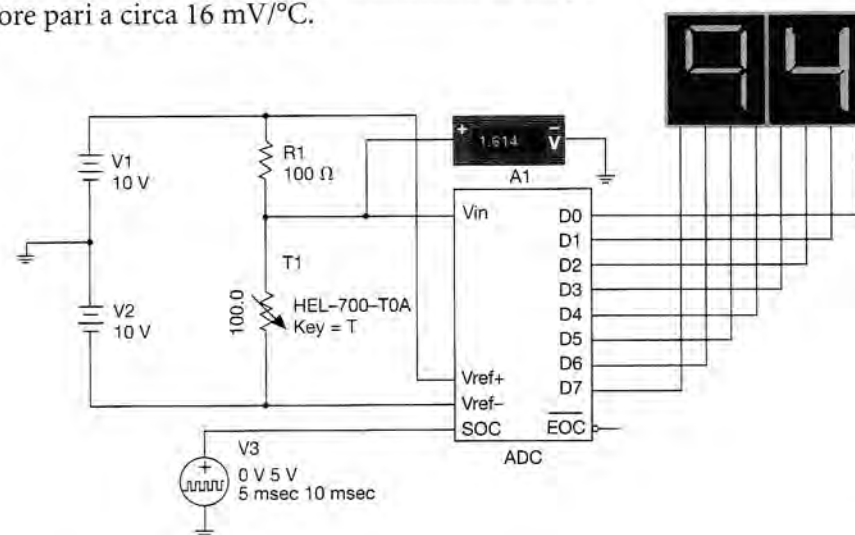


FIGURA 27
Terza prova
di simulazione.



Esercitazione 3 – Conversione analogico-digitale e digitale-analogica di un segnale

Si vuole simulare il comportamento di un circuito che deve:

- convertire in forma digitale il segnale analogico proveniente da un sensore di temperatura RTD del tipo HEL-700-T0A tarato per incrementi di temperatura di 1 °C;
- visualizzare i risultati della conversione su un display a 7 segmenti;
- utilizzare un voltmetro per visualizzare il valore analogico della tensione d'ingresso;
- riconvertire in forma analogica il segnale digitale;
- visualizzarne il valore su un secondo voltmetro in modo tale che questa tensione (espressa in mV) coincida con il valore della temperatura dell'ambiente in cui il sensore viene immerso.

Il circuito ha il duplice scopo di evidenziare la natura opposta della conversione A/D e della conversione D/A e di utilizzare un voltmetro come indicatore di temperatura.

Vengono effettuate tre prove di simulazione.

Nella prima prova, quella riprodotta in FIGURA 28, viene riportato lo schema del circuito con il sensore tarato per una temperatura di 0 °C.

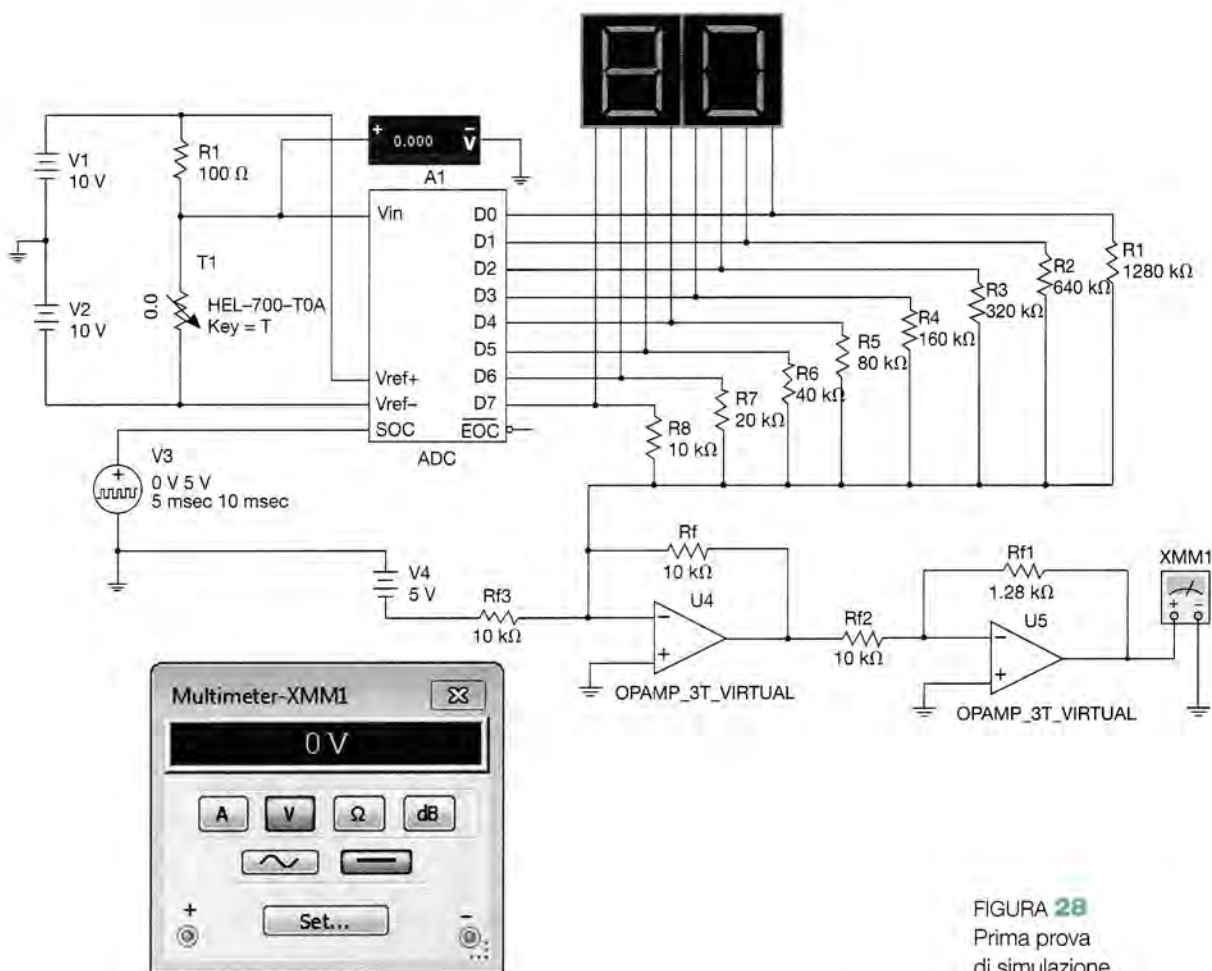


FIGURA 28
Prima prova
di simulazione.

La tensione visualizzata sul voltmetro è di 0 V in quanto la resistenza del partitore è stata scelta in modo tale da ottenere questo valore; come risultato della conversione sul display compare il corrispondente valore esadecimale 80 che si trova al centro dell'intervallo di misura.

Il voltmetro disposto all'uscita del convertitore riporta il valore 0 mV coincidente con la temperatura misurata dal sensore.

Per ottenere tale valore lo schema con i due operazionali all'uscita del convertitore D/A deve essere dimensionato tenendo conto che il coefficiente di temperatura del sensore vale circa $16 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ e che la tensione prodotta dal sensore, con il tipo di polarizzazione scelta, assume il valore 0 V a 0°C .

Nella seconda prova di simulazione, quella riprodotta in FIGURA 29, viene riportato lo schema del circuito con il sensore tarato per una temperatura di 10°C .

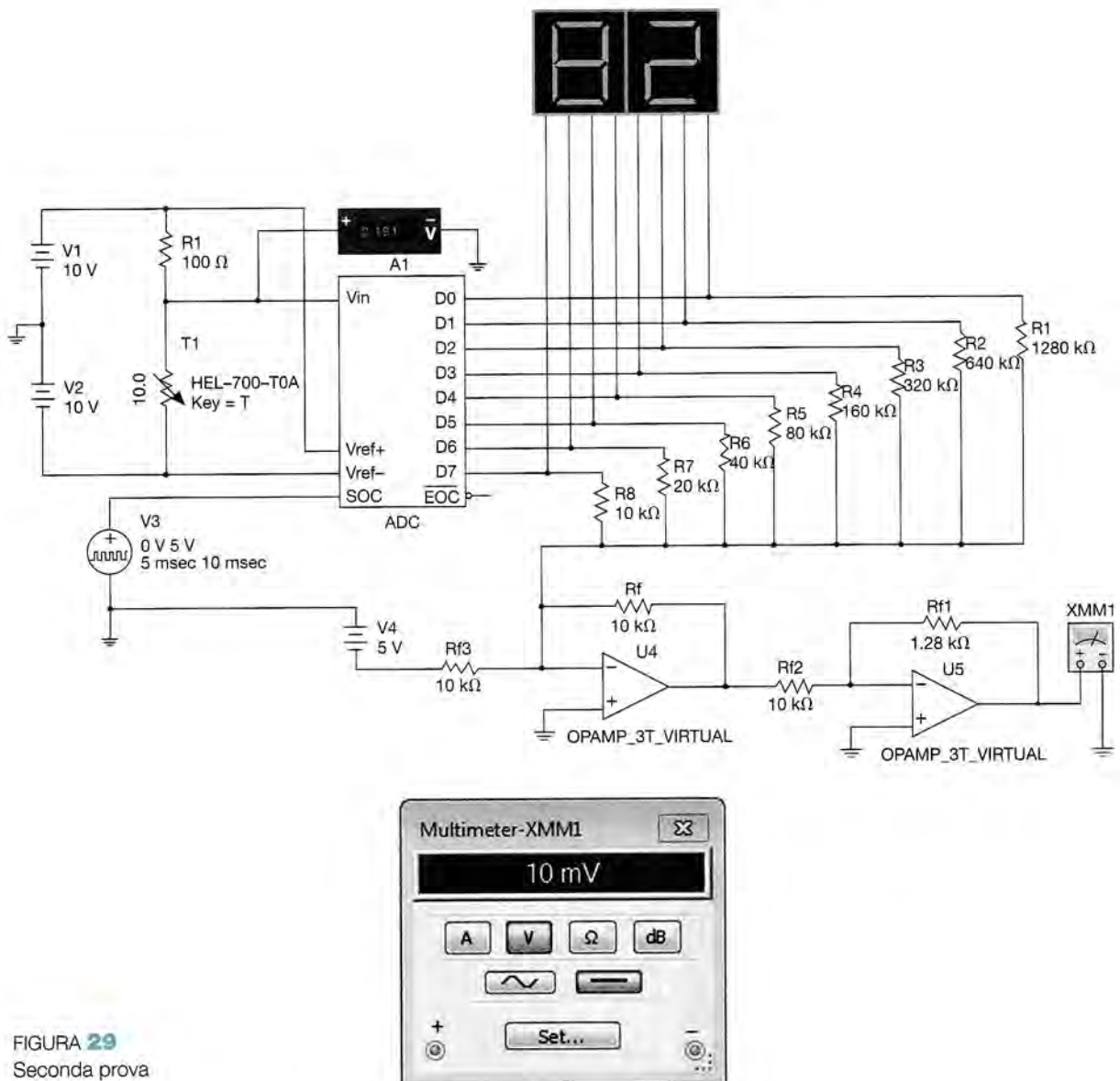


FIGURA 29
Seconda prova
di simulazione.

Nella terza prova, quella riprodotta in FIGURA 30, viene riportato lo schema del circuito con il sensore tarato per una temperatura di 100 °C.

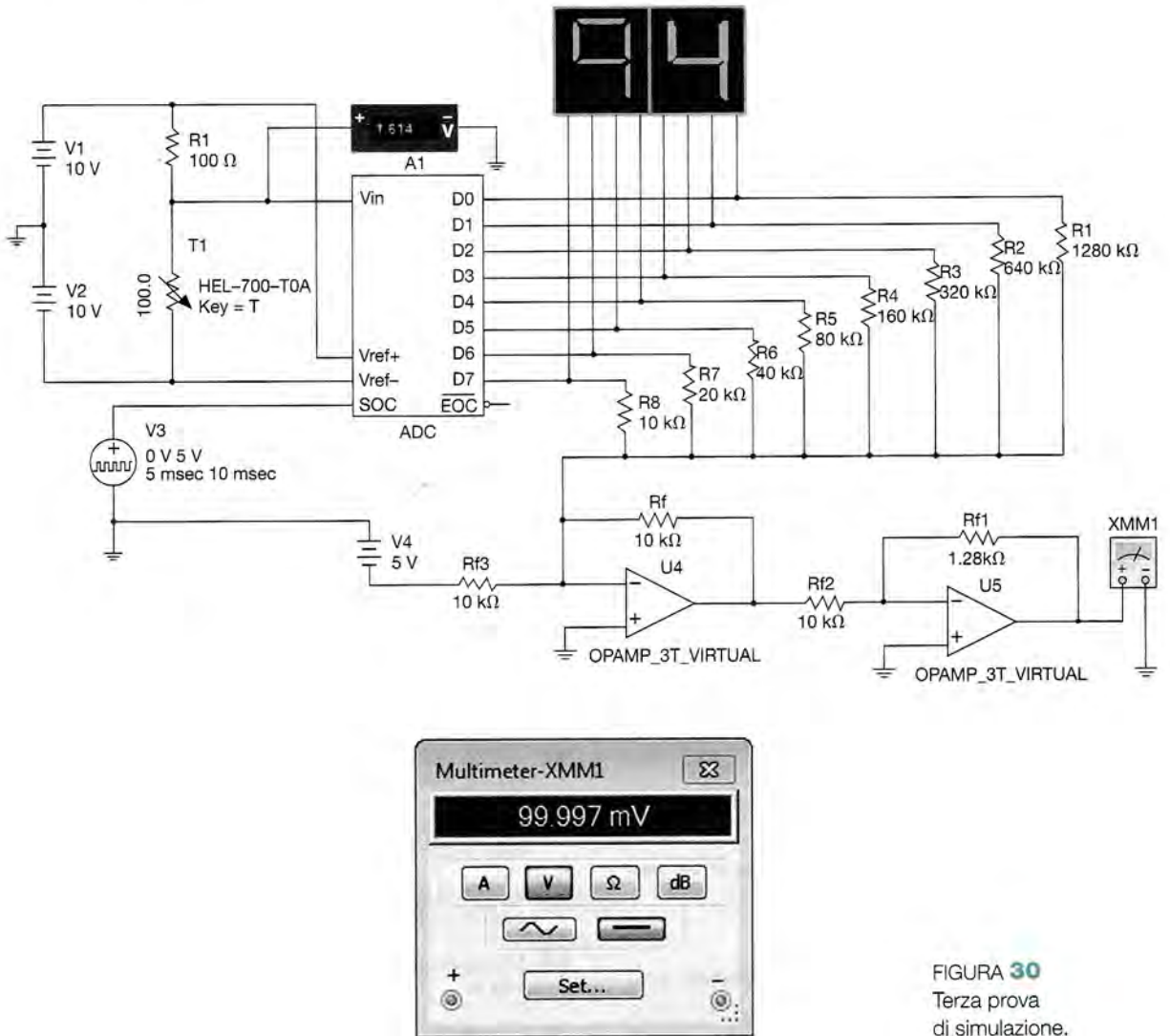


FIGURA 30
Terza prova
di simulazione.