

FONDAMENTI DI ELETTRONICA



E

FONDAMENTI DI ELETTRONICA

Il cervello del Robot.

Il cervello del robot che costruiremo è un piccolo computer digitale, che si trova dentro ad un circuito integrato.

Questo componente viene chiamato "microcontrollore" ed è uno degli sviluppi più spettacolari della Microelettronica moderna.

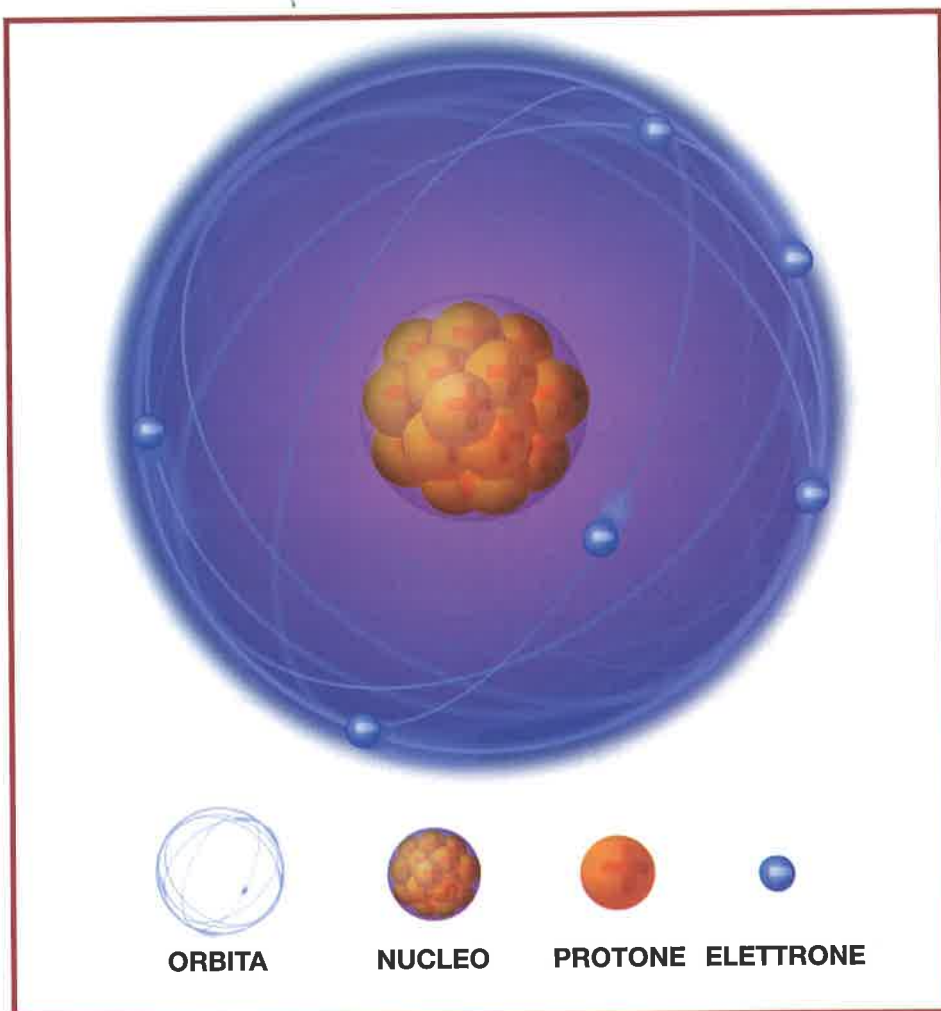
La connessione e comunicazione di questo cervello con le ruote motrici, che servono a far muovere il nostro Robot e con i sensori che verranno utilizzati per identificare gli ostacoli, o per seguire un percorso, necessita di circuiti elettronici di interfaccia. Questo per fare in modo che vengano adattate le caratteristiche dell'elemento che invia l'informazione o l'ordine, a quello che li riceve.

Tutti questi circuiti ausiliari non sono contenuti nel microcontrollore, ma saranno formati da diversi componenti elettrici, quali le resistenze, condensatori, diodi, transistor, ecc.

L'obiettivo di questa sezione dell'opera è quello di spiegare in forma breve, chiara e semplice, i principi fondamentali che controllano il funzionamento dei suddetti componenti con i quali lavorerete.

GLI ELETTRONI E L'ELETTRICITÀ

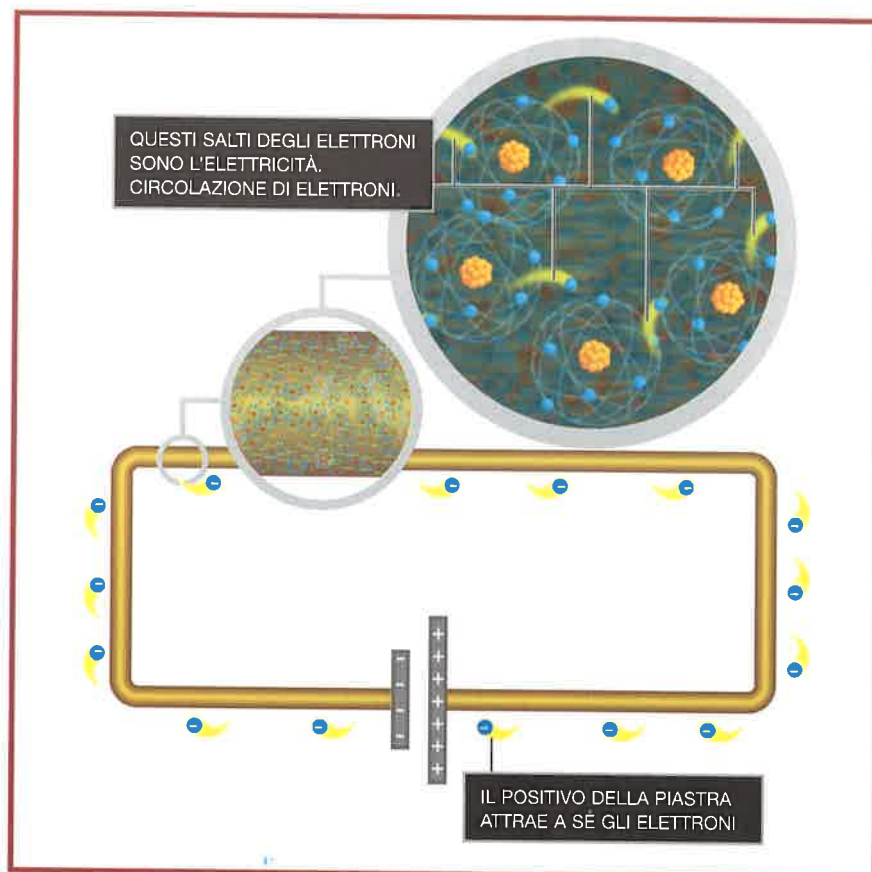
I principi fondamentali dell'elettronica sono nell'elettricità: l'elemento fondamentale si trova nella struttura della materia. Gli atomi di tutti i materiali sono costituiti da un nucleo ed un involucro. Nel nucleo si trovano i protoni, che sono particelle con cariche elettriche posi-



Il nucleo dell'atomo contiene i protoni che sono cariche elettriche positive. Girando nelle diverse orbite si trovano gli elettroni con carica elettrica negativa. L'atomo è neutro perché ha lo stesso numero di protoni e di elettroni.

tive ed i neutroni. Nell'involucro girano in orbita ad alta velocità gli elettroni, che sono particelle con carica elettrica negativa. Per l'esistenza di cariche positive e negative, l'atomo risulta neutro.

Gli elettroni delle orbite sopportano una forza d'attrazione da parte del nucleo. Ci sono degli atomi che hanno elettroni che girano in orbite lontane dal nucleo, i quali possono lasciare l'orbita, se trovano una forza d'attrazione esterna maggiore di quella del nucleo.



L'intensità elettrica è la quantità di elettroni che circola di atomo in atomo per unità di tempo.

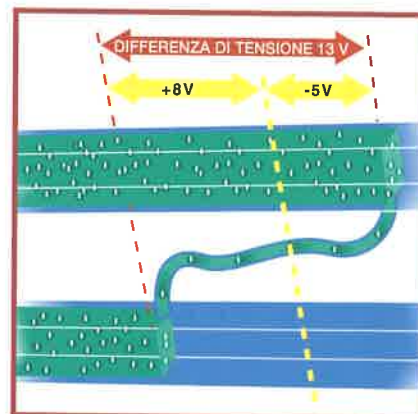
La quantità di elettroni che passa da un atomo all'altro per unità di tempo si chiama intensità elettrica. L'unità di misura dell'intensità è l'Ampère (A) e significa che passano 6,23 trilioni di elettroni (1 Coulomb) in un secondo.

DIFFERENZA DI TENSIONE O DIFFERENZA DI POTENZIALE

La tensione di un corpo è la carica elettrica positiva o negativa che ha per unità di volume. Si misura in Volt (V). Differenza di tensione o di potenziale, è la differenza di tensione che esiste tra due corpi. Questo è un parametro fondamentale, perché quando si trovano a contatto due corpi, il passaggio di elettroni verso il corpo più positivo che li attrae, dipende esclusivamente dalla differenza di potenziale tra i due.

LEGGE DI OHM

Quando si collegano due corpi con differente tensione attraverso un filo conduttore, si genera una corrente di elettroni sino al corpo più positivo che li attrae. La legge



Gli elettroni circolano dal corpo più negativo a quello più positivo.

di Ohm quantifica il valore della intensità elettrica (A), che si crea collegando due corpi con differenza di potenziale (V), attraverso un filo conduttore che presenta una determinata resistenza al passaggio degli elettroni. In pratica l'opposizione che offrono i corpi al passaggio della corrente elettrica si chiama "resistenza" e si misura in Ohm (Ω). La formula della legge di Ohm è la seguente:

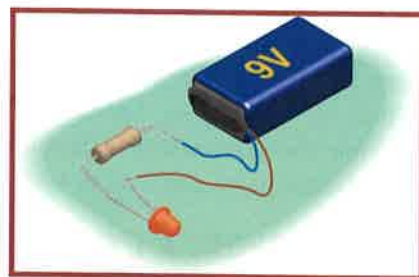
$$I (\text{Ampère}) = V (\text{Volt}) / R (\text{Ohm})$$

COMPONENTI PASSIVI E ATTIVI

I componenti elettronici si dividono in due grandi categorie: attivi e passivi.

I passivi sono principalmente 3: resistenze, condensatori e bobine. Gli attivi più usati sono i diodi ed i transistori, ovviamente anche i circuiti integrati sono considerati componenti attivi.

I componenti passivi vengono fabbricati con materiali conduttori ed isolanti, invece quelli attivi si producono con materiali semiconduttori come il Silicio ed il Germanio.



Se una batteria di 9 V alimenta un diodo LED ed una resistenza di valore 1.000Ω , la corrente che circola, secondo la legge di Ohm è di $I = 9 / 1.000 = 0,009 \text{ A}$.

Componenti attivi e passivi: R, C, e L

Il comportamento di questi due tipi di componenti al passaggio della corrente elettrica è totalmente differente. I passivi, come le resistenze, si comportano in maniera lineare al passaggio di corrente I , seguendo la legge di Ohm.

I componenti attivi non hanno una risposta lineare alla corrente che circola al loro interno, quando viene applicata una differenza del potenziale.

RESISTENZE

Sono componenti passivi fabbricati con materiali isolanti, che offrono una certa opposizione al passaggio della corrente elettrica, che viene definita dalla legge di Ohm.

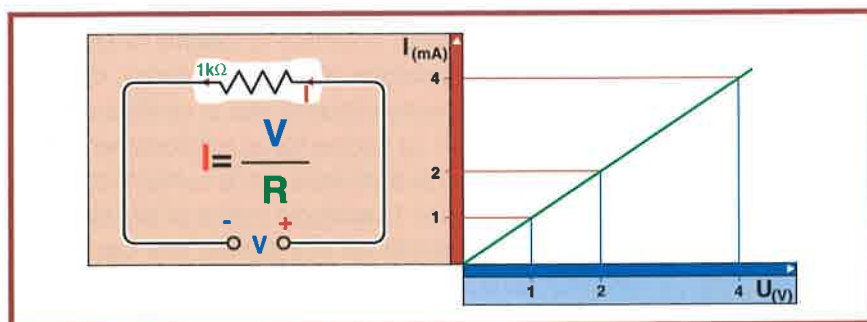
Se viene applicata una doppia tensione, circola il doppio di corrente. La funzione tra questi due parametri fondamentali è lineare.

Le resistenze si possono collegare in serie mettendole una dietro l'altra, offrendo una resistenza equivalente uguale alla somma delle resistenze che si collegano in serie

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

Quando si collegano in parallelo, la resistenza equivalente è minore della più piccola ed il suo valore si calcola secondo la formula:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$



Le resistenze offrono una risposta lineare al variare dell'intensità di corrente I , quando si applica una differenza di tensione V .

CONDENSATORI

Un condensatore è formato da due placche metalliche separate da isolante. Se si applica una differenza di tensione tra le due placche o armatura passano elettroni da una armatura all'altra, generando la carica del condensatore. La relazione tra la carica

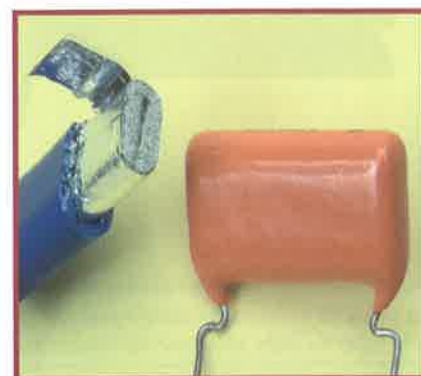
che acquistano le armature e la differenza di tensione applicata si chiama "capacità" e si misura in Farad, viene definita dalla formula:

$$C = \frac{Q}{V}$$

C: Farad; V: Volt e

Q: Coulomb (6,23 trilioni di elettroni)

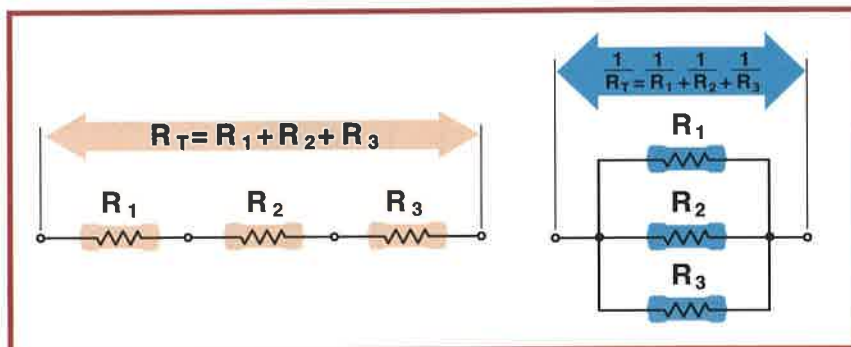
Quando si applica ad un condensatore una differenza di tensione continua, le sue armature si caricano sino ad arrivare alla stessa tensione applicata. Da questo momento gli elettroni non riusciranno più a passare da una armatura



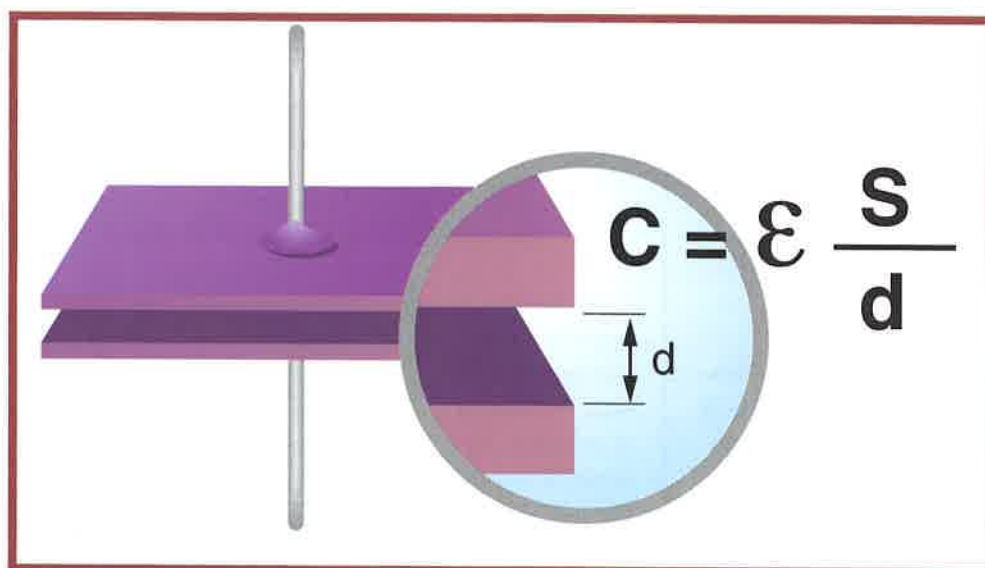
Struttura interna di un condensatore di poliestere. Per diminuire le dimensioni del condensatore si arrotolano le due armature e l'isolante o dielettrico.

all'altra, per questo motivo si dice che il condensatore blocca, o non lascia passare la corrente continua. In realtà si lascia passare in un primo momento sino a che la carica del condensatore contrasta la differenza di tensione.

Il tempo che impiega a caricarsi un condensatore dal momento in cui si collega una tensione continua ai suoi capi, è proporzionale al prodotto della capacità per la resistenza del circuito.



Collegamento di resistenze in serie e in parallelo.

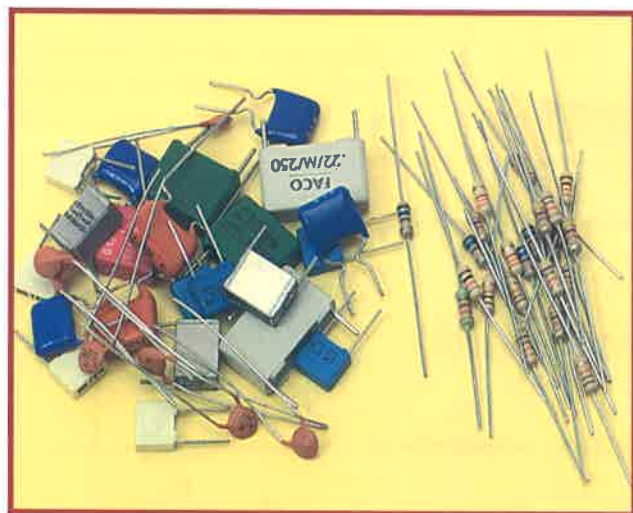


La capacità in Farad del condensatore è proporzionale alle superfici delle armature ed inversamente proporzionale alla distanza tra di esse.

Nel caso di una tensione alternata, il continuo cambiamento di polarità fra le armature, fa sì che si carichino e si scarichino ogni semiperiodo, ossia al ritmo della frequenza della corrente alternata.

Quella circolazione di cariche nei due sensi, permette il passaggio della corrente alternata, comportandosi come una resistenza che si chiama reattanza capacitiva, X_c , il cui valore in Ohm viene dato con la seguente formula:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$



Le resistenze e i condensatori sono i componenti passivi maggiormente usati nell'implementazione dei circuiti elettronici.

X_c si misura in Ω , f è la frequenza della corrente alterna in Hertz e C sono i Farad.

Dalla formula possiamo vedere che il condensatore offre una resistenza molto piccola alle alte frequenze.

I condensatori, così come le resistenze, si possono collegare in serie ed in parallelo, però le formule per calcolare le capacità equivalenti sono inverse a quelle applicate con le resistenze.

In questo modo, la capacità totale dei vari condensatori accoppiati in parallelo è uguale alla somma delle loro capacità singole.

BOBINE

La bobina consiste in un filo di rame arrotolato in forma di spirale, sopra un supporto cilindrico. La sua proprietà più importante è quella di comportarsi come una calamita, quando attraverso essa circola un'intensità elettrica. In corrente continua la bobina si comporta come un filo conduttore di bassa resistenza, dato che in regime di corrente costante non si verificano effetti di autoinduzione. La bobina ha un funzionamento contrario rispetto al condensatore con la corrente continua, infatti ne permette il passaggio invece di bloccarla.

Se viene applicata ad una bobina una corrente alternata, varia il campo magnetico che viene generato e queste variazioni ostacolano il passaggio di corrente nella bobina stessa, abbiamo cioè il fenomeno della autoinduzione, per il quale, la bobina presenta una certa resistenza al passaggio della corrente alternata. Questa resistenza prende il nome di reattanza induttiva, il cui valore viene dato da:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

X_L è la reattanza induttiva misurata in Ω , f la frequenza, L il coefficiente di autoinduzione della bobina misurata in Henri.

In regime di corrente alternata, la bobina, al contrario del condensatore, presenta maggiore resistenza quanto maggiore è la frequenza.

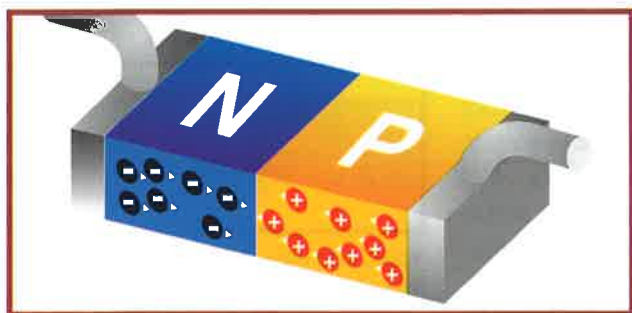
Il diodo semiconduttore

I SEMICONDUTTORI P E N

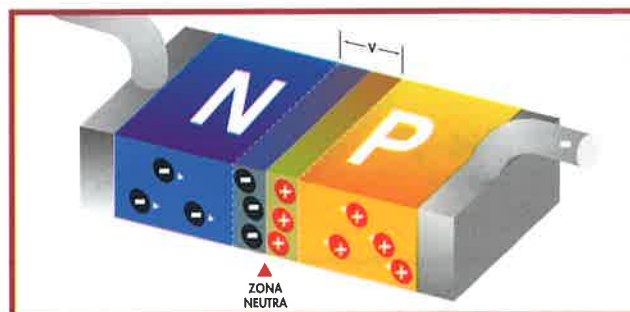
I componenti elettronici attivi, diodi e transistor, sono costruiti con materiale semiconduttore, e non presentano un comportamento lineare quando sono attraversati da corrente elettrica. I materiali semiconduttori puri maggiormente usati sono: il silicio e il germanio, caratterizzati dall'aver quattro elettroni nell'ultima orbita atomica. Dato che la struttura non è stabile con soli quattro elettroni nell'orbita di valenza, questi materiali hanno la proprietà di dividere i loro quattro elettroni con i quattro atomi che li circondano, raggiungendo così una struttura stabile con otto elettroni periferici che li fa comportare come materiale isolante.

Se a un semiconduttore puro, di struttura molto stabile, vengono aggiunti degli atomi di impurezze che abbiano sulla loro ultima orbita tre o cinque elettroni, questi andranno a occupare il posto degli altri atomi semiconduttori che avevano quattro elettroni periferici. Quando un atomo di semiconduttore puro deve condividere elettroni con un atomo di impurezza, (detto anche materiale drogante), e quest'ultimo ha tre elettroni nell'orbita di valenza, ne manca uno per diventare stabile. L'assenza di un elettrone, si chiama "lacuna". Se l'atomo di impurezza ha cinque elettroni rimane un elettrone libero.

I semiconduttori di tipo P subiscono il drogaggio con atomi di impurezza trivalente nella struttura atomica del semiconduttore puro. Per ogni atomo di impurezza si crea una lacuna. Se gli atomi di impurezza sono pentavalenti, il semiconduttore che si ottiene si chiama tipo N, in esso per ogni atomo di impurezza si crea un elet-



Gli elettroni maggioritari della zona N si dirigono verso la zona P, e le lacune di questa verso la zona N.



L'unione degli elettroni liberi della zona N con le lacune della zona P genera una zona neutra, la zona N viene caricata positivamente e la zona P negativamente.

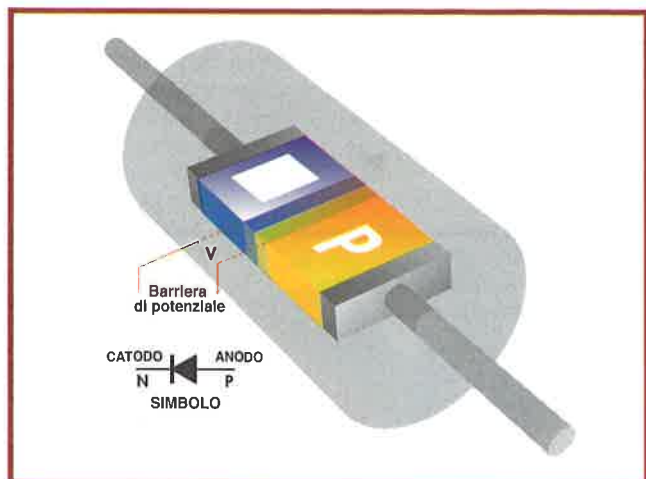
trone libero. Riassumendo, i semiconduttori tipo P hanno un sovrannumero di lacune, cioè gli mancano degli elettroni. Ai semiconduttori tipo N avanzano degli elettroni liberi nella struttura atomica.

LA GIUNZIONE N-P

Nei semiconduttori tipo P, ci sono molte lacune libere, (maggioritarie) e alcuni elettroni liberi (minoritari) originati dall'energia termica. Al contrario, nei semiconduttori tipo N ci sono molti elettroni liberi (maggioritari) e pochissime lacune (minoritarie). Se si uniscono i due tipi di semiconduttori, la legge della diffusione tende a equilibrare la concentrazione di portatori di carica, e di conseguenza si origina una corrente di elettroni maggioritari nella zona N che si dirigono verso la zona P, e una corrente di lacune dalla zona P verso la N. Incontrandosi nell'area di contatto, gli elettroni liberi con le lacune formano una zona neutra stabile, allo stesso tempo la zona N perdendo elettroni si carica positivamente e la zona P perdendo lacune si carica negativamente.

IL DIODO SEMICONDUTTORE

È l'unione di un semiconduttore tipo N con un altro di tipo P. Nella zona di unione si crea una zona neutra, e dal lato N si genera un potenziale positivo per la perdita di elettroni, mentre dal lato P si genera un potenziale negativo per la perdita di lacune. Questo voltaggio tra i due tipi di semiconduttori, si chiama "barriera di potenziale", e diventa sufficientemente elevato per impedire che prosegua l'unione degli elettroni con le lacune.



Un diodo semiconduttore è l'unione di un semiconduttore tipo N con un altro tipo P. Questa unione genera una zona neutra all'interno della quale vi è la barriera di potenziale.

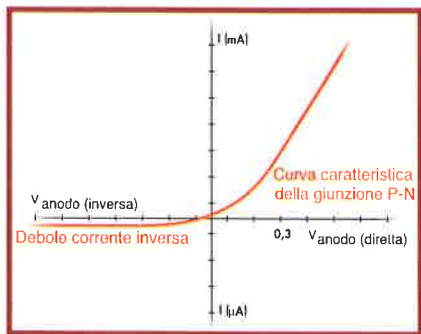


Quando un diodo si polarizza direttamente si comporta come un conduttore e circola una corrente elevata. Se si polarizza inversamente opera come un isolante e circola una corrente trascurabile.

POLARIZZAZIONE DIRETTA E INVERSA

Se esternamente applichiamo al diodo una tensione che vinca la barriera di potenziale, si elimina la causa che impedisce il proseguire delle unioni degli elettroni della zona N con le lacune della zona P, e si produce una corrente di portatori maggioritari in entrambe le direzioni. Questa forma di polarizzazione del diodo si chiama diretta, e alla zona N, che si chiama catodo, si applica il polo negativo; mentre alla zona P, anodo, il positivo. Dato che la barriera di potenziale vale circa 0,7 V, bisogna applicare esternamente una tensione uguale o maggiore perché si uniscano i portatori di carica, e la giunzione N-P si comporti come conduttrice.

Nella polarizzazione inversa, si invertono i poli della tensione esterna: negativa all'anodo e positiva al catodo. In questo modo si rinforza la barriera di potenziale e si rende più difficile l'unione dei portatori maggioritari delle due zone. Circola solo una trascurabile corrente inversa, prodotta dai pochi portatori minoritari che ci sono nelle due zone. Il diodo si comporta come un isolante.



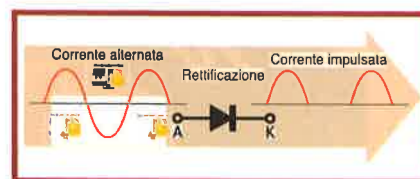
Curva caratteristica del comportamento di un diodo.

CURVA CARATTERISTICA

Se si applica al diodo una tensione il cui polo positivo è collegato all'anodo, e il negativo al catodo, esso si comporterà come un conduttore in modo che quanta più tensione diretta si applicherà, tanta più corrente circolerà. Se si cambia la polarizzazione, il diodo si comporta come un isolante, e circolerà solo una corrente trascurabile dovuta ai portatori minoritari, sempre presenti nei semiconduttori, a causa dell'agitazione termica.

APPLICAZIONI DEL DIODO: LA RETTIFICAZIONE

Grazie al comportamento del diodo semiconduttore, che cambia radicalmente quando si inverte la polarizzazione esterna, l'applicazione principale a cui sono destinati è rettificare la corrente alternata, ovvero lasciare che dei due semicicli di questa corrente ne passi uno soltanto, che sarà quello che corrisponde alla polarizzazione diretta. L'eliminazione di uno dei due semicicli della corrente alternata, è il primo passo che si compie per trasformare la corrente alternata in continua.



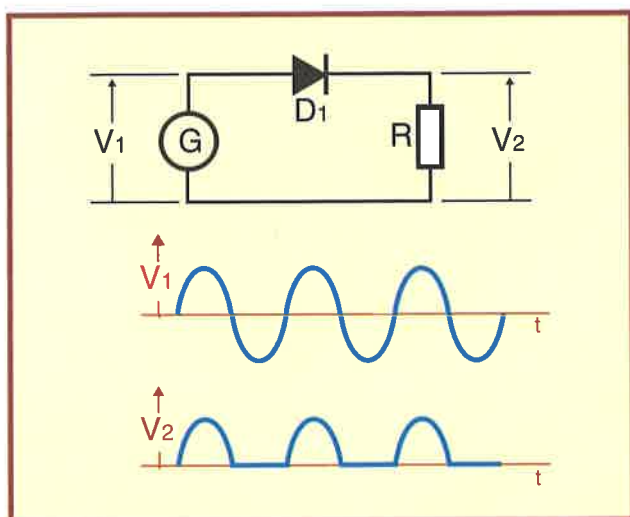
Applicando corrente alternata a un diodo passa solo un semiciclo, il quale polarizza direttamente la giunzione N-P. L'eliminazione di un semiciclo dalla c.a. si chiama rettificazione.

Diodi rettificatori

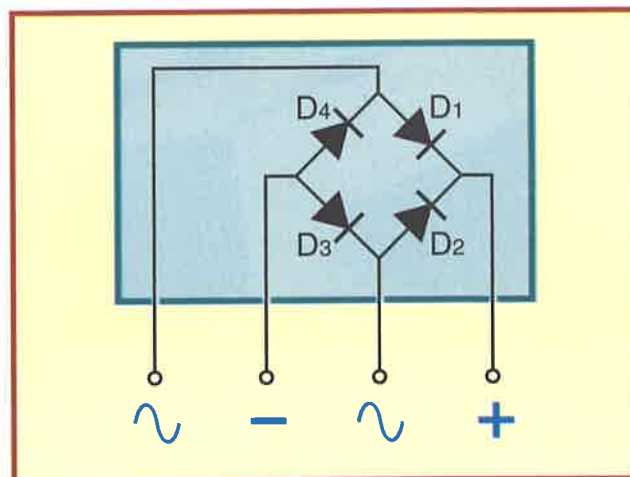
La principale applicazione dei diodi semiconduttori è la rettificazione della corrente alternata. Le compagnie di distribuzione la forniscono - per loro convenienza - in forma alternata e, in Europa, più precisamente a 220 V e 50 Hz. Gli apparecchi elettronici come i televisori, i computers e i robots funzionano con corrente continua, pertanto devono avere un circuito che trasformi la corrente alternata in continua. Questo circuito si chiama "alimentatore". Per poter compiere questa opera di trasformazione è indispensabile l'utilizzo del diodo semiconduttore, il quale elimina uno dei due semicicli della corrente alternata. Con un solo diodo si rettifica un semiciclo, o una semionda (che dir si voglia); questo circuito si chiama rettificatore a semionda. Con due diodi e un trasformatore, il cui secondario abbia una presa intermedia, si ottiene un rettificatore a onda completa, che sfrutta entrambe le semionde della c.a.

IL PONTE DI GRAETZ

Quattro diodi semiconduttori collegati in un modo particolare, denominato Ponte di Graetz, permettono di costruire un rettificatore a onda completa; però senza la necessità di utilizzare un trasformatore speciale che disponga di una presa intermedia sul secondario. Questi



Rettificatore a semionda.

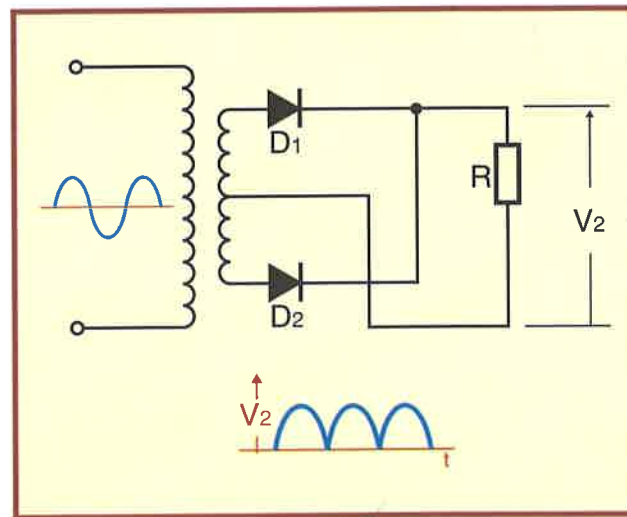


Rettificatore a ponte di Graetz e identificazione dei terminali esterni.

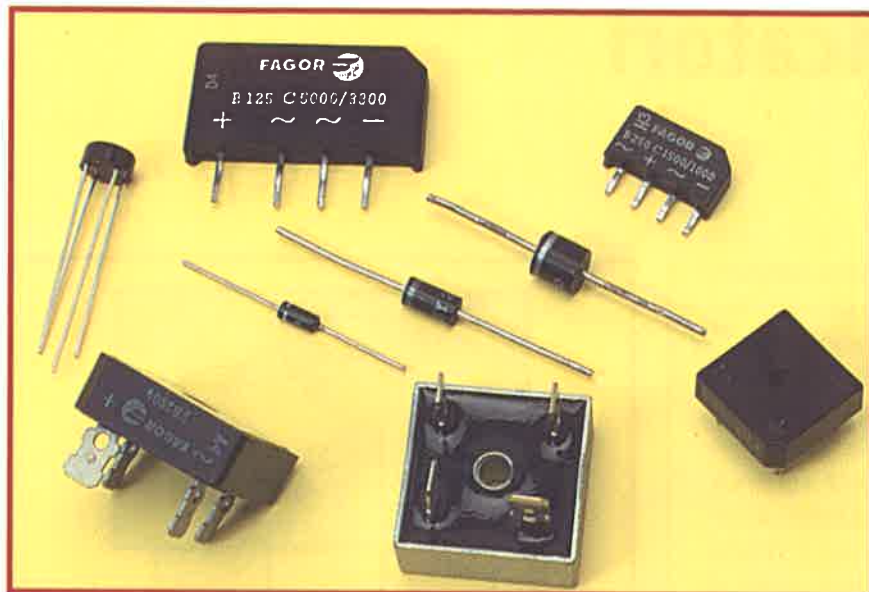
ponti sono componenti di utilizzo molto comune, e vengono commercializzati in un contenitore che ha al suo interno i quattro diodi già collegati.

DIODI LED ELETTROLUMINESCENTI

All'interno della vasta gamma di diodi semiconduttori, oltre ai diodi rettificatori meritano un cenno particolare quelli che emettono luce quando sono attraversati da



Rettificatore a onda completa con due diodi.



Il catodo dei LED corrisponde alla zona piatta della capsula.

Diodi rettificatori semplici e contenitori con rettificatori a ponte di Graetz.

corrente elettrica. Generalmente sono fabbricati con Arseniuro di Gallio, e quando attraverso di essi circola una corrente da 1 a 10 mA emettono una luce proporzionale alla corrente stessa.

Perché emettano luce deve circolare della corrente, e devono essere polarizzati direttamente. In serie ad es-

si viene collocata una resistenza di limitazione, dato che il LED necessita di una tensione da 1,2 a 2 V per vincere la barriera di potenziale, il resto della tensione cadrà sulla resistenza, che determinerà quindi il valore della corrente circolante. La capsula che contiene il LED ha una parte piatta, che si usa per identificare il catodo.



Differenti modelli di diodi luminescenti e display a 7 segmenti che li utilizzano.

Il transistor

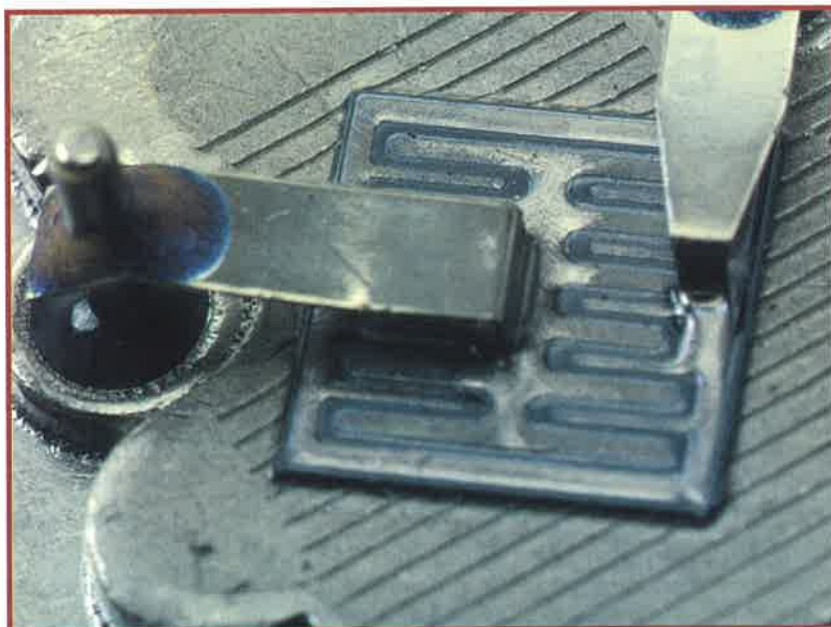
La straordinaria scoperta che diede il via all'elettronica, venne fatta nel 1947, quando i ricercatori Bardeen e Brattain presentarono al mondo il transistor. Infatti, sino a quel momento, per amplificare i segnali elettrici si usavano le valvole. Le valvole sono ampole di vetro ermeticamente chiuse, dalle quali viene estratta l'aria che permette agli elettroni di circolare più liberamente. Gli elettroni vengono prodotti, riscaldando a diverse centinaia di gradi, un metallo dall'alto potere di emissione che si chiama catodo. Di fronte al catodo un altro metallo dalla forma cilindrica, l'anodo, si polarizza direttamente e attrae gli elettroni emessi dal catodo surriscaldato. La valvola formata da catodo e anodo si comporta nello stesso modo di un diodo semiconduttore. Per ottenere l'amplificazione, fra il catodo e l'anodo viene introdotta una spira metallica alla quale si applica il segnale da amplificare, chiamata griglia.

La valvola amplificatrice con catodo, anodo e griglia si chiama triodo. Le valvole erano, e restano, molto costose da costruire, lavorano con alte temperature che influenzano tutti gli elementi circostanti, consumano molta energia e hanno una vita limitata, dato che l'emettitore di elettroni ha una vita media di 20.000 ore.

Il transistor è un minuscolo pezzo di materiale semiconduttore, o chip, che realizza la stessa funzione del triodo; ha però una durata illimitata, consuma pochissima energia, lavora con basse temperature, ed è molto economico. È un piccolo grano di silicio incapsulato con tre piedini.

STRUTTURA INTERNA

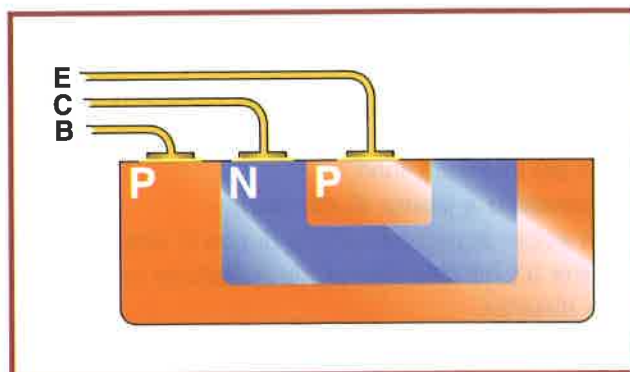
Il transistor è formato da tre strati alternati di semiconduttore di tipo N e P, per questo esistono due tipi di transistor, NPN e PNP. Ogni strato di semiconduttore è



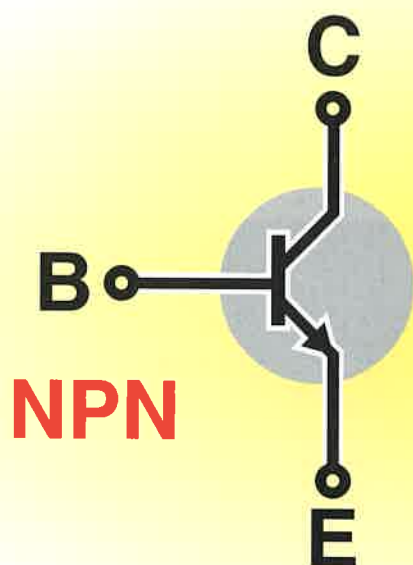
Il chip di un transistor 2N3055 è di 5x5 mm, e su di esso si saldano gli elettrodi che si collegano ai piedini del componente.

un elettrodo, i tre strati si chiamano: emettitore, base e collettore, e sono collegati ognuno ad un piedino esterno del componente. Anche se il comportamento dei due tipi di transistor è lo stesso, il verso delle correnti che li attraversano - così come le polarità delle tensioni che li alimentano - sono contrari nell'NPN e nel PNP.

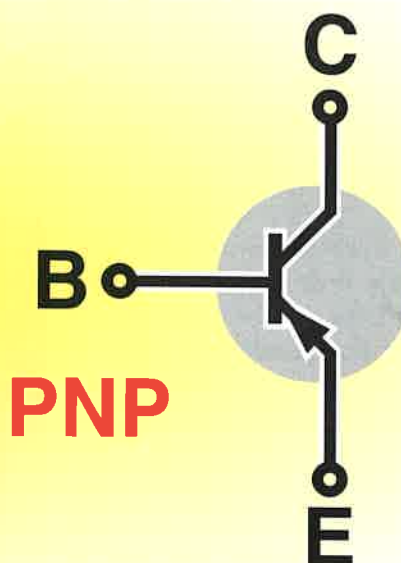
I simboli che rappresentano i due tipi di transistor si differenziano solo per il verso della freccia, che identifi-



Struttura interna del transistor PNP con i suoi tre elettrodi.



NPN



PNP

Nel simbolo del transistor NPN della figura, l'emettitore ha la freccia rivolta verso l'esterno, al contrario del PNP.

ca l'emettitore. Negli NPN punta verso l'esterno, mentre nel caso dei PNP punta verso l'interno. I due tipi di transistor hanno una proprietà in comune: la corrente di emettitore è uguale alla somma della corrente di collettore più quella della base.

I contenitori dei transistor adottano forme diverse tra loro, ma tutti hanno dei riferimenti per distinguere chiaramente i tre elettrodi.

Nella figura viene mostrata la disposizione dell'emettitore della base e del collettore nel contenitore di alcuni transistor molto comuni.

TIPI DI TRANSISTOR E LORO FABBRICAZIONE

L'utilizzo massiccio dei transistor ha incentivato lo sviluppo continuo dei metodi di fabbricazione, così come delle loro caratteristiche. La ricerca ha generato differenti processi di fabbricazione, permettendo l'esistenza di numerosi fabbricanti, con ampie gamme di modelli, che coprono tutte le applicazioni. I processi di fabbricazione più impiegati sono:

1. Transistor a punta di contatto.

In un pezzo di semiconduttore di tipo P, vengono fatte incidere a pressione due punte metalliche separate da poca distanza.

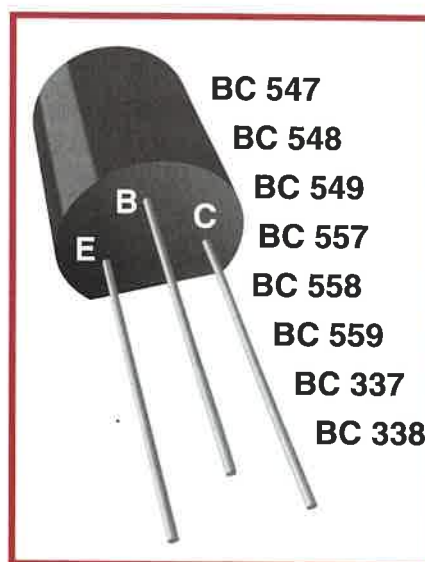
2. Transistor a fusione.

Sopra un pezzo di semiconduttore di tipo N, ad esempio, si collocano due pezzi di impurezza trivalente, che

vengono fatti diffondere riscaldandoli ad alta temperatura.

3. Transistor a fusione diffusa.

Sopra un supporto di semiconduttore tipo P, che sarà il collettore, si deposita un pezzo di materiale N che formerà la base, e un altro di tipo P che formerà l'emettitore, procedendo poi alla fusione ad alta temperatura.



Distribuzione degli elettrodi e dei corrispondenti piedini di un contenitore di transistor di uso comune.

4. Transistor a tecnica epitassiale.

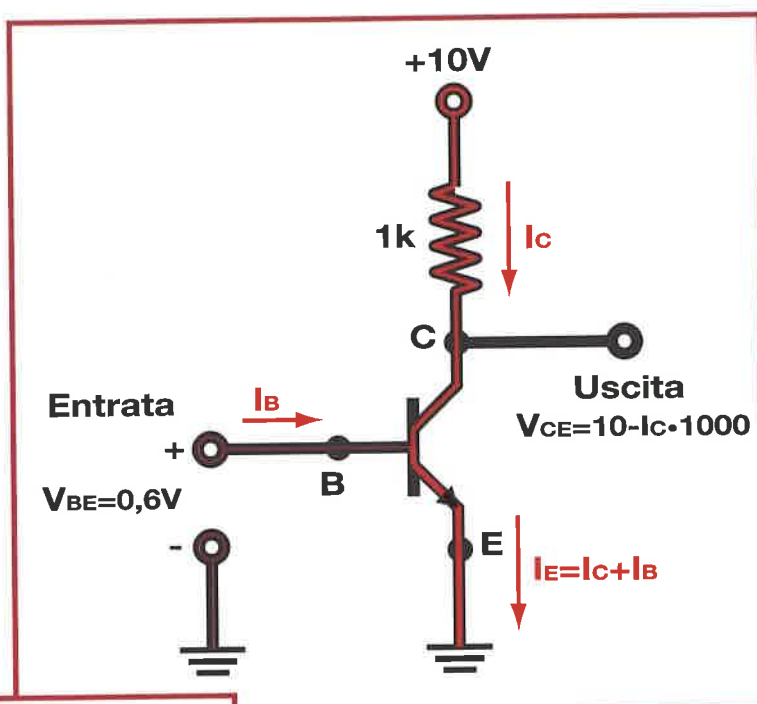
Si basa sul controllo delle impurità che vengono depositate sul cristallo semiconduttore.

5. Transistor a tecnica planare.

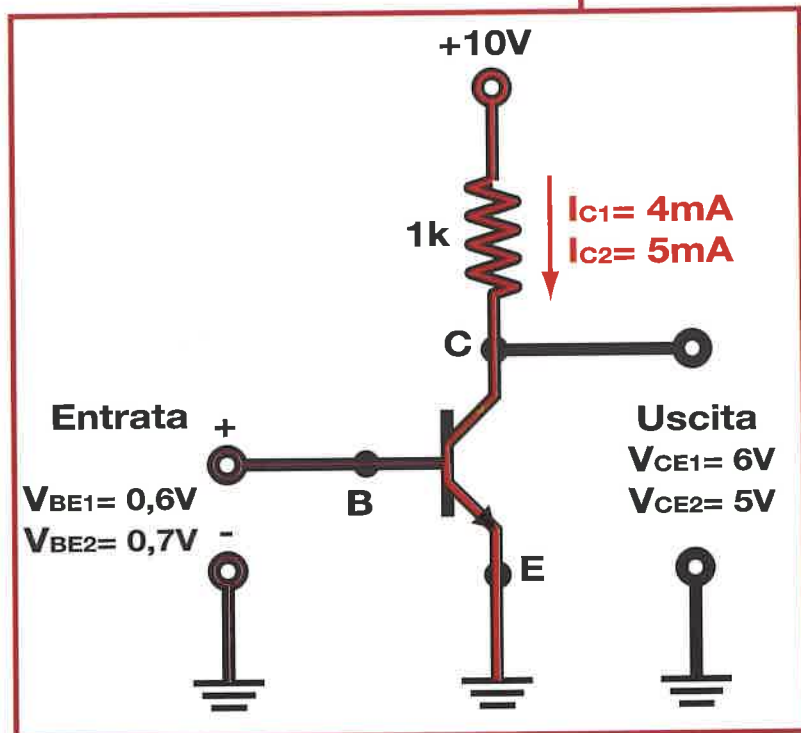
Si basa sull'ossidazione di tutte le superfici per ottenere un isolamento perfetto.

Funzionamento del transistor

Se si polarizza direttamente la giunzione base/emettitore di un transistor, si produce una corrente elettronica nell'emettitore, che si distribuisce nella base e nel collettore. Se il collettore è fortemente polarizzato, per attrarre la corrente di emettitore, la maggior parte di questa corrente passerà ad esso, e nella base che è polarizzata in modo debole ne rimarrà solo una piccola parte. Nella figura si mostra un transistor NPN, con la base polarizzata direttamente, con una piccola tensione positiva rispetto all'emettitore, questo dà origine ad una corrente I_E , la quale si distribuisce in modo che una piccola parte circoli attraverso la base I_B , e il resto, I_C , attraverso il collettore, che ha una forte polarizzazione positiva. Si deve verificare che $I_E = I_B + I_C$.



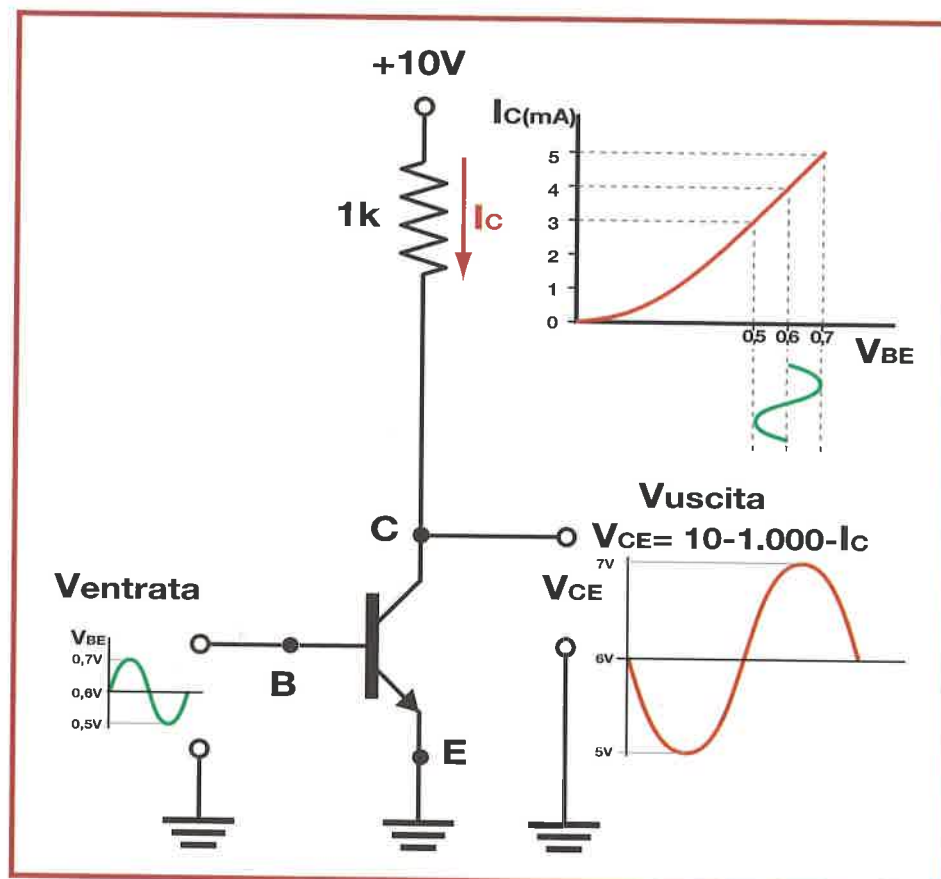
La tensione di uscita V_{CE} , è uguale a quella di alimentazione meno quella che viene assorbita dalla resistenza di carico, che dipende da I_C .



Salendo di 0,1 V la tensione di ingresso (da 0,6 a 0,7) I_C aumenta da 4 a 5 mA, di conseguenza la tensione di uscita passa da 6 a 5 V.

L'EFFETTO AMPLIFICATORE

Variando leggermente la polarizzazione della base, V_{BE} , si modifica il valore delle tre correnti del transistor. Quella della base cambia poco, data la piccola polarizzazione della sua unione NP con l'emettitore; avremo invece una forte variazione su quella del collettore, data l'elevata tensione che viene applicata a questo elettrodo. Le grandi variazioni di corrente del collettore provocano grandi cambiamenti nella tensione assorbita dalla resistenza di carico; questo causa delle importanti variazioni della tensione V_{CE} . In conclusione, piccoli cambiamenti della tensione di ingresso (base) originano grandi variazioni della tensione di uscita (collettore).



Una variazione di 0,1 V di picco dell'alternata nell'ingresso, provoca una variazione da 3 a 5 mA nella corrente di collettore.

analizzato amplifica 10 volte le variazioni di tensione che si producono al suo ingresso, invertendone però il segno; infatti il segno "-", indica che quando la tensione di ingresso sale, quella di uscita scende, cioè viene invertita.

Se all'ingresso del circuito che stiamo studiando, si applica un segnale di corrente alternata da 0,1 V di valore di picco, e si suppone che la tensione V_{BE} sia polarizzata con tensione fissa di 0,6 V, la corrente del collettore passa da 3 a 5 mA in entrambi i picchi della tensione alternata.

La variazione di 0,1 V in ogni semionda nella tensione di ingresso, provoca una variazione da 3 a 5 mA nella corrente di collettore che si traduce in un cambio della tensione di uscita V_{CE} da 7 a 5 V. Osservando con attenzione la figura riprodotta qui sotto vediamo lo sfasamento di 180° fra la tensione di ingresso e di uscita, e il valore dieci volte superiore della tensione di uscita rispetto a quella di ingresso.

Nello schema della figura in alto, una variazione di 0,1 V nella tensione d'ingresso V_{BE} , origina una variazione di 1V sull'uscita.

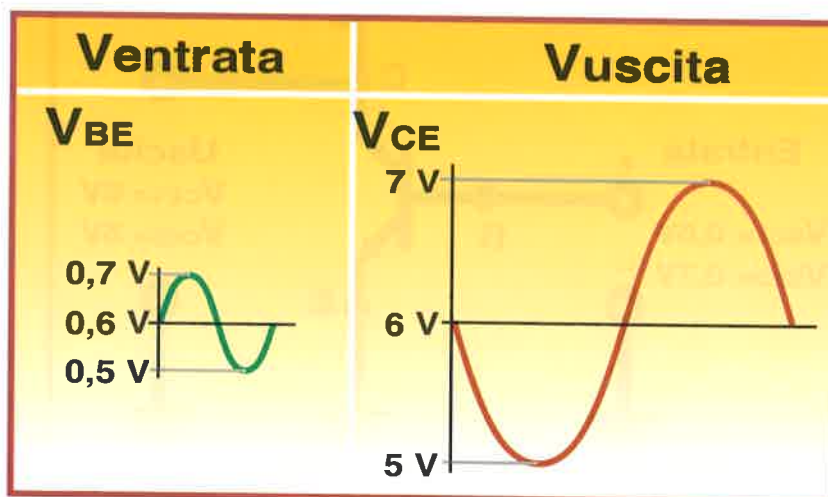
sione di ingresso e di uscita, e il valore dieci volte superiore della tensione di uscita rispetto a quella di ingresso.

CALCOLO DELL'AMPLIFICAZIONE

L'amplificazione di tensione di un transistor si ottiene dividendo l'incremento della tensione in uscita per quella corrispondente all'ingresso. Nel circuito della figura la tensione in uscita varia da 6 a 5 V, cioè 1 V, mentre la variazione della tensione di ingresso va da 0,6 a 0,7 V, che equivale a 0,1 V.

$$\text{AMPLIFICAZIONE DI TENSIONE} = \frac{(V_{CE} / V_{BE})}{(5 - 6) / (0,7 - 0,6)} = -10$$

Il valore di amplificazione di tensione è di -10, questo significa che il circuito



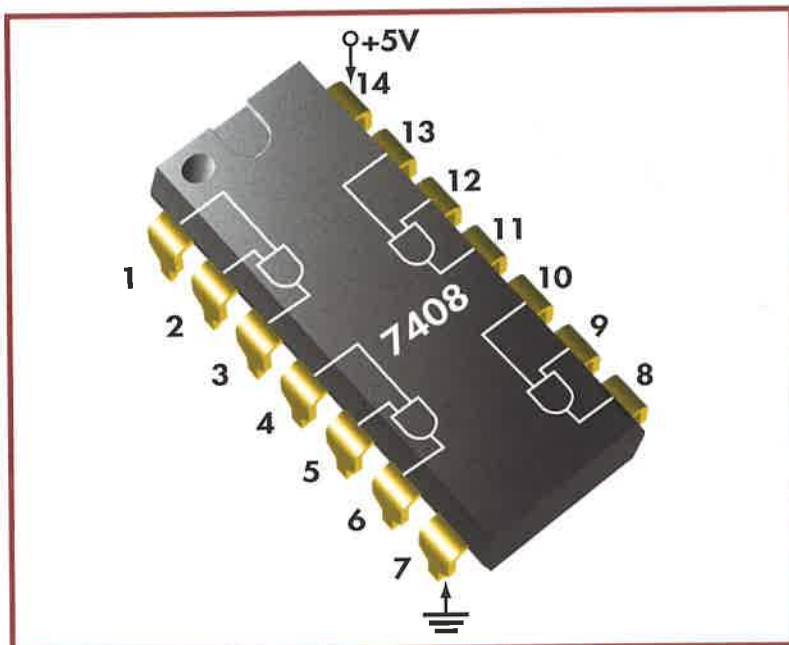
La tensione di uscita è sfasata di 180° rispetto a quella di ingresso ed è 10 volte superiore.

Che cos'è un circuito integrato?

È una pastiglia che può essere composta da materiale plastico, ceramico o metallico, all'interno del quale vi è un piccolo pezzo di silicio chiamato "chip". Su questo sono stati costruiti transistor, diodi, resistenze e altri componenti elettronici, interconnessi fra di loro, per formare un circuito funzionale completo.

I piedini del circuito integrato servono per connettere con l'esterno gli ingressi e le uscite del circuito interno. Nella figura si mostra un contenitore di circuito integrato, chiamato DIP (Dual In-line Package) perché ha i piedini disposti in doppia fila.

Sopra la superficie del contenitore c'è un segno, o riferimento, che serve per determinare la numerazione dei piedini. Si inizia col piedino 1 a sinistra del segno di riferimento, e si segue numerando ordinatamente gli altri piedini in senso antiorario.



Schema dei collegamenti del circuito integrato 7408, che contiene quattro porte AND a due ingressi.



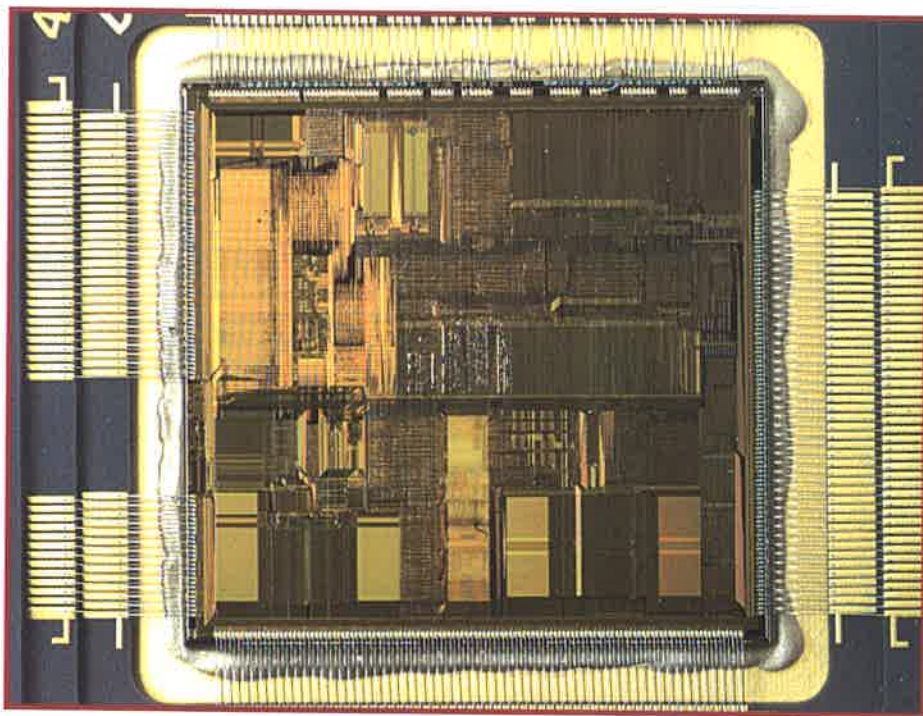
Contenitore del circuito integrato DIP, a doppia fila di piedini, la cui numerazione si determina seguendo il riferimento.

SCHEMA DEI COLLEGAMENTI

Ogni piedino del circuito integrato ha assegnato un'uscita o un ingresso del circuito interno, e serve per collegare quest'ultimo con l'esterno. Si differenziano fra di loro perché ognuno riceve un numero specifico.

Lo schema di collegamento permette all'utente di conoscere il compito di ogni piedino, in modo da poterlo collegare correttamente. Nella figura è rappresentato il circuito integrato digitale 7408, che dispone internamente di quattro circuiti che formano delle porte AND.

Ognuna di queste porte consta di due piedini per l'ingresso e uno per l'uscita. Inoltre i piedini 14 e 7 servono per ricevere l'alimentazione a corrente continua, di cui hanno bisogno i componenti elettronici per funzionare.



L'interno del circuito integrato Pentium composto da vari milioni di transistor.

cio e formano le zone N e P. Ordinando adeguatamente la creazione degli strati alternati di semiconduttore, si costruiscono resistenze, diodi e transistor.

LO STATO DELL'ARTE

Per fornire un quadro complessivo del livello attuale della tecnologia di costruzione dei circuiti integrati, partendo dall'inizio del XXI secolo, facciamo riferimento all'evoluzione storica della famiglia dei microprocessori più usata nel mondo. Si tratta della famiglia x86 di INTEL. Il padre di questa famiglia si può considerare il microprocessore 386, che apparve nel 1985, aveva 275.000 transistor ed era fabbricato con una tecnologia che superava il micron. Si alimentava con una tensione di 5

VDC e consumava 2,5 W. Quattro anni dopo arrivò il 486 che conteneva più di un milione di transistor, esattamente 1.200.000 e utilizzava tecnologia ad 1 micron. Altri quattro anni dopo, nel 1993, si presentò sul mercato mondiale il Pentium classico, che è stato prodotto in innumerevoli modelli fino ad oggi.

Presentiamo i dati rilevanti di questa gamma di microprocessori, che non è ancora terminata e che ogni anno presenta nuovi modelli diversi, migliorando i suoi rendimenti e i suoi prezzi.

Questa vertiginosa corsa tecnologica, a volte disorienta gli utilizzatori, che hanno l'impressione, subito dopo aver acquistato un determinato modello, che questo sia già stato superato da un altro più veloce e più economico.

FABBRICAZIONE

Un circuito integrato contiene milioni di transistor, e ogni anno questo numero aumenta. Il circuito integrato chiamato Pentium è un microprocessore che costituisce il cervello del nostro Personal Computer o PC. La prima versione del Pentium risale al 1997 e conteneva 3,1 milioni di transistor.

Era fabbricato con tecnologia a 0,8 micron. Quelli attuali si fabbricano con una tecnologia di circa 0,1 micron e contengono un numero di transistor quattro volte superiore.

Per fabbricare un circuito integrato si parte da un cristallo di silicio a forma di lingotto cilindrico, che successivamente viene tagliato in fette denominate wafer. Il wafer viene lavorato e ispezionato con l'ausilio del microscopio elettronico – dato che deve raggiungere una purezza totale per il corretto funzionamento di tutti i chips che da esso si otterranno –, sopra il wafer vengono create le regioni N e P mediante la diffusione di un materiale gassoso pentavalente o trivalente in un forno ad elevata temperatura.

Gli atomi del gas penetrano nella struttura del semiconduttore di sili-

Modelli di microprocessori	Anno	Milioni di transistor	Tecnologia (micron)
Pentium	1993	3,1	0,8
Pentium-Pro	1995	5,5 + 15,5 (Cache)	0,6
Pentium MMX	1997	4,5	0,35
Pentium II	1997	7,5	0,25
Pentium III	1999	9,5	0,18
Pentium IV	2000	42	0,18

Vantaggi ed inconvenienti

Grazie ai progressi tecnici nella costruzione dei circuiti integrati, si è arrivati ad inglobare un computer completo all'interno di ognuno di essi. Questo circuito integrato si chiama microprocessore, e diventerà il cervello del nostro robot incaricandosi di governare e gestire i suoi movimenti, e di ricevere e processare tutte le informazioni che gli forniranno i suoi sensori.

Però non è tutto così semplice nei circuiti integrati, perché anch'essi hanno limitazioni ed esigenze.

Vantaggi

1°. Costo ridotto

2°. Aumento dell'affidabilità

3°. Risposta più rapida

4°. Riduzione delle capacità parassite

5°. Riduzione degli stocks

6°. Migliori caratteristiche di funzionamento

7°. Eliminazione dei difetti di montaggio

Inconvenienti

1°. Valori dei componenti passivi limitati e con grandi tolleranze

2°. Potenza massima dissipabile limitata

3°. Impossibilità a contenere bobine

4°. Problemi di fornitura nei paesi non produttori

5°. Necessitano di strumentazioni più complesse

6°. Maggiori difficoltà di utilizzo

TIPI DI CIRCUITI INTEGRATI

I circuiti integrati si possono classificare in molti modi, secondo le loro caratteristiche. Di seguito esponiamo alcune delle più comuni:

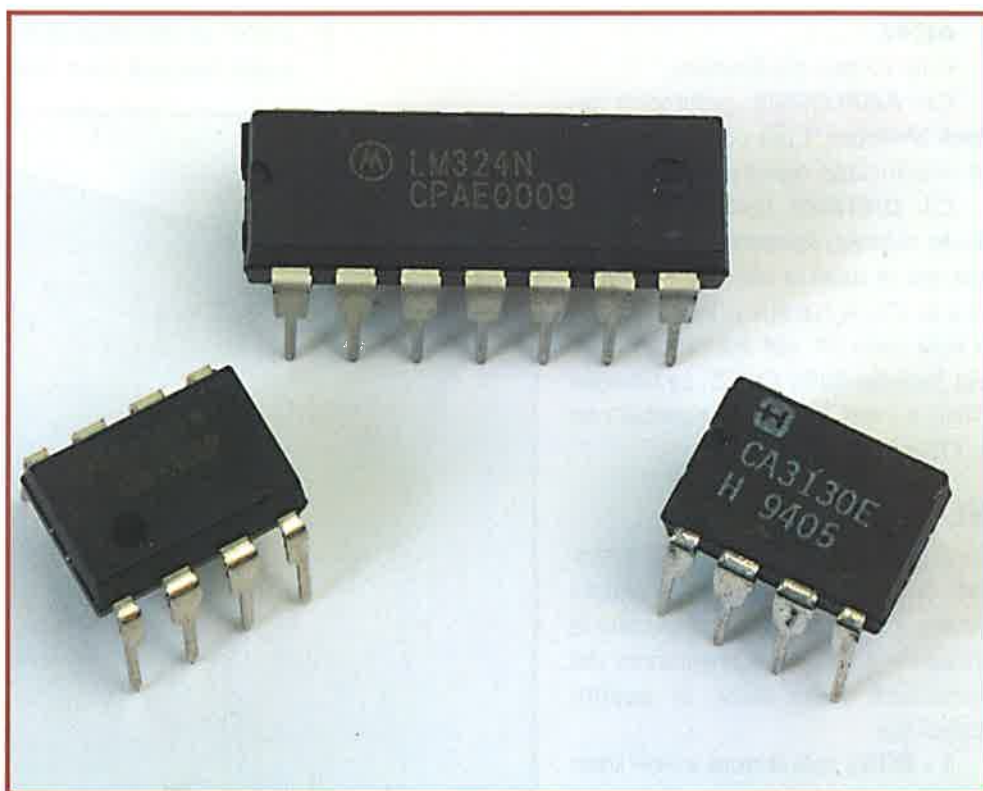
- *Per livello di integrazione:*

SSI: piccola scala di integrazione. Un massimo di 12 porte per circuito integrato.

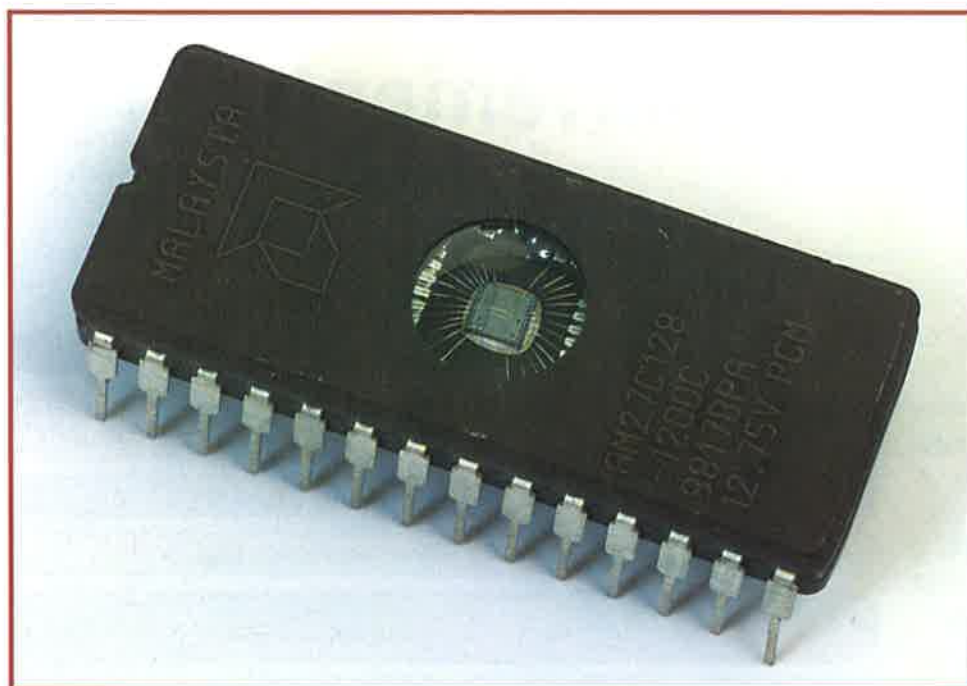
MSI: media scala di integrazione. Da 12 a 100 porte.

LSI: alta scala di integrazione. Da 100 a 1.000 porte.

VLSI: altissima scala di integrazione. Più di 1.000 porte.



Circuiti integrati analogici.



Memoria EPROM con finestra in cristallo per la cancellazione dell'informazione.

- Per tecnologia di fabbricazione:

BIPOLARI: contengono transistor bipolari.

CMOS: transistor CMOS.

ALTRE.

- Per le loro applicazioni:

C.I. ANALOGICI: gestiscono segnali analogici, i più conosciuti sono gli amplificatori operazionali.

C.I. DIGITALI: lavorano con segnale digitale. Esistono molte famiglie, tra le quali la più rappresentativa è la TTL, le cui due prime cifre della sigla sono 74, per esempio il 7408 e la famiglia 4000 CMOS. Le famiglie 74HC e 74HCT sono compatibili con la TTL e la CMOS.

MEMORIE

Sono circuiti integrati digitali, incaricati di immagazzinare informazioni binarie e si usano per memorizzare le istruzioni e i dati dei programmi dei computers. Sono divise in quattro grandi tipi:

1 - ROM: sola lettura e non sono volatili.

2 - RAM: si possono leggere e

scrivere ma sono volatili.

3 - EPROM: si possono leggere e scrivere, non sono volatili. Per cancellarle si sottopongono ai raggi ultravioletti.

4 - FLASH ED EEPROM: si possono leggere e scrivere, non sono volatili.

MICROPROCESSORI E MICROCONTROLLORI

Nel caso dei microprocessori, il chip del circuito integrato contiene il processore, mentre nel caso dei microcontrollori, contiene tutti gli elementi del computer. Hanno milioni di transistor e il loro impiego ha permesso la costruzione di computer piccoli ed economici, inoltre

consentono di poter controllare molti sistemi e prodotti con un computer.

Il PIC appartiene alla famiglia dei microcontrollori, anche se nel linguaggio tecnico corrente, e anche in questi fascicoli sono usati entrambi i termini.



Microprocessore 486 di Intel.

La logica e il sistema binario

Una grandezza digitale è quella che varia a intervalli discreti, a salti, non ammette qualsiasi valore, se non quelli determinati che sono separati fra di loro da incrementi fissi. Se si ammettono vari valori si dice che un sistema è digitale multivalente, mentre se si ammettono solo due valori possibili è denominato bivalente o binario.

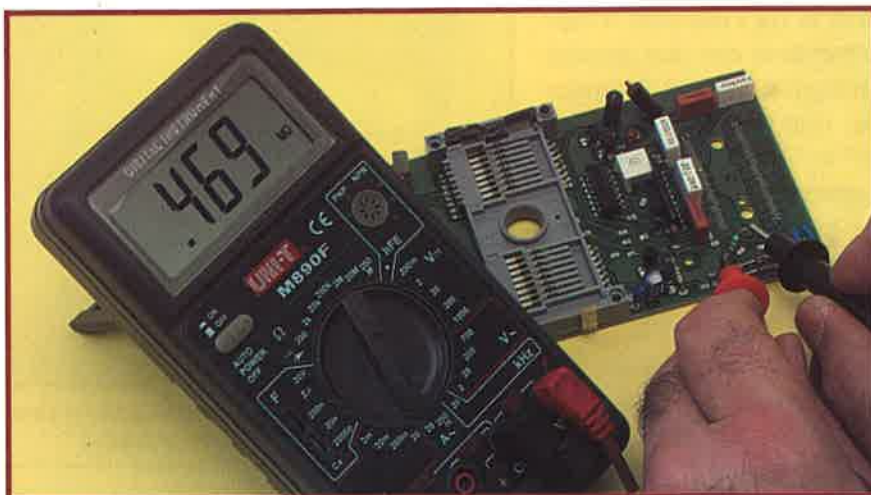
Una grandezza analogica è quella che ammette qualunque valore compreso fra i due limiti. Un voltmetro digitale ha un display che ammette un determinato numero di digits. Si tratta di un sistema digitale multivalente.

Il voltmetro analogico dispone di una lancetta indicatrice che può assumere qualsiasi posizione tra i due estremi della scala di misura. È un sistema analogico.

La grandezza analogica ammette infiniti valori possibili, mentre quella digitale ammette solo un numero limitato di valori.

VANTAGGI DEL SISTEMA DIGITALE

La maggior parte delle grandezze che esistono nel mondo reale, come la temperatura, la luce, l'umidità eccetera, sono analogiche. Comunque esprimere una

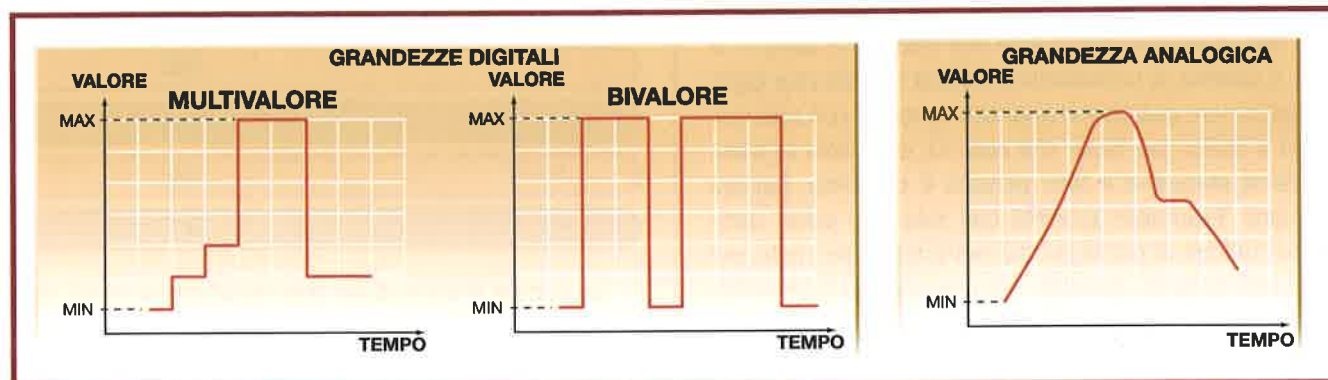


Il multimetro può rappresentare solo le misure permesse dai digits del suo display.

grandezza in forma digitale, ha quattro importanti vantaggi, che sono stati determinanti nell'utilizzo del computer.

VANTAGGI DELLA MISURA DIGITALE

- 1°. I circuiti digitali sono più semplici ed economici.
- 2°. L'informazione digitale si gestisce facilmente.
- 3°. La precisione dei sistemi digitali può essere tanto precisa, quanto si desidera.
- 4°. Sono più resistenti ai disturbi esterni.



Espressione grafica delle grandezze digitali e analogiche.

ELETTRONICA DIGITALE

L'elettronica digitale si caratterizza con il fatto che tutti i suoi componenti e circuiti funzionano unicamente con due stati. Sono sistemi bivalenti in cui i due stati si rappresentano con due possibili voltaggi o margini di tensione. Uno stato si chiama "alto" o "1", e i componenti lo rappresentano con il voltaggio massimo. L'altro si chiama "basso" o "0" ed è rappresentato dal voltaggio minimo, che in genere è la massa. È molto comune lavorare con una tensione di alimentazione ai circuiti digitali di + 5 VDC, in questo caso il voltaggio alto è rappresentato da + 5 V e quello basso da 0 V. In realtà questi livelli logici non sono così rigidi e il livello alto comprende un margine di tensione tra 2 e 5 V, mentre quello basso oscilla tra 0 e 0,8 V, parlando di livelli di ingresso.

IMPORTANZA DEL SISTEMA DI NUMERAZIONE BINARIO

Siamo abituati sin dalla nostra infanzia, ad utilizzare il sistema decimale, che ha una delle sue ragioni nel numero delle dita delle nostre mani. Ci appare semplice e comodo, però è formato da dieci digits differenti, che uniti ordinatamente rappresentano le quantità che vogliamo.

Le macchine digitali e i computer sono i maggiori esponenti del sistema a numerazione binaria, funzionano unicamente con due stati logici. Per rappresentare i due stati ci servono solamente due valori, che sono l'1 e lo 0. Il sistema di numerazione binaria ha solo due digits per esprimere qualunque quantità. Lavorare con solo due valori è molto più facile che con 10, ed è solo la mancanza di abitudine a farci pensare il contrario; basterà abituarsi. Esprimere quantità con solo due valori comporta l'utilizzo di più digits che nel sistema decimale, per esprimere la stessa quantità. Per esempio, da 0 a 9 nel sistema decimale si rappresenta con un solo digit. In binario possiamo rappresentare con un solo digit 0 e 1. Se vogliamo esprimere 2 dovremo unire due digits in forma 10. Per il 3 diventano 11 e con questo abbiamo esaurito



I circuiti digitali sono costruiti con componenti elettronici che lavorano con due stati: uno al massimo voltaggio e l'altro al minimo.

le possibilità a disposizione con solo due digits binari, così per il 4 ne useremo tre e sarà rappresentato da 100.

DECIMALE	BINARIO
1	0
1	1
2	10
3	11
4	100
5	101
6	110
7	111
8	1000
9	1001
10	1010
11	1011

Le regole matematiche per realizzare somme, sottrazioni e moltiplicazioni utilizzando solo due valori sono molto semplici, ad esempio le regole per la somma saranno: $0+0=0$; $0+1=1$; $1+1=10$. Le regole della moltiplicazione saranno: $0 \times 0=0$; $0 \times 1=0$; $1 \times 0=0$; $1 \times 1=1$

Le porte logiche

George Boole sviluppò una teoria matematica differente da quella classica, la cui espansione e sviluppo è stata così importante che nell'attualità è usata in gran parte dai processi esistenti. Per la soluzione dei problemi, George Boole stabilì una serie di postulati e operazioni logiche valide per tutti i tipi di elementi: meccanici, elettrici, elettronici, ecc.

L'unica condizione è che questi elementi abbiano degli stati di funzionamento che esprimano i due stati del sistema digitale bivalente.

L'algebra di Boole lavora con grandezze a due soli valori, e gli elementi che contempla possono solo accettare due stati, come indicato nella tabella a fianco.

LE OPERAZIONI LOGICHE

Le operazioni nell'algebra di Boole si realizzano indicando gli ingressi e le uscite con le lettere dell'alfabeto. Le operazioni, con questa nuova matematica, si rappresentano anche con segni dell'aritmetica convenzionale: +, -, ecc.

Questi però hanno un significato totalmente diverso. Esistono tre operazioni fondamentali nell'algebra logica:

AND (PRODOTTO LOGICO)

OR (SOMMA LOGICA)

NOT (INVERSIONE LOGICA)

PORTA AND

Quando due o più variabili logiche binarie (A e B) si combinano mediante l'operazione logica AND, producono il risultato (X) che prende lo stato logico alto, o 1, quando tutte le due variabili di ingresso hanno questo stato.

ELEMENTO LOGICO

STATO ALTO

STATO BASSO

LAMPADA

ACCESA

SPENTA

INTERUTTORE

CHIUSO

APERTO

RELE'

ATTIVATO

DISATTIVATO

DIODO

CONDUTTORE

ISOLANTE

TRANSISTOR

SATURATO

INTERDETTO

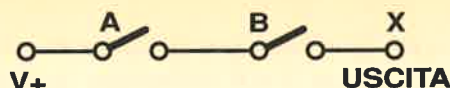
a

$$X = A \cdot B$$

b

A	B	X
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

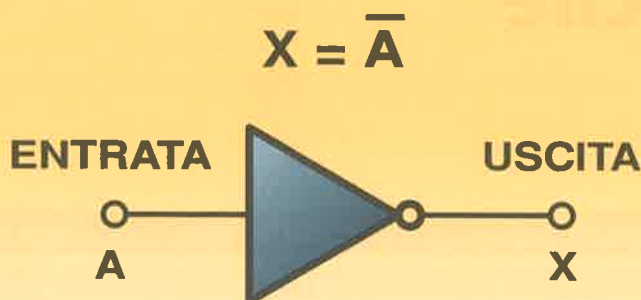
c



d



a) Equazione logica della funzione AND; b) Tavola della verità; c) Rappresentazione elettrica; d) Simbolo logico.



A	X
0	1
1	0

PORTA OR

Quando diverse variabili binarie d'ingresso si combinano mediante la funzione logica OR, l'uscita prende un livello alto se almeno uno degli ingressi assume questo stato. Invece se tutti gli ingressi hanno lo stato basso l'uscita prende lo stato basso.

PORTA NOT

Questa funzione logica viene chiamata sia inversione sia NOT.

Dispone solo di una variabile binaria come ingresso e l'uscita prende sempre lo stato opposto, o inverso, a quello dell'ingresso.

Rappresentazione logica della funzione NOT e tavola della verità.

Nell'algebra di Boole questa operazione si indica come una moltiplicazione.

$$X = A \cdot B$$

È chiamata tavola della verità, la tabella in cui sono rappresentate tutte le possibili combinazioni degli stati delle variabili di ingresso, e il risultato che producono.

Se si volesse lavorare con componenti elettrici, le variabili di ingresso A e B verrebbero rappresentate con interruttori. Questi potrebbero essere chiusi e in questo modo lascerebbero passare la tensione, oppure aperti, impedendo così il passaggio della tensione.

L'operazione AND si rappresenta mettendo in serie gli interruttori che rappresentano le variabili. Per fare in modo che all'uscita del circuito ci sia tensione a livello alto è necessario che tutti gli interruttori siano chiusi, e rappresentino il livello alto.

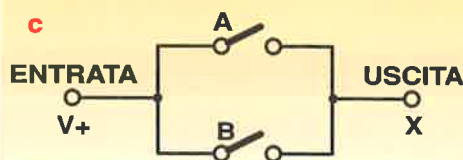
Il simbolo logico di questa operazione assomiglia ad un semicerchio, con gli ingressi dalla parte piatta e il risultato nella parte curva.

a

$$X = A + B$$

b

A	B	X
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1



a) Equazione logica della funzione OR; b) Tavola della verità; c) Rappresentazione elettrica; d) Simbolo logico.

Circuiti con porte logiche

FAMIGLIE LOGICHE

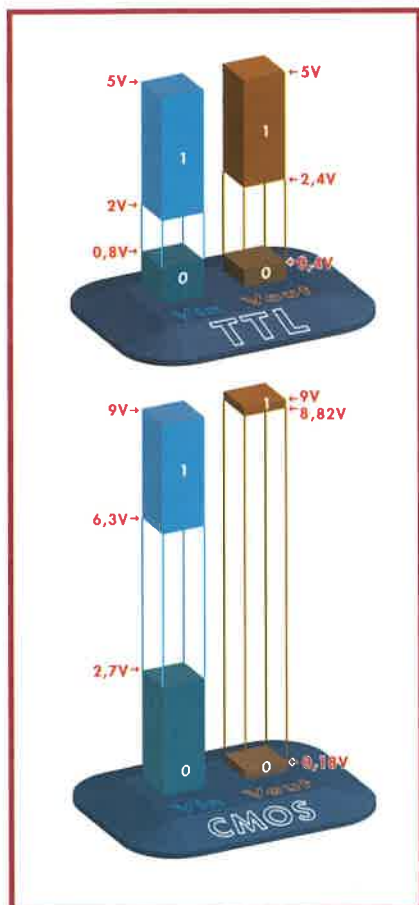
Le porte logiche si dividono in diverse famiglie, in base alla tecnologia e al tipo di transistor impiegati nella fabbricazione. Le più importanti sono la TTL e la CMOS. La famiglia TTL, tradizionalmente la più popolare, accetta una sola tensione di alimentazione a +5 VDC, mentre la CMOS tollera un range di valori di alimentazione sino a 15 VDC.

Sia nella famiglia TTL che nella CMOS i livelli logici alto e basso, hanno dei valori diversi a seconda che si tratti di livelli di ingresso (V_{in}) o di uscita (V_{out}). Per quanto riguarda il livello di ingresso basso, la famiglia TTL ha valori che oscillano fra 0 e 0,8 V, mentre per il li-

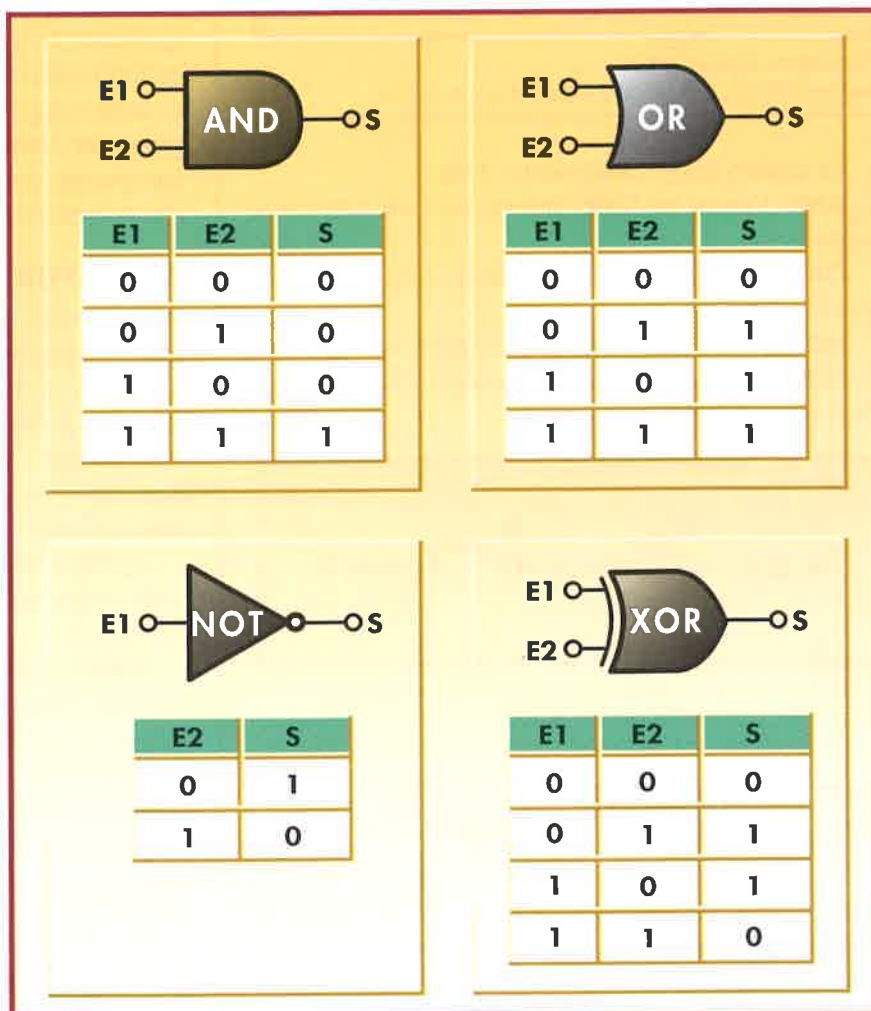
vello alto il valore può variare tra 2 e 5 V. Per il segnale di uscita, il livello basso è compreso fra 0 e 0,4 V mentre il livello alto può variare fra 2,4 e 5 V, come possiamo vedere nella figura.

LE PORTE PRINCIPALI

Le porte logiche sono gli operatori che realizzano le funzioni dell'algebra di Boole. Possono essere costruite con elementi meccanici come gli interruttori, elettrici come i relè, oppure elettronici come i circuiti integrati, che saranno quelli che noi useremo.

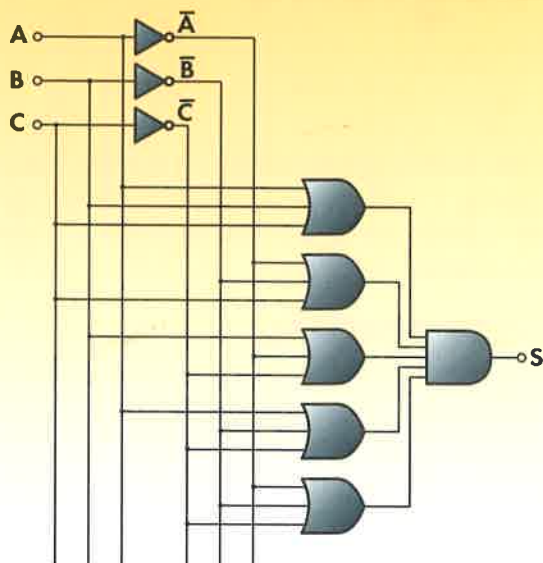


Livello alto e basso, di ingresso e di uscita, nelle famiglie TTL e CMOS.



Simbolo e tavola della verità delle quattro porte logiche principali.

$$S = (C+B+A) (\bar{C}+\bar{B}+\bar{A}) (\bar{C}+B+\bar{A}) (\bar{C}+\bar{B}+A) (\bar{C}+\bar{B}+\bar{A})$$



L'equazione logica è risolta implementando uno schema a base di porte logiche.

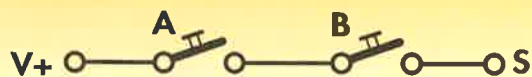
Le quattro porte fondamentali sono:

AND: L'uscita ha livello alto se sono alti tutti i suoi ingressi.

OR: L'uscita ha livello alto se almeno uno dei suoi ingressi è alto.

NOT: L'uscita ha livello logico opposto all'ingresso.

XOR: L'uscita ha livello alto quando solamente uno degli ingressi è alto.



Per far sì che $S=1$ e ci sia tensione all'uscita del circuito, è necessario che A e B siano chiusi, ovvero valgano 1.

IMPLEMENTAZIONE DELLE EQUAZIONI LOGICHE

Supponiamo di disporre di due variabili logiche che possono assumere solo due stati opposti. La variabile A rappresenta la possibilità che piova o che non piova, la variabile B rappresenta la possibilità di uscire in strada o non uscire. Infine vogliamo ottenere un risultato, che sarà la variabile S che rappresenterà il fatto di prendere l'ombrello o di non prenderlo.

L'equazione logica che ne segue è:

"Se esco in strada (B) e sta piovendo (A) prendo l'ombrello (S)": $S = A \cdot B$.

L'equazione logica è una AND o prodotto logico, significa che affinché la variabile di uscita vada a livello alto, entrambe le variabili di ingresso devono avere stato alto. Il segno di moltiplicazione "." equivale nell'algebra logica alla funzione AND. Il segno di somma "+" rappresenta la funzione OR. Un trattino sopra la variabile, o il fatto che sia seguita dal segno "#" rappresenta la negazione di detta variabile.

L'implementazione fisica della funzione AND mediante interruttori elettrici, consiste nel metterli in serie in modo che la tensione di alimentazione possa passare solo nel caso che entrambi gli interruttori siano chiusi, o in stato alto.

Nell'elettronica per implementare le equazioni logiche utilizziamo circuiti che le realizzano, e che sono contenuti nei circuiti integrati. Il problema si complica quando esistono più variabili di ingresso e di uscita, così come maggiori possibilità di relazionamento fra gli ingressi per ottenere l'uscita. Le equazioni diventano più complicate, così come gli schemi con le porte logiche che le implementano.

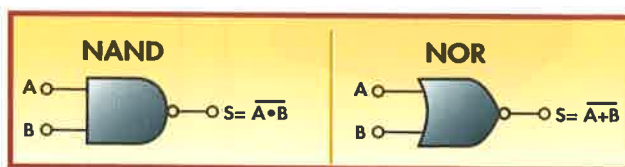
ALTRE PORTE INTERESSANTI

Esistono altre due porte derivate dalle fondamentali, che sono molto importanti. Si tratta della porta NAND e della porta NOR. La proprietà più interessante di queste porte è che permettono di risolvere tutte le operazioni logiche, il che significa che è possibile risolvere qualunque equazione logica utilizzando solamente questo tipo di porte.

L'utilizzo del medesimo tipo di porta e quindi di circuito integrato semplifica e rende più economico il montaggio.

NAND: L'uscita è l'inverso della funzione AND degli ingressi. Il simbolo è come la AND ma con un cerchio di negazione sull'uscita.

NOR: L'uscita è l'inverso della funzione OR degli ingressi. Usa il medesimo simbolo della OR, seguito da un cerchio di negazione sull'uscita.



Simboli ed equazioni di uscita delle porte NAND e NOR.

Sistemi combinatoriali: circuiti aritmetici

Sono denominati sistemi combinatoriali quelli la cui uscita dipende esclusivamente dallo stato dei loro ingressi. Per progettare un circuito combinatoriale si deve seguire la seguente metodologia.

PROGETTO DI CIRCUITO COMBINAZIONALE

- 1°. Definizione degli ingressi e specificazione delle uscite in funzione degli ingressi.
- 2°. Tabella della verità.
- 3°. Equazioni logiche.
- 4°. Semplificazione delle equazioni.
- 5°. Implementazioni delle equazioni con circuiti integrati digitali.

Descriveremo diversi sistemi combinatoriali digitali, che per la loro importanza e il loro frequente utilizzo, sono venduti sotto forma di circuiti integrati; inizieremo dai più utili, che sono i sistemi combinatoriali che realizzano operazioni aritmetiche.

IL SEMISOMMATORE

È un circuito combinatoriale che genera la somma (S) di due digit (A e B) e il riporto (C) nel caso sia presente.

Come si può vedere dalla tabella della verità, il va-

lore della somma S coincide con la funzione XOR delle variabili di ingresso. Il riporto vale 1 quando A e B sono 1. Di conseguenza $S = A \text{ XOR } B$ e $C = A \cdot B$.

A	B	S	C
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Tabella della verità del circuito semisommatore. A e B sono gli operandi, S la somma e C il riporto.

IL SOMMATORE COMPLETO

Si chiama così perché è un circuito combinatoriale capace di sommare tre bits, due della precedente operazione e un terzo che è il riporto dei precedenti, generando in uscita la somma totale e il riporto. Mettendo in serie vari sommatore completi, si possono realizzare somme di numeri binari di diversi digit.

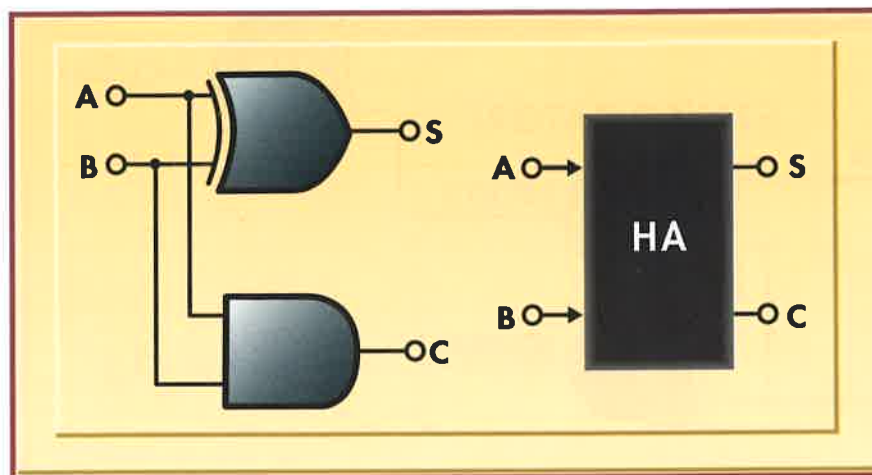
La tabella della verità indica il valore della somma S e del riporto finale Cout, in funzione del valore degli operandi (A e B) e del riporto precedente Cin.

Per far sì che la somma S valga 1, uno dei tre sommatore,

A	B	Cin	S	Cout
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
0	0	1	1	0
1	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1

o tutti e tre, deve essere a 1, il che corrisponde alla funzione XOR.

Il riporto finale Cout è 1 quando almeno due sommatore sono a 1. Si deduce così che l'equazione logica di



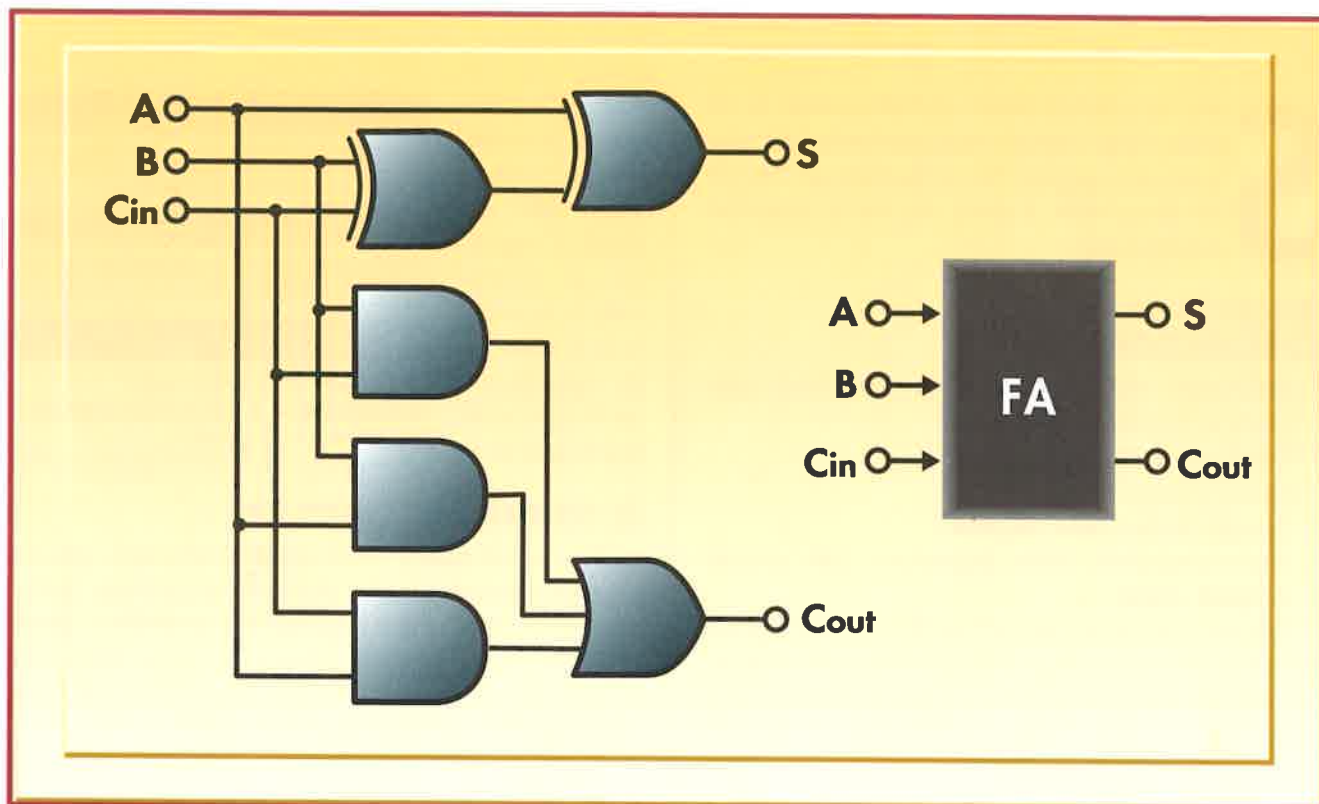
Schema logico del semisommatore e simbolo (HA: Half Adder).

uscita del sommatore completo è: $S = A \text{ xor } [B \text{ xor } C]$

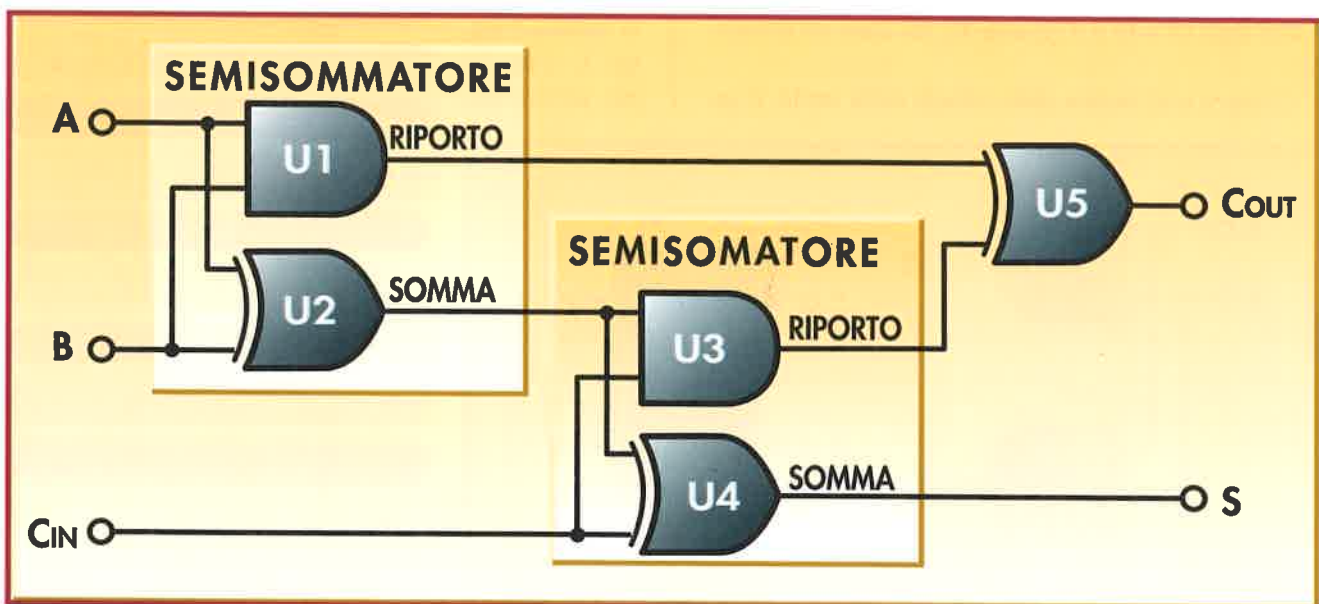
$$\text{Cout} = A.B + A.\text{Cin} + B.\text{Cin}$$

Un altro modo di implementare un sommatore completo, consiste nell'utilizzare due semisommatori in

cascata. Il primo realizza la somma dei due operandi, e il secondo somma l'uscita del primo al riporto precedente, come viene mostrato nella figura riprodotta a fondo pagina.



Schema logico con porte e simbolo del sommatore completo (FA: Full Adder).



Schema del sommatore completo implementato mediante due semisommatori.

Codificatori da decimali a BCD

Un codificatore è un sistema combinatoriale, che ha il compito di trasformare una serie di segnali in un altro insieme che rappresenti un codice. Per chiarire il concetto, faremo riferimento e progetteremo un codificatore che riceva 10 segnali, ognuno corrispondente ad un digit del sistema decimale (E0-E9), e fornisca 4 segnali binari che corrispondano ai 4 digit necessari per rappresentare il segnale di ingresso in codice BCD.

Per il progetto del circuito combinatoriale seguiremo i passi che abbiamo studiato in precedenza, iniziando dalla compilazione della tabella della verità e ricavando le equazioni che ne derivano.

$$A = E1 + E3 + E5 + E7 + E9$$

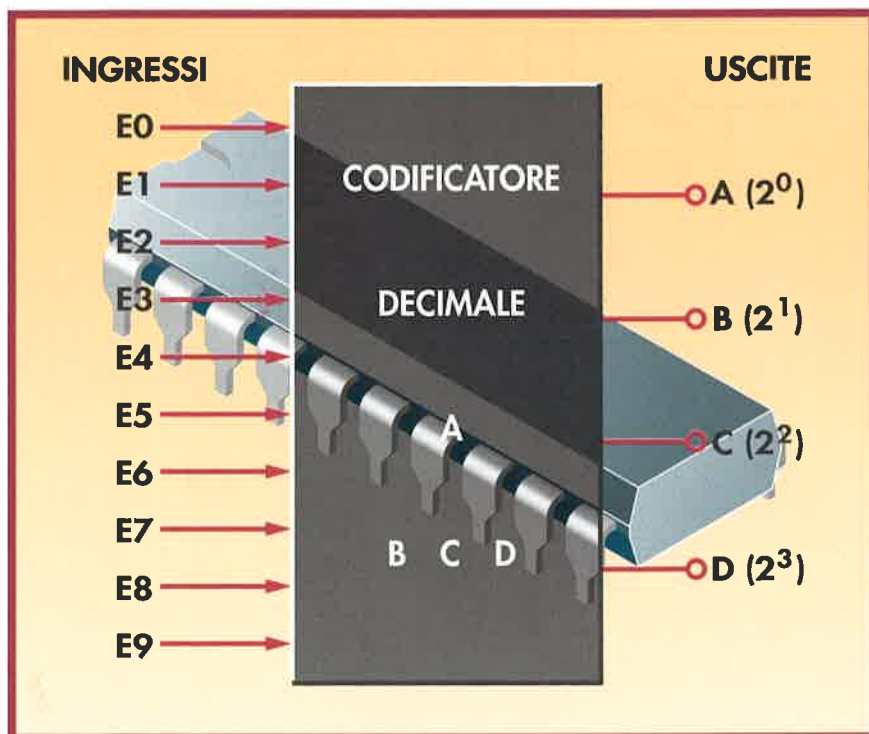
$$B = E2 + E3 + E6 + E7$$

$$C = E4 + E5 + E6 + E7$$

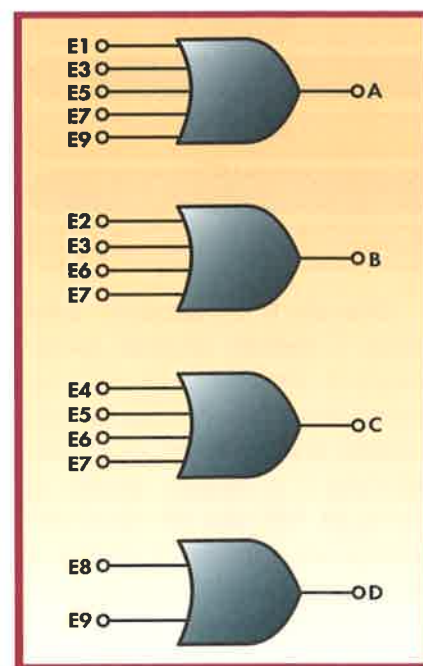
$$D = E8 + E9$$

INGRESSO	USCITA			
N° DECIMALE	A(2 ⁰)	B(2 ¹)	C(2 ²)	D(2 ³)
E0	0	0	0	0
E1	1	0	0	0
E2	0	1	0	0
E3	1	1	0	0
E4	0	0	1	0
E5	1	0	1	0
E6	0	1	1	0
E7	1	1	1	0
E8	0	0	0	1
E9	1	0	0	1

Tabella della verità del decodificatore da decimale a BCD.



Il codificatore riceve 10 segnali di ingresso, ognuno dei quali rappresenta un digit decimale, e fornisce 4 segnali binari che rappresentano l'ingresso in codice BCD.



Le quattro equazioni del codificatore si risolvono con quattro porte OR.

La soluzione delle quattro equazioni logiche a cui corrispondono i quattro segnali di uscita del decodificatore si implementa con quattro porte OR.

DECODIFICATORE DA BCD A DECIMALE

Al contrario del codificatore, questo circuito riceve dei segnali in forma codificata e fornisce delle uscite non codificate. Prendiamo in considerazione il decodificatore che riceve quattro segnali che rappresentano un valore nel codice BCD, e fornisce il valore decimale corrispondente. Dalla tabella della verità, ricaviamo le seguenti equazioni logiche delle 10 possibili uscite:

$$S0 = A\# \cdot B\# \cdot C\# \cdot D\#$$

$$S1 = A\# \cdot B\# \cdot C\# \cdot D\#$$

$$S2 = A\# \cdot B\# \cdot C\# \cdot D\#$$

$$S3 = A\# \cdot B\# \cdot C\# \cdot D\#$$

$$S4 = A\# \cdot B\# \cdot C\# \cdot D\#$$

$$S5 = A\# \cdot B\# \cdot C\# \cdot D\#$$

$$S6 = A\# \cdot B\# \cdot C\# \cdot D\#$$

$$S7 = A\# \cdot B\# \cdot C\# \cdot D\#$$

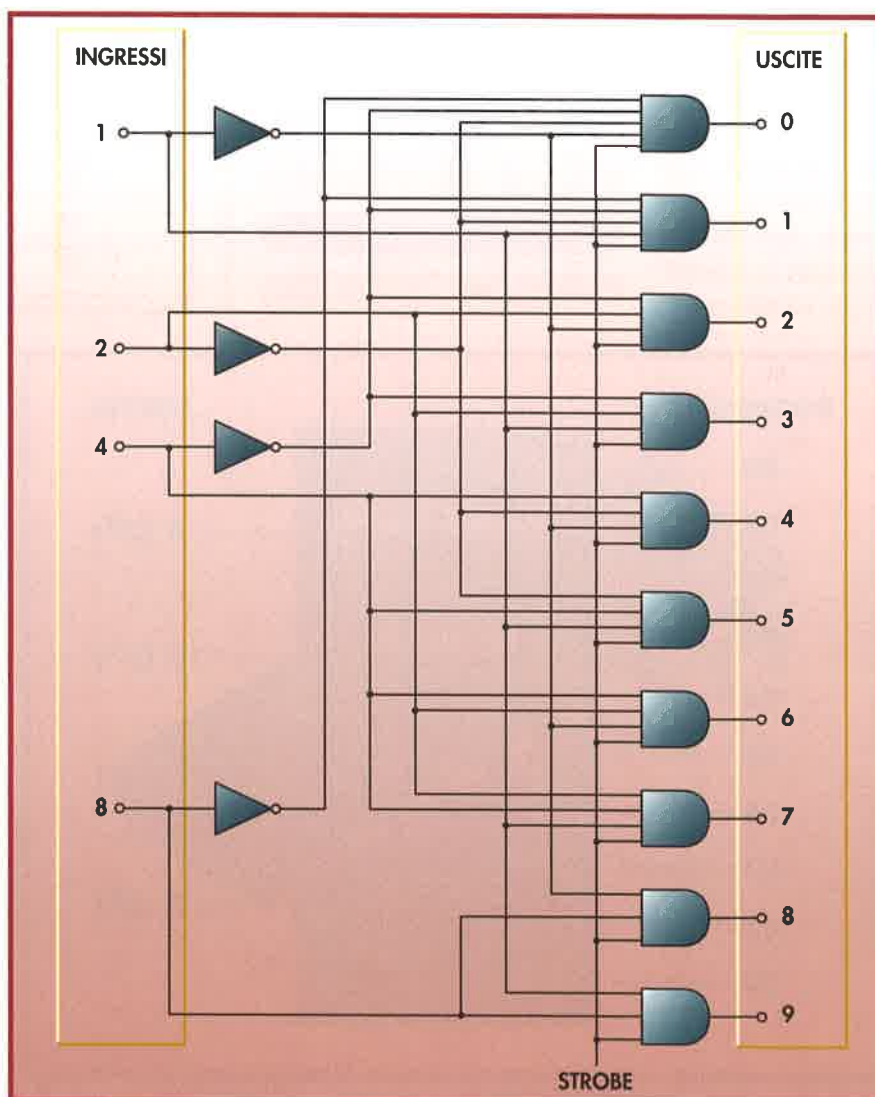
$$S8 = A\# \cdot B\# \cdot C\# \cdot D$$

$$S9 = A\# \cdot B\# \cdot C\# \cdot D$$

Ottenute le 10 equazioni delle uscite, il metodo generale raccomanda di semplificare al massimo queste equazioni. Per fare questo esistono diversi metodi, ma il più utilizzato è il metodo grafico di Karnaugh. Nel caso del nostro decodificatore, dato che le equazioni sono molto semplici, non ammettono ulteriori semplificazioni, pertanto si passa ad implementare le 10 uscite con le interconnessioni delle porte, necessarie per ricevere gli ingressi.

INGRESSI				USCITE	
A(2 ⁰)	B(2 ¹)	C(2 ²)	D(2 ³)		
0	0	0	0	E0	
1	0	0	0	E1	
0	1	0	0	E2	
1	1	0	0	E3	
0	0	1	0	E4	
1	0	1	0	E5	
0	1	1	0	E6	
1	1	1	0	E7	
0	0	0	1	E8	
1	0	0	1	E9	

Simbolo e tabella della verità di un codificatore da BCD a decimale.



Implementazione mediante porte logiche delle 10 equazioni del decodificatore da BCD a decimale.

Multiplexer, demultiplexer e comparatori

MULTIPLEXER

Nei sistemi digitali è molto comune trasmettere le informazioni binarie in serie. Si utilizza una sola linea nella quale ogni determinato tempo si manda un bit. Per fare in modo che emettitore e ricevitore sappiano esattamente quando è presente nella linea un nuovo bit, si fornisce un segnale di clock,



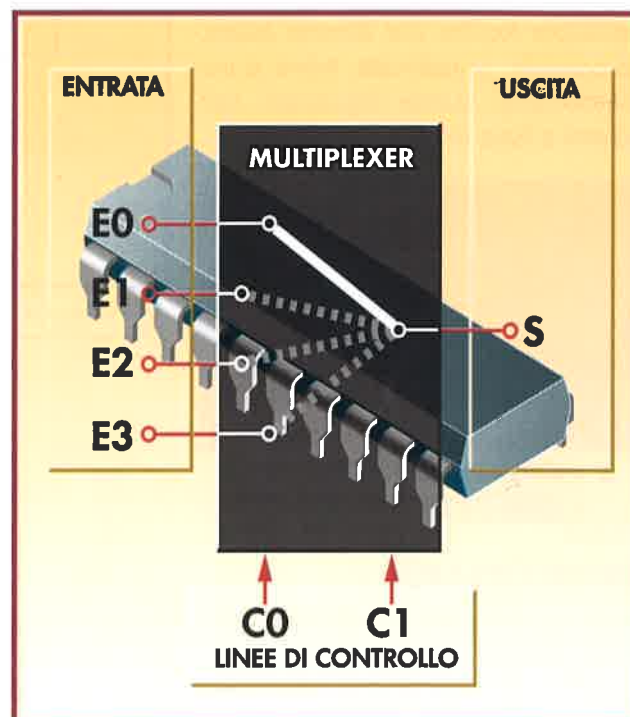
Cronogramma in cui si invia, in serie, il codice del numero 9 in BCD (001001), impiegando 6 impulsi di clock.

i cui fronti determinano questo istante. L'informazione si trasmette in serie, bit a bit, e la discriminazione fra di essi si realizza mediante i fronti degli impulsi di clock che sincronizzano l'emettitore e il ricevitore.

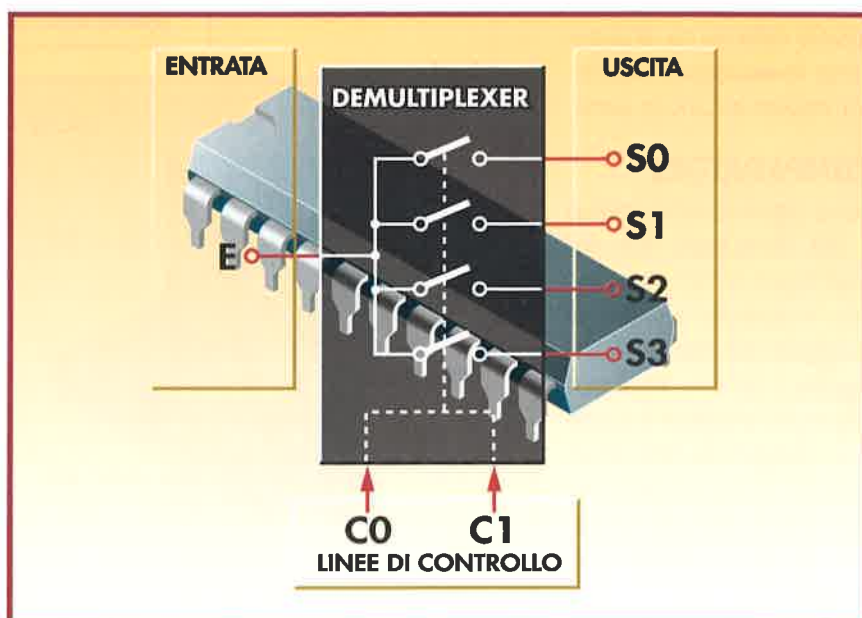
Un'altra caratteristica molto importante che riguarda numerosi circuiti digitali, è l'esistenza di tre stati logici al posto di due. Gli stati sono: alto (1), basso (0), "alta impedenza" o tristate. Quest'ultimo, e nuovo, stato corrisponde a quando abbiamo una linea o un punto del circuito in aria, cioè senza connessioni al resto dell'elettronica. È un terzo stato in cui non c'è livello né alto né basso.

I dispositivi multiplexer dispongono di vari ingressi digitali e di una uscita. Dalla linea di uscita si ottiene, in modo seriale, l'informazione che si carica nell'ingresso che è stato selezionato. La selezione delle linee di ingresso che devono portare l'informazione all'uscita è fatta mediante delle linee di controllo. Il funzionamento generale di un multiplexer è simile ad un commutatore che collega l'uscita all'ingresso che in quel momento è selezionato dalla linea di controllo. Nella figura si mostra lo schema di principio di un multiplexer a quattro ingressi.

I dispositivi multiplexer dispongono di vari ingressi digitali e di una uscita. Dalla linea di uscita si ottiene, in modo seriale, l'informazione che si carica nell'ingresso che è stato selezionato. La selezione delle linee di ingresso che devono portare l'informazione all'uscita è fatta mediante delle linee di controllo. Il funzionamento generale di un multiplexer è simile ad un commutatore che collega l'uscita all'ingresso che in quel momento è selezionato dalla linea di controllo. Nella figura si mostra lo schema di principio di un multiplexer a quattro ingressi.



Funzionamento schematico di un multiplexer a quattro ingressi.



Funzionamento schematico di un demultiplexer a quattro uscite.

Dato che il multiplexer è un sistema combinatoriale, in cui le uscite prendono il valore degli ingressi selezionati dalle linee di controllo, per il suo progetto si segue la metodologia generale. In primo luogo si compila la tabella della verità e da questa si ottengono le equazioni logiche che devono essere, se possibile, semplificate. Infine si implementano queste equazioni con schemi a base di porte logiche.

	C0	C1	S
	0	0	E0
	1	0	E1
	0	1	E2
	1	1	E3

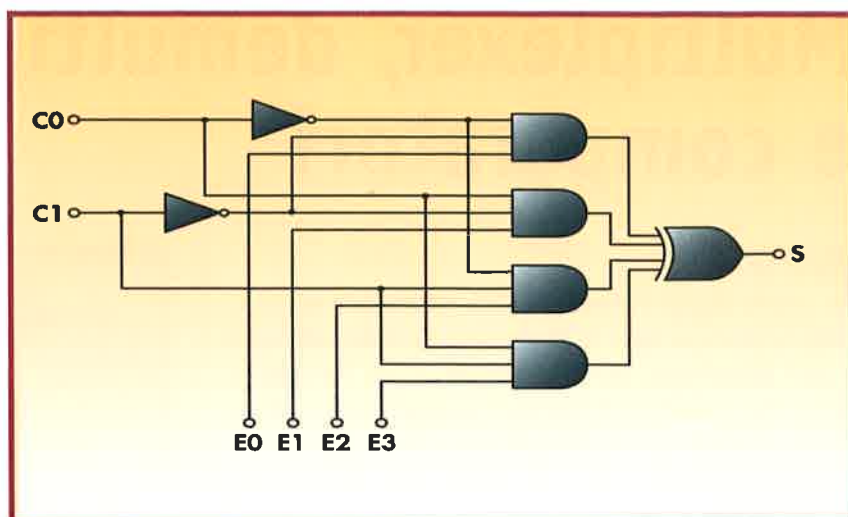
$$S = C0 \# C1 \# E0 + C0 \cdot C1 \# E1 + C0 \# C1 \cdot E2 + C0 \cdot C1 \cdot E3$$

DEMULTIPLEXER

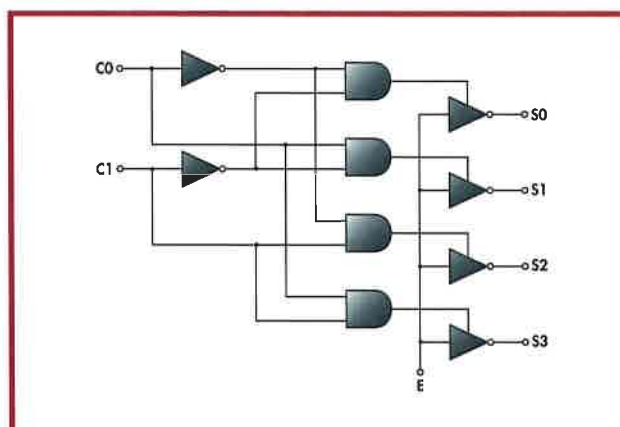
Sono circuiti combinatoriali che ricevono l'informazione binaria in serie da una linea d'ingresso e la trasmettono ad una delle linee di uscita. Per individuare la linea di uscita sulla quale verrà caricata l'informazione che in quell'istante è presente sull'ingresso esistono delle linee di controllo. Nel progetto del demultiplexer si compila la tabella della verità, si deducono le equazioni logiche, e si implementano in porte.

COMPARATORI

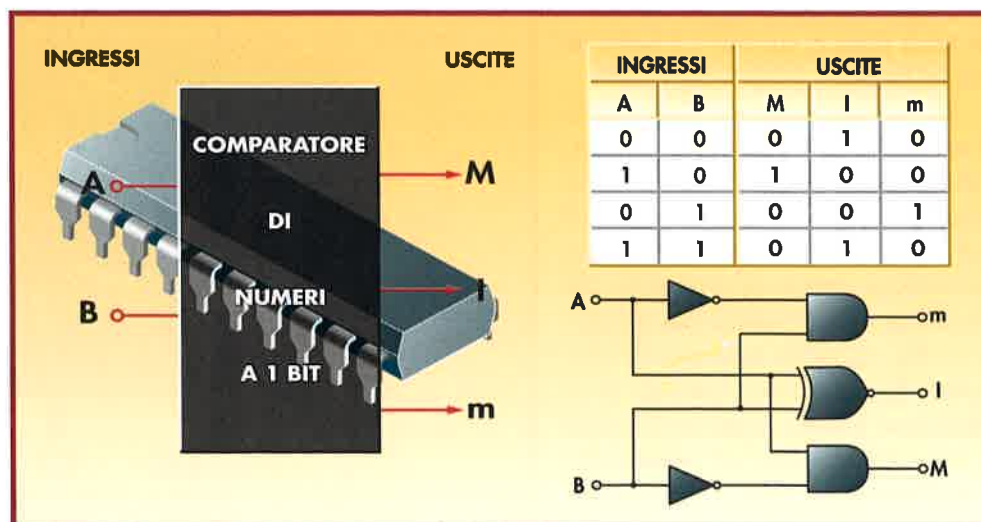
Sono circuiti combinatoriali che comparano due numeri binari di "n" bit ognuno, indicando se uno è maggiore (M), minore (m) o uguale (I) all'altro. Il comparatore più semplice è quello che compara numeri di un solo bit. Il suo progetto segue la metodologia classica del compilare la tabella della verità, dedurre le equazioni, e trasformarle in uno schema con porte logiche.



Schema logico di un multiplexer a quattro ingressi.



Schema logico di un demultiplexer a quattro uscite.



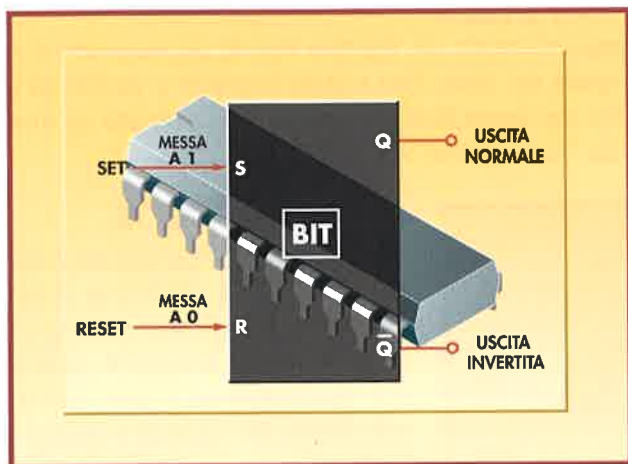
Funzionamento base di un comparatore; tabella della verità di un comparatore di numeri a 1 bit e schema logico del medesimo.

Flip-flop

L'ELEMENTO BASE DELLA MEMORIA

In elettronica digitale l'elemento base dell'informazione è il bit, che può essere 1 o 0. Si chiama elemento di memoria il dispositivo incaricato di immagazzinare informazione, e in questo caso l'elemento base è quello capace di contenere un 1 o uno 0. Possiamo paragonare l'elemento base che contiene il bit ad un piccolo recipiente. Per memorizzare un bit disponiamo di un segnale SET, che carica un 1 e di un segnale RESET che carica uno 0. Non è possibile attivare contemporaneamente i due segnali, in quanto si può memorizzare solo un bit. Per conoscere il contenuto del "recipiente" disponiamo di un segnale di uscita Q che indica il bit contenuto; inoltre è disponibile un'uscita invertita che fornisce il valore inverso al bit contenuto. In questo modo se si scrive nel "recipiente" un 1 sull'uscita Q avremo il valore 1 e sull'uscita $\bar{Q}$ esce uno 0. L'elemento base della memoria appena descritto è rappresentato nella figura in alto a destra.

Il funzionamento di questo elemento è molto semplice: se si attiva il segnale SET, cioè se si applica su esso un livello alto, il flip-flop si carica con un 1; di conseguenza $Q = 1$ e $\bar{Q} = 0$. Questa situazione durerà sino a che non si attiva il segnale RESET, come si può vedere dalla tabella della verità della figura. Dobbiamo no-



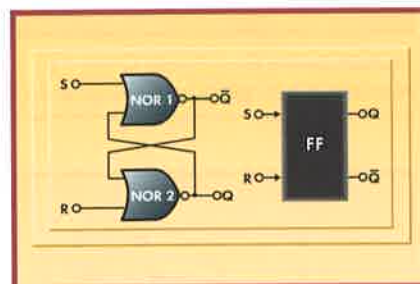
Elemento base di memoria capace di contenere un bit in modo permanente.

tare che dopo aver caricato un 1, grazie all'attivazione del SET, non sarà necessario che il segnale rimanga attivo, infatti anche se si disattiva, sino a che non si attiva il RESET il dispositivo resta a 1.

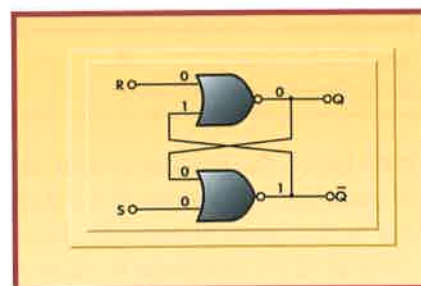
FLIP-FLOP RS CON PORTE NOR

Nella figura è riportato un elemento base della memoria implementato mediante due porte NOR, che riceve il nome di flip-flop RS con porte NOR. Le lettere RS sono le iniziali di Reset/Set. Per dedurre la tabella della verità di questo elemento digitale, si suppone che

per gli ingressi Set e Reset il livello attivo sia alto. Quindi se entrambi gli ingressi sono a zero, il contenuto del flip-flop non cambia. Ad esempio, se il flip-flop aveva $Q = 0$ impostando $S = R = 0$ si mantiene il livello dell'uscita Q, come rappresentato nella figura. Se inizialmente $Q = 0$ e si pone $S = 1$ e $R = 0$, l'uscita Q passa a 1. Notate che dopo che il flip-flop è stato caricato



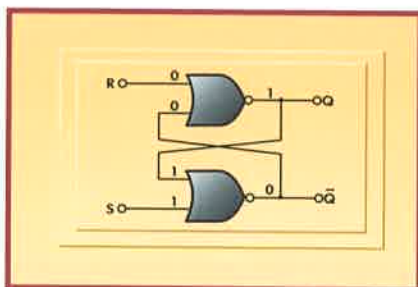
Flip-flop RS con porte NOR. Struttura interna e simbolo.



Se gli ingressi $S = R = 0$ il contenuto del flip-flop non cambia. Se prima Q valeva 0 mantiene quel valore con $S = R = 0$.

SET	RESET	Q	$\bar{Q}$
1	0	1	0
0	1	0	1
0	0	Q-1	$\bar{Q}-1$

Tabella della verità dell'elemento base di memoria, supponendo che i segnali SET e RESET siano attivi a livello logico alto.



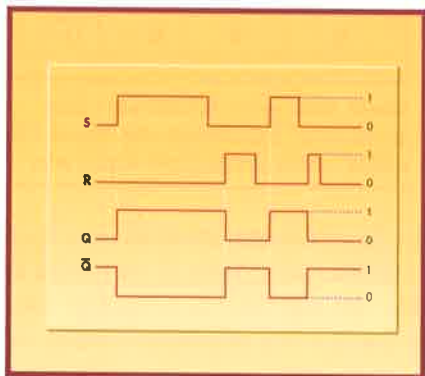
Quando $S = 1$ e $R = 0$ l'uscita Q vale 1 e mantiene questo valore anche se S torna a 0.

S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	$Q-1$	$\bar{Q}-1$
1	0	1	0
0	1	0	1
1	1	0	0

Tabella della verità del flip-flop RS con porte NOR.

La combinazione $S = R = 1$ è pericolosa, perché provoca una "condizione indefinita", dato che cercando di uscire da questa situazione ponendo $S = R = 0$ non si può predire lo stato logico che prenderanno le uscite delle porte NOR. Al passaggio simultaneo di S e R da 1 a 0, supponendo che le due porte abbiano lo stesso ritardo di propagazione di 10 ns, entrambe le uscite avranno preso il valore 1, la retroazione del circuito forzerà le uscite per riportarle nuovamente a zero, iniziando un ciclo infinito. Nella realtà, dato che una delle porte avrà minore ritardo dell'altra, si avvantaggerà e il flip-flop prenderà uno stato determinato. La tabella della verità è rappresentata nella figura.

Nella figura successiva è riportato il cronogramma del comportamento di un flip-flop RS con porte NOR, in funzione dei suoi ingressi.



Cronogramma di un flip-flop RS con porte NOR.

con un 1, il suo stato non si modifica anche se S torna a 0. Se $S = 0$ e $R = 1$ il flip-flop si carica con uno 0 e rimane con questo valore anche se R torna a 0.

La combinazione $S = R = 1$ è pericolosa, perché provoca una "condizione indefinita", dato che cercando di uscire da questa situazione ponendo $S = R = 0$ non si può predire lo stato logico che prenderanno le uscite delle porte NOR. Al passaggio simultaneo di S e R da 1 a 0, supponendo che le due porte abbiano lo stesso ritardo di propagazione di 10 ns, entrambe le uscite avranno preso il valore 1, la retroazione del circuito forzerà le uscite per riportarle nuovamente a zero, iniziando un ciclo infinito. Nella realtà, dato che una delle porte avrà minore ritardo dell'altra, si avvantaggerà e il flip-flop prenderà uno stato determinato. La tabella della verità è rappresentata nella figura.

S	R	Q	$\bar{Q}$
1	1	$Q-1$	$\bar{Q}-1$
0	1	1	0
1	0	0	1
0	0	1	1

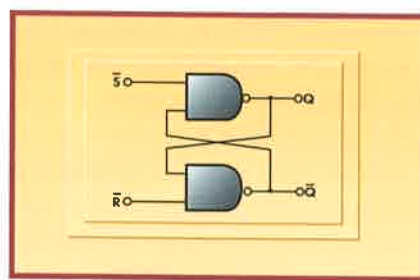
Tabella della verità del flip-flop RS con porte NAND.

FLIP-FLOP RS CON PORTE NAND

Utilizza due porte NAND retroazionate, ed è caratterizzato dal fatto che gli ingressi sono attivi a livello basso, come indicato nella figura. Quando questo flip-flop riceve la combinazione $\bar{S} = 0$ e $\bar{R} = 1$, l'uscita Q vale 1. La condizione di indeterminazione in questo flip-flop si produce quando $\bar{S} = \bar{R} = 0$ come si può vedere dalla tabella della verità.

FLIP-FLOP SINCRONO CON IL SEGNALE DI CLOCK

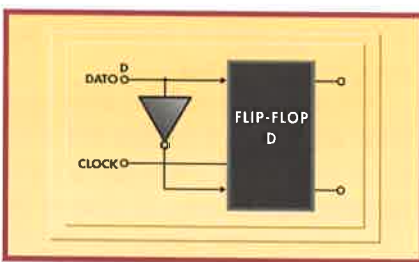
Sono simili ai flip-flop studiati, però cambiano lo stato solo in presenza di un impulso di clock, oppure di uno dei suoi due fronti.



Flip-flop RS con porte NAND.

FLIP-FLOP TIPO D

Possiedono un solo segnale di ingresso per il dato, che si chiama D . Se si applica a D un 1 il flip-flop si carica con un 1 e se si applica uno 0 si carica con uno 0. Nella figura riprodotta a lato è rappresentato un flip-flop tipo D sincrono con il segnale del clock, che è stato costruito a partire da un RS con porte NOR al quale è stato montato un inverter fra l'ingresso Set e il Reset.



Flip-flop tipo D sincrono.

FLIP-FLOP TIPO JK

Si tratta di un flip-flop speciale in cui è stata eliminata la condizione di indeterminazione. I suoi segnali di ingresso di messa a 1 e 0 ricevono il nome di J e K rispettivamente, e sono attivi a livello logico alto. Quando si applica un livello logico alto ai due ingressi il contenuto del flip-flop si inverte, se conteneva un 1 passerà a 0 e viceversa.

Registri

IMMAGAZZINAMENTO DEI BIT NEI REGISTRI

Nelle macchine digitali tutte le grandezze, testi, disegni ecc. si codificano con un insieme di bit. L'elemento base della memoria è il flip-flop, che è capace di immagazzinare un bit.

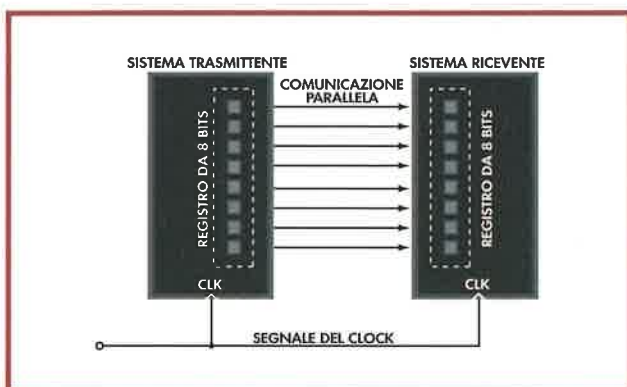
I dispositivi incaricati di immagazzinare diversi bit si chiamano registri, e sono costituiti da tanti flip-flop quanti bit devono contenere, come si vede



Trasferimento seriale sincrono fra due registri digitali.



Un registro che contiene otto bit è formato da otto flip-flop.



Trasferimento parallelo sincrono fra due registri di sistema digitali.

chiamata "sincrona", come nel caso della comunicazione mostrata nella figura a fianco. Invece quando il trasferimento è seriale, è sufficiente una sola linea per supportare il flusso dei dati; è più semplice, sicura ed economica, però più lenta.

REGISTRI DI TRASFERIMENTO SERIALE

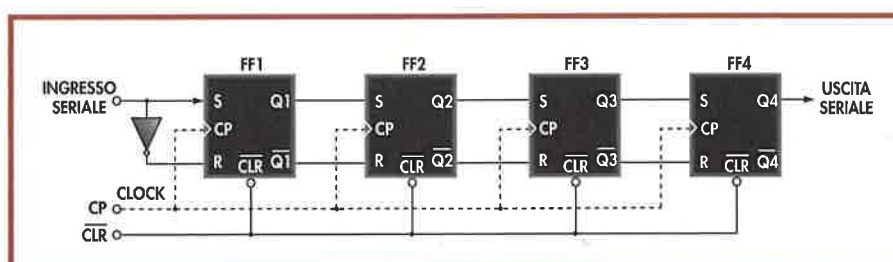
I flip-flop di questo tipo di registri sono incatenati uno dietro l'altro, in modo che l'informazione contenuta in ogni flip-flop si sposti continuamente ad ogni impulso di clock.

Quando si colloca il valore di un bit sulla linea di ingresso seriale del registro della figura, il flip-flop FF1 si carica con detto valore al fronte di salita del clock CP. FF1 non ha condizioni di indeterminazione, dato che gli ingressi R e S sono sempre invertiti.

Contemporaneamente al carico di FF1, ognuno dei restanti flip-flop si carica con il dato memorizzato dal precedente, FF2 si carica con il contenuto di FF1, FF3 si carica con quello di FF2 e FF4 con quello di FF3. Se vo-

nella figura. L'informazione depositata nei registri dovrà essere trasferita per la successiva elaborazione.

Questo trasferimento si può realizzare in serie o in parallelo. In quest'ultimo caso sono necessarie tante linee quanti sono i bit da trasferire. Inoltre se il trasferimento è controllato da un segnale di clock si



Registro di spostamento seriale sincrono da quattro bit, con un ingresso comune di reset.

gliamo memorizzare 4 bit nel registro, dovremo introdurli uno dietro l'altro con quattro colpi di clock.

Per obbligare tutti gli FF ad assumere uno stato predeterminato disponiamo di un segnale CLR# che, quando va a livello basso, carica tutti gli FF con uno 0.

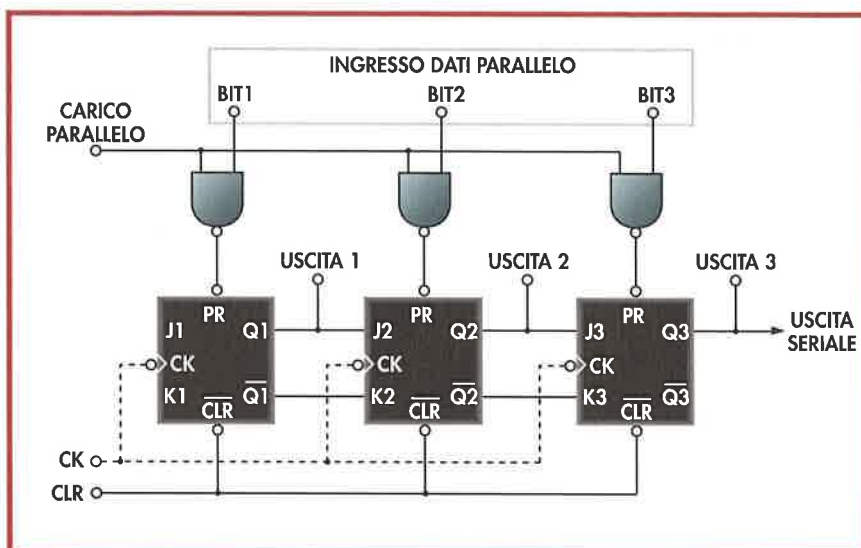
REGISTRO DI SPOSTAMENTO PARALLELO

La figura riprodotta a lato rappresenta un registro formato da tre FF tipo JK. Anche se sono collegati in serie, e quindi possono trasferire il dato da uno all'altro, possono anche essere caricati tutti e tre contemporaneamente, utilizzando il segnale di controllo PR di messa a 1, che si mostra nella figura.

Inizialmente si caricano i tre FF a 0, attivando il segnale CLR#; per caricare contemporaneamente tutti gli FF si attiva il segnale "Carica Parallela", nello stesso momento si applica anche il bit da caricare sull'altro ingresso della porta NAND che controlla il segnale PR di messa a 1, che è attivo a livello basso.

REGISTRO DI SPOSTAMENTO UNIVERSALE

Questo tipo di registro si può leggere e scrivere in serie o in parallelo, inoltre si può anche scrivere in un modo e leggere in un altro, quindi è capace di trasformare il dato da seriale a parallelo e viceversa. Nella figura è riportato un registro universale implementato con diversi circuiti integrati digitali commerciali, nella fattispecie con due FF JK ognuno, un SN7400 con quattro porte NAND, un SN7408 con quattro porte AND e un SN7404 di cui si utilizza solo uno dei suoi inverter. La scrittura parallela degli

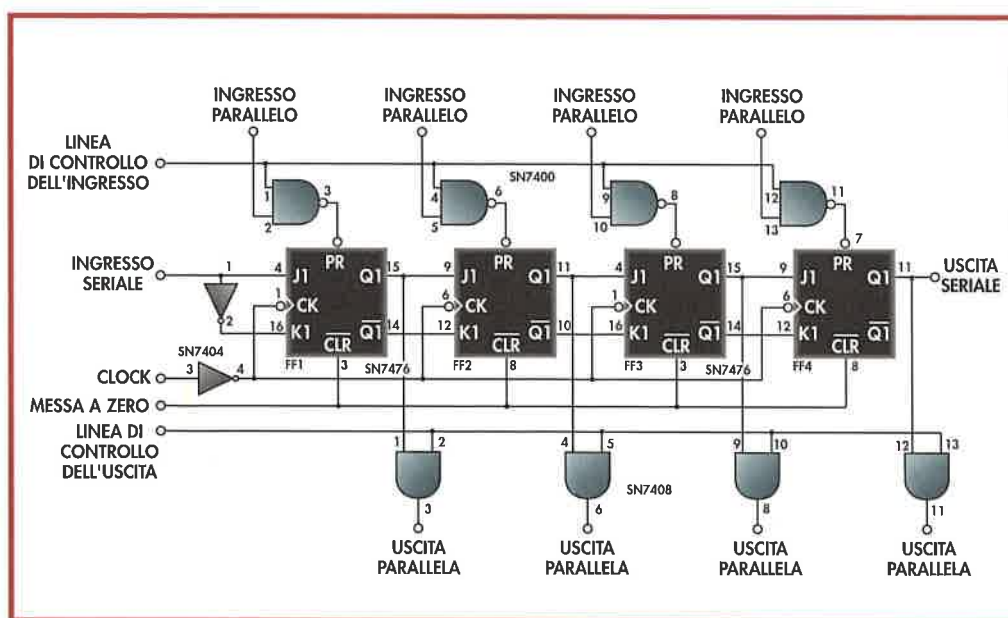


Registro da tre bit con carico e scarico dei dati in parallelo.

FF si realizza tramite le porte NAND che pilotano il segnale di messa a 1 (PR). La lettura simultanea dei quattro FF si fa tramite le uscite delle porte AND che prendono il valore dell'uscita Q degli FF quando si attiva la linea di comando dell'uscita.

Per la lettura e scrittura dei flip-flop in serie si utilizzano le linee di uscita e ingresso seriale combinate con quattro impulsi di clock, necessari per scaricare i quattro dispositivi di memoria del dato.

Questo suppone che le operazioni siano quattro volte più lente rispetto al lavoro in parallelo.



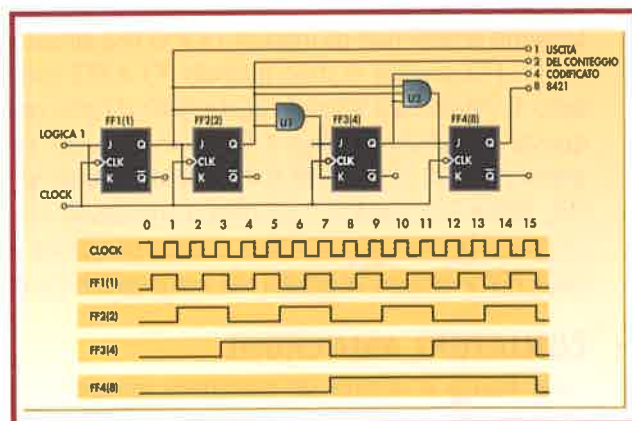
Registro universale che si può leggere e scrivere in serie o in parallelo.

Contatori (I)

REGISTRI CHE SANNO CONTARE

Se le uscite e gli ingressi dei flip-flop che formano i registri si collegano in modo adeguato, il valore che i flip-flop rappresentano si incrementa o decrementa ad ogni impulso di clock. Questi dispositivi si chiamano contatori, forniscono una uscita che è il valore del conteggio in codice binario. Abbiamo quindi un codice chiamato 8421, che indica la presenza di quattro flip-flop che rappresentano le successive potenze del 2. L'FF meno significativo ha il peso della potenza zero del 2, ovvero 1. Il successivo rappresenta la potenza 1, il seguente la potenza 2 e quello più significativo la potenza 3 di base 2. Nella figura è riportata la tabella con i differenti valori che assumono questi quattro flip-flop per i diversi digit esadecimali. Ad ogni impulso di clock sui contatori, i valori dei flip-flop passano da un digit al successivo se si incrementano, o al precedente se si decrementano.

I contatori sono costruiti sulla base di flip-flop JK, R-S, T o D e possono essere di due tipi: asincroni, o se-



Contatore binario a quattro bit sincrono, con il cronogramma degli stati dei flip-flop corrispondente all'applicazione del clock.

riali, e sincroni, o paralleli. Nei sincroni tutti i flip-flop cambiano di stato insieme, mentre negli asincroni la commutazione di ogni flip-flop provoca il cambio di quello seguente, cioè cambiano uno per volta. Si chiama "modulo" di un contatore il numero di stadi che si succedono sino al conteggio completo, e il più utilizzato è il modulo 10.

PROGETTO DI UN CONTATORE IN CODICE 8421

Come abbiamo visto, ci sono diversi tipi di contatori, ed esistono molte forme per codificare il valore del conteggio. Anche se il codice binario 8421 è uno dei più utilizzati, ve ne sono anche altri che utilizzano il codice BCD.

Nel progetto di un contatore dobbiamo studiare la sequenza secondo cui devono muoversi i flip-flop ad ogni impulso di clock, per obbligarli ad assumere i valori che desideriamo. Per forzare lo stato di un flip-flop, di solito si usano delle porte logiche fra l'uscita di uno e l'ingresso dell'altro. Nella figura vediamo un contatore binario 8421 da quattro flip-flop JK sincrono, che ha gli ingressi e le uscite collegati fra loro mediante porte AND. Dato che il segnale del clock si applica contemporaneamente ai quattro flip-flop, tutti cambiano simultaneamente. Per progettare il contatore della figura si è seguita la regola con cui varia lo stato degli FF se-

NUMERO DECIMALE	FF4($2^3=8$)	FF3($2^2=4$)	FF2($2^1=2$)	FF1($2^0=1$)
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
A	1	0	1	0
B	1	0	1	1
C	1	1	0	0
D	1	1	0	1
E	1	1	1	0
F	1	1	1	1

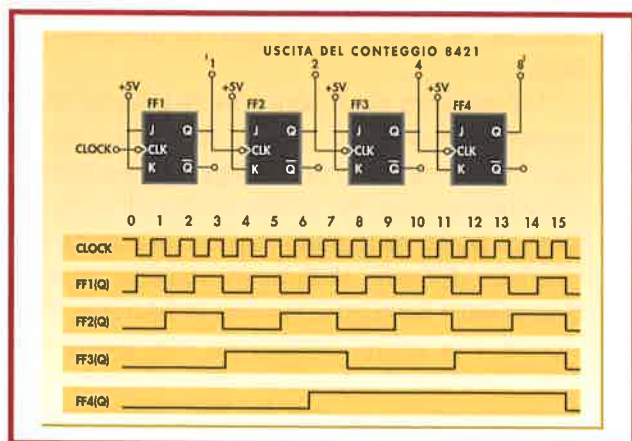
Tabella con i valori che assumono i quattro flip-flop per rappresentare i digit esadecimali.

condo la tabella precedente. Così, ad esempio, FF1 cambia di stato ad ogni impulso di clock, e per ottenere che questo commuti si collegano gli ingressi J e K a livello logico alto. La colonna FF2 della tabella mostra come il suo valore cambi di stato ogni due colpi di clock, cioè quando FF1 ha livello logico alto e arriva un ulteriore impulso di clock. Per ottenere questo comportamento si uniscono gli ingressi J e K di FF2 all'uscita Q1 di FF1. FF3 cambia di stato quando FF1 e FF2 sono a livello 1, infatti solo allora la porta AND U1 che gestisce questa situazione applica il livello logico alto agli ingressi J e K di FF3. Infine FF4 cambia di stato quando FF1, FF2 e FF3 sono a 1 e arriva il successivo colpo di clock. La porta AND U2 rileva questa situazione e obbliga FF4 a seguire la tabella del conteggio binario.

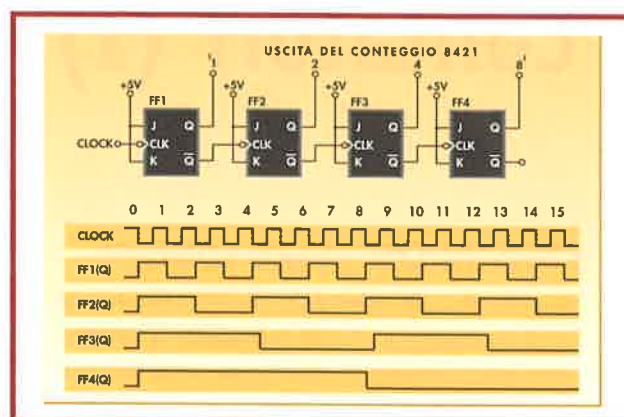
CONTATORI ASINCRONI

Nella figura si mostra un contatore asincrono ascendente che segue il codice 8421, e nel quale si incrementa il valore rappresentato dagli FF ad ogni impulso di clock.

Dato che si tratta di un contatore asincrono, l'uscita di ogni FF fa commutare il successivo, perché le uscite Q di ogni flip-flop sono collegate agli ingressi del clock del successivo. Gli ingressi J e K di ogni FF sono collegati permanentemente a livello alto, quindi ad ogni fronte di salita del clock cambiano di stato tutti i flip-flop. In questo modo ogni FF cambia di stato alla metà della frequenza a cui lo fa l'FF precedente. Nel diagramma dei tempi riportato sotto lo schema, si può vedere come il valore rappresentato dagli FF si incrementi di una unità ad ogni colpo di clock, sino a che tutti e quattro siano caricati con il valore 1; a quel punto, si ripete il ciclo. Se ogni FF ha un tempo di ritardo di 20 ns,



Contatore asincrono ascendente in codice 8421.



Contatore asincrono discendente.

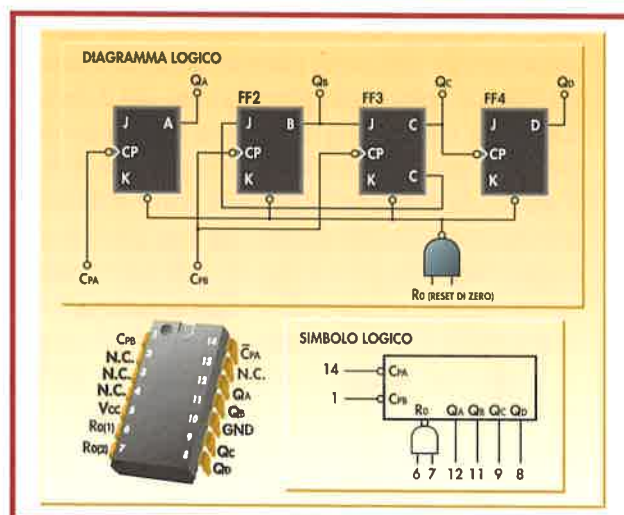


Diagramma logico, piedinatura e simbolo del divisore a modulo 12, implementato con un SN7492N.

il ritardo totale fra l'istante in cui si applica a FF1 il fronte di discesa, e il momento in cui FF4 completa la commutazione, sarà di 80 ns. Questo tempo di ritardo determina il periodo minimo, cioè la massima frequenza di conteggio. Per fare in modo che il contatore sia discendente, e ad ogni impulso di clock si decrementi il valore che rappresentano gli FF, basta collegare l'uscita Q# con l'ingresso del clock dell'FF successivo. Come si può vedere nel cronogramma disegnato sotto lo schema del contatore discendente asincrono, il conteggio inizia con il valore 1111, e decrementa a 1110, 1101, 1100, ecc. sino a 0000, dopodiché si ripete il ciclo.

Nella figura soprastante abbiamo lo schema interno, la piedinatura e lo schema logico del circuito integrato SN7492N che è formato da quattro FF JK, il primo dei quali funziona come divisore per due, e gli altri come divisore per 6, ottenendo così un divisore per 12.

Contatori (II)

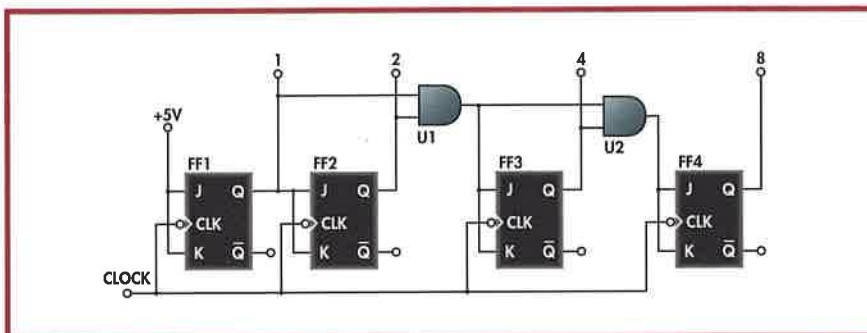
CONTATORI SINCRONI

In questo tipo di contatori tutti gli FF si attivano grazie ad un segnale di clock comune, e tutti cambiano allo stesso tempo.

Gli ingressi J e K di tutti gli FF sono collegati alle uscite Q di tutti gli FF precedenti tramite delle porte AND, come si vede nella figura. Notate che ogni FF commuta quando le uscite di quelli precedenti sono tutte a 1, perché solo in quel momento gli ingressi J e K dell'FF stesso si trovano a livello alto. Per convertire in contatore discendente il circuito della figura, basta collegare gli ingressi J e K di ogni FF alle uscite Q# dei precedenti.

Dato che tutti gli FF ricevono gli impulsi di clock nello stesso istante, il ritardo non si propaga in serie come succede nei contatori asincroni, quindi il valore del ritardo non è legato al numero di FF del contatore. Se si considera che il tempo di ritardo degli FF è di 20 ns e quello delle porte logiche AND di 10 ns, il ritardo totale nel cambio di stato degli FF è di 30 ns, questo significa che è possibile lavorare ad una frequenza massima di 33,33 MHz.

Un'altra caratteristica molto importante dei contatori sincroni è che tutte le uscite cambiano in modo simultaneo, evitando stati di transizione intermedi, con valori non corretti delle uscite sino a che non si completi



Contatore sincrono con riporto a 4 bit.

la propagazione per tutti gli FF che compongono il contatore.

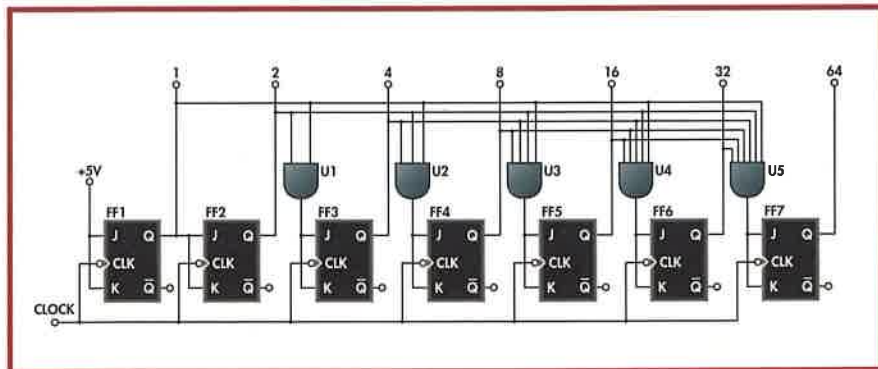
Il costo dei contatori sincroni risulta più elevato, in quanto sono necessarie le porte AND, le quali hanno bisogno di un ingresso in più del numero di FF di cui dispone il contatore.

CONTATORE SINCRONO CON RIPORTO

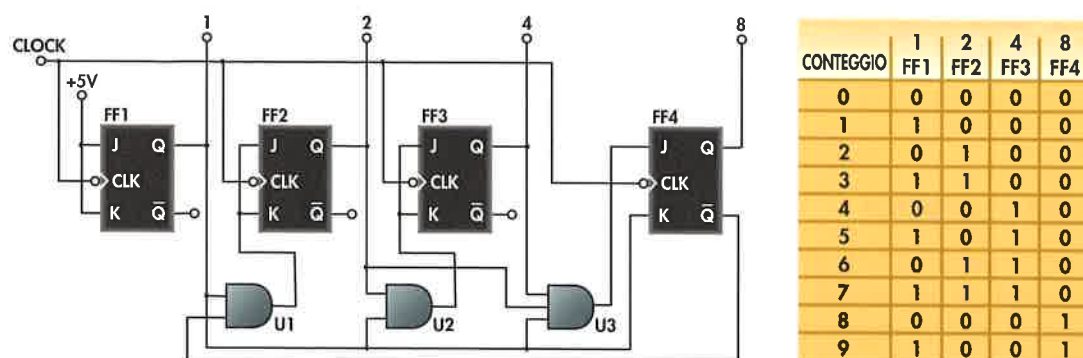
Nella figura si mostra lo schema di un particolare tipo di contatore sincrono, chiamato "con riporto", in riferimento alle porte AND collegate in serie di cui dispone. In questo caso il ritardo di propagazione delle porte AND è cumulativo, e riduce la frequenza di lavoro.

CONTATORE BCD

Si tratta di un contatore molto pratico, che realizza il conteggio in decimale: il codice BCD (Decimale Codificato in Binario), a differenza dei contatori binari puri, visti in precedenza. L'utilizzo del codice BCD è molto comune, dato che nella vita quotidiana il sistema decimale è quello più utilizzato. Ha solo 10 stati, dallo 0 al 9, invece dei 16 che ha il binario puro a 4 bit. Il conteggio e il valore degli FF nel contatore BCD, è identico a quello del binario puro, però con il decimo colpo di clock ritorna a 0. In pratica, quando arriva a 9 (1001) e arriva il successivo colpo di clock, passa a 0



Contatore sincrono ascendente da 7 bit.



Contatore BCD sincrono.

(0000), invece di passare al digit A (1010) come succede nei contatori binari puri.

Per ottenere il passaggio da 1001 a 0000, dobbiamo realizzare alcune connessioni speciali fra gli FF del contatore binario. Nella figura è riportato lo schema di un contatore BCD sincrono, oltre alla tabella di conteggio con i valori che assumono i suoi 4 FF.

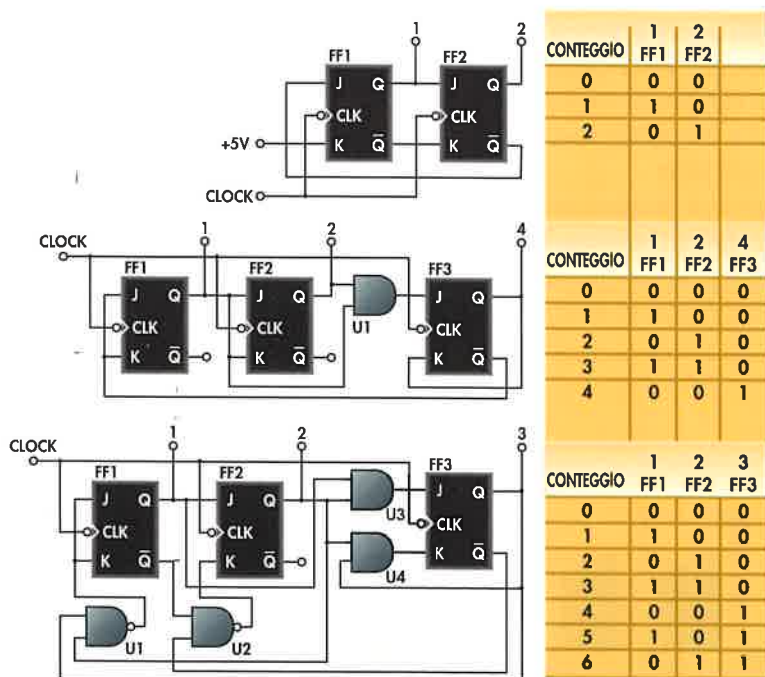
La strategia seguita nello schema della figura per passare da 1001 a 0000 è la seguente: per mantenere FF2 a zero nel decimo colpo di clock, l'uscita Q# di FF4 si collega all'ingresso della AND U1, in questo istante $Q\# = 0$ in FF4 e J e K di FF2 ricevono un livello basso, per cui l'uscita non può passare a livello alto. Per fare in modo che FF4 passi a 0 nel decimo clock, si collega la Q di FF1 con la K di FF4, in questo modo l'ingresso K passa alternativamente da alto a basso, e FF4 si mantiene nello stato 0. Per passare dallo stato 7 allo stato 8 si utilizza la porta AND U3, che rileva quando l'uscita dei primi 3 FF vale 1.

CONTATORI IN MODULO N

Si dice che un contatore è di modulo N quando ha N stati differenti. Ad esempio un contatore con 4 FF può assumere 16 stati differenti, se utilizza il codice binario puro, però se si introduce della logica ausiliaria può essere ridotto a 10, come succede con il contatore BCD.

La tecnica abituale per la costruzione di un contatore di modulo N , consiste nell'assemblare assieme vari contatori, in modo che il prodotto dei loro moduli coincida con il valore del modulo che cerchiamo.

Ad esempio: un contatore di modulo 12 può essere costruito utilizzandone uno di modulo 2 e uno di modulo 6, o uno di modulo 3 con uno di modulo 4. Nella figura sono rappresentati tre contatori base, con moduli 3, 5 e 7.



Contatori sincroni di modulo 3, 5 e 7 con le loro rispettive tabelle di conteggio.

Memorie (I)

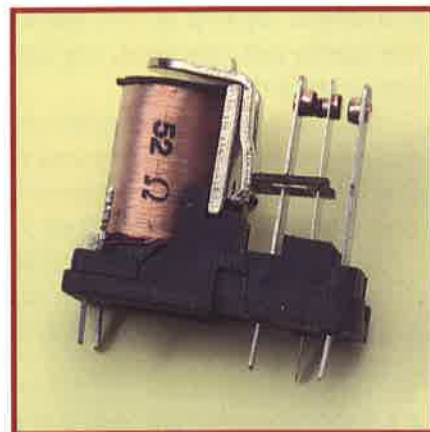
L'IMPORTANZA DI RICORDARE

Le memorie sono circuiti integrati digitali capaci di contenere informazione binaria; qualsiasi sistema digitale che debba contenere dati, programmi, o informazioni di qualsiasi tipo, necessita di memoria. A fronte della crescente necessità di memorizzare quantità di dati sempre maggiori, sono state sviluppate memorie con maggiori capacità e maggiori densità. Una delle più diffuse applicazioni delle memorie è nei PC, nei quali costituiscono un parametro fondamentale, per determinarne la capacità operativa.

Le memorie integrate nei microprocessori memorizzano i programmi e i dati. Sia i programmi che i dati si memorizzano come insiemi di bit, per questo l'elemento fondamentale della memoria è l'elemento della cella che contiene il bit.

Per memorizzare l'informazione binaria, inizialmente furono utilizzate le schede perforate: a seconda che la posizione contenesse o meno il foro, il bit assumeva uno dei suoi due possibili valori. In seguito furono utilizzati i relé elettromagnetici, la loro attivazione o disattivazione ne determinava il valore binario. Con l'avvento dell'elettronica, le celle di memoria furono imple-

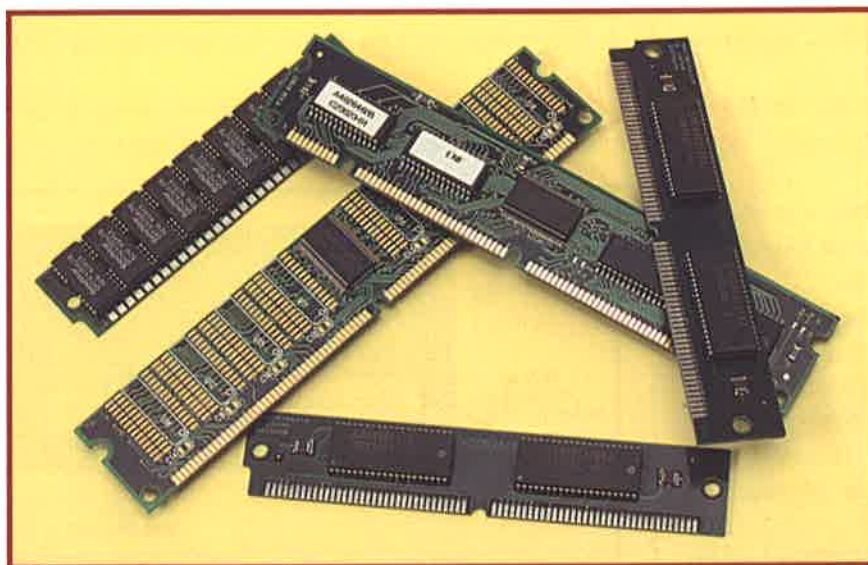
mentate con le valvole a vuoto. In seguito si utilizzarono anche le bande magnetiche, i tamburi, i nastri e i dischi magnetici. Noi ci occuperemo di memorie a semiconduttore, contenute nei circuiti integrati, dato che sono quelle usate comunemente in microrobotica e che utilizzeremo per la costruzione di Monty.



Il relé fu uno dei primi dispositivi utilizzati per memorizzare l'informazione digitale.

STRUTTURA INTERNA

In generale possiamo dire che una memoria è un insieme di registri, ognuno dei quali contiene diversi bit. Ogni registro è una posizione della memoria che corrisponde ad un indirizzo che la identifica. Ogni volta che si legge o si scrive una memoria, si legge o si scrive uno dei suoi registri; i bit che determinano



Le memorie sono un chiaro esempio di circuiti integrati ad alta scala di integrazione.

INDIRIZZO	CONTENUTO				
	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0	
0 0 0					PAROLA 0
0 0 1					PAROLA 1
0 1 0					PAROLA 2
0 1 1					PAROLA 3
1 0 0					PAROLA 4
1 1 1					PAROLA 5
1 1 0					PAROLA 6
1 1 1					PAROLA 7

Struttura di una memoria formata da otto posizioni da quattro bit ciascuna.

la lunghezza del registro stabiliscono di conseguenza anche la parola di lavoro della memoria, dato che questa è la quantità di bit che viene trasferita ad ogni accesso. Nella figura è riportata una memoria formata da otto registri da quattro bit ciascuno.

CAPACITÀ

È chiamata capacità di una memoria il numero di bit che questa può contenere, che corrisponde sempre ad una potenza del 2.

Questa caratteristica si evidenzia dal fatto che l'indirizzo di una posizione di memoria è dato da un insieme di n bit, il che fa sì che il numero di indirizzi di questa memoria sia la potenza n di base 2.

La capacità si ottiene moltiplicando il numero di indirizzi per i bit che contengono ognuno. Ad esempio, una memoria da 1024 indirizzi da 8 bit ha una capacità di 1 K byte.

CARATTERISTICHE DELLE MEMORIE

Oltre alla capacità, le memorie si classificano anche in funzione di altri parametri fondamentali, come il "tempo di accesso" e la "durata dell'informazione".

Il tempo di accesso è quello impiegato per realizzare una operazione di lettura della memoria; normalmente si misura in nanosecondi (ns) e il suo simbolo è tACC. Serve per esprimere la velocità di funzionamento della memoria, dato che indica il tempo che trascorre fra l'istante in cui si posiziona l'indirizzo all'ingresso e il momento in cui appare l'informazione sull'uscita. Una delle classificazioni delle memorie, fa riferimento al modo in cui trattano l'informazione al loro interno, possiamo distinguere le seguenti classi:

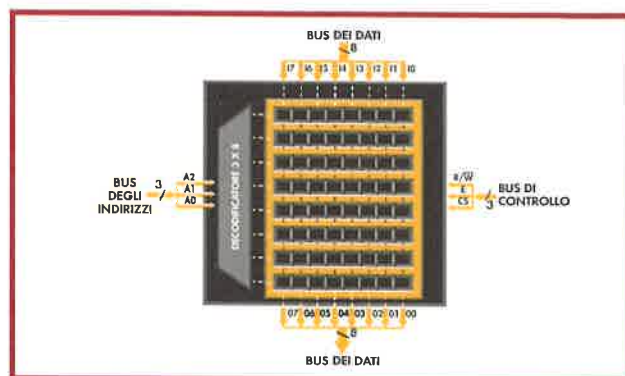
- **Memorie permanenti:** contengono sempre la stessa informazione e non si possono cancellare. Sono memorie di sola lettura.

- **Memorie volatili:** perdono l'informazione che hanno memorizzato quando si interrompe l'alimentazione. Sono memorie di lettura e scrittura.

- **Memorie non volatili:** mantengono l'informazione che è stata depositata in esse precedentemente, anche se viene a mancare l'alimentazione. Sono di lettura e scrittura, dato che si possono scrivere e leggere.

- **Memorie a lettura distruttiva:** la lettura di queste memorie implica la distruzione delle informazioni che contenevano.

- **Memorie a rinfresco:** l'informazione dura solo un tempo determinato. Per fare in modo che non sparisca la dobbiamo rinfrescare periodicamente.



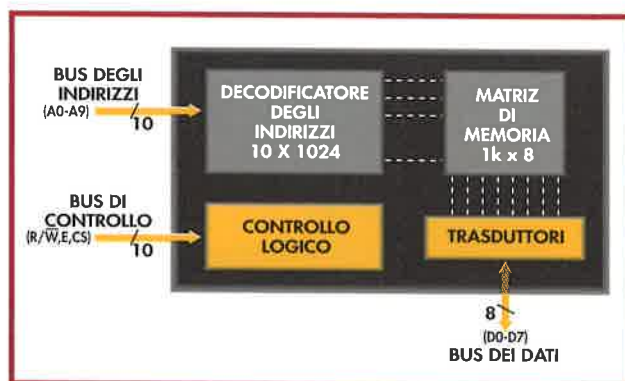
Struttura interna e segnali di ingresso e uscita di una memoria da 8 indirizzi da 8 bit.

MEMORIE A SEMICONDUTTORE

Questo tipo di memoria è quello che si utilizza attualmente a carattere universale, come memoria principale dei sistemi digitali basati sui microcontroller e microprocessori. Nella figura si mostra uno schema della struttura interna di una memoria da 8 indirizzi da 8 bit cadauno. Per selezionare la posizione a cui accedere, si utilizza un indirizzo di tre bit che si invia tramite il bus degli indirizzi. Il decodificatore interno a 3 ingressi e 8 uscite attiva la posizione indirizzata, che viene letta o scritta a seconda del segnale di controllo R/W#. Quando si realizza una lettura, gli 8 bit di informazione contenuti in questa posizione escono tramite il bus dei dati. In caso di scrittura, l'informazione binaria presente sulla linea del bus dei dati è scritta nella posizione scelta.

Il segnale E (Enable) è quello del permesso di funzionamento della memoria e CS (Selezione del Chip) abilita o disabilita il funzionamento generale del circuito integrato.

Nella figura è riportata la struttura semplificata di una memoria da 1 K posizioni da 8 bit cadauna.



Schema semplificato della struttura interna di una memoria da 1 K x 8 bit.

Memorie (II)

CLASSIFICAZIONE DELLE MEMORIE A SEMICONDUTTORE

Tutte le memorie fabbricate con semiconduttori sono dette ad "accesso casuale" perché si può accedere a qualsiasi posizione in modo diretto, basta collocare il suo indirizzo sul bus corrispondente. Possiamo fare una prima classificazione principale dividendo le memorie in due grandi gruppi: ROM e RAM.

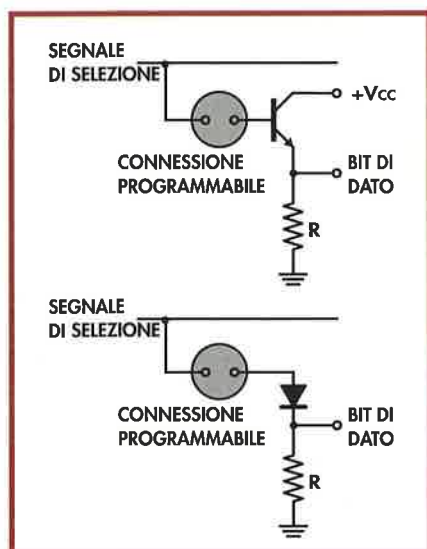
ROM (READ ONLY MEMORY)

Sono memorie di sola lettura, i dati si scrivono durante il processo di fabbricazione, o con un processo indipendente, in seguito potranno solo essere letti. Sono memorie non volatili, perché anche se manca l'alimentazione non perdono l'informazione memorizzata. Sono composte da celle molto semplici, basate su di un diodo o su di un transistor, come si può vedere nella figura. Se si realizza la connessione programmabile, la cella assume un valore 1, in caso contrario uno 0.

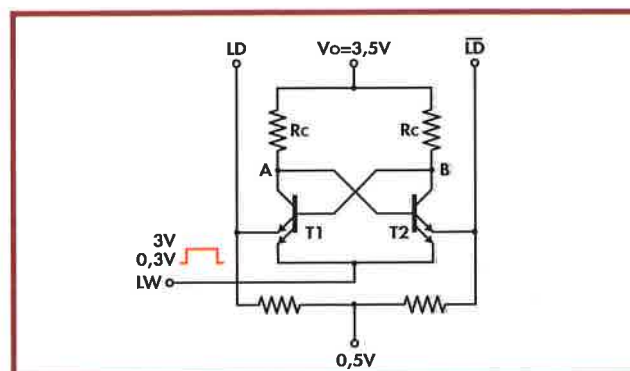
RAM (RANDOM ACCESS MEMORY)

Sono memorie ad accesso casuale, di lettura e scrittura.

Sono volatili, cioè perdono l'informazione memorizzata nelle loro celle quando si toglie l'alimentazione. Le celle sono implementate sulla base di transistor bipolari o MOS, perché questi ultimi occupano meno superficie. La cella bipolare base consiste in un bistabile con due transistor,



Cella di una memoria ROM con un transistor e con un diodo.



Cella di una memoria SRAM bipolare.

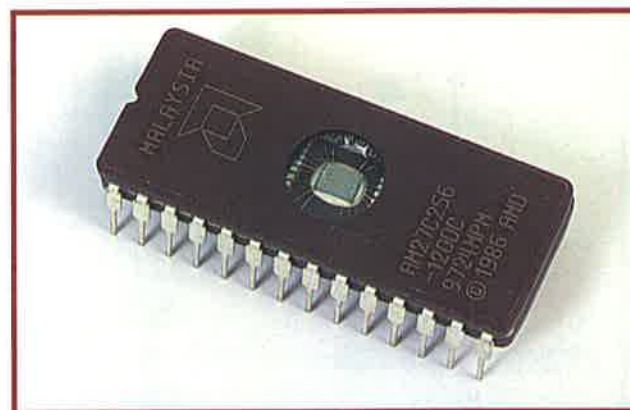
T1 e T2, che funzionano con stati opposti, in modo da memorizzare un 1 o uno 0 a seconda del transistor che conduce.

TIPI DI MEMORIE ROM

A seconda delle caratteristiche costruttive le memorie ROM si dividono nei seguenti tipi:

- **ROM con maschera:** i dati sono scritti durante il processo di fabbricazione e non possono più essere modificati. Questo tipo di memorie è interessante per le produzioni in grande serie, superiori alle 10.000 unità, dove i processi di scrittura sarebbero molto laboriosi.

- **PROM o ROM programmabili:** sono memorie di



La finestra di cristallo della EPROM permette di cancellare il suo contenuto mediante raggi ultravioletti.

sola lettura, in cui la scrittura delle informazioni è realizzata dall'utente utilizzando uno scrittore controllato da un PC. Quando la serie da produrre è medio-piccola, questo tipo di memoria può essere una buona soluzione.

- **EPROM o ROM riprogrammabili:** sono memorie non volatili che possono essere scritte dall'utente e, se lo desidera, anche cancellate. Il circuito integrato dispone di una finestra di cristallo nella parte superiore del contenitore, come si può vedere dalla figura. La cancellazione delle informazioni si ottiene sottomettendo il chip della EPROM per alcuni minuti a raggi ultravioletti.

- **EEPROM e FLASH:** sono memorie di lettura e scrittura, non volatili, scrivibili e cancellabili elettricamente dall'utente. Questo evita il noioso lavoro della cancellazione con raggi ultravioletti.

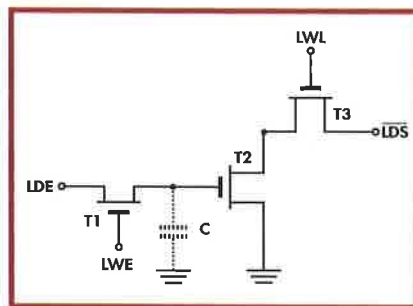
Questi tipi di memoria sono utilizzati dal PIC16F84; per la memoria di programma usa una FLASH da 1 K parole da 14 bit ognuna, e per memorizzare i dati in modo non volatile utilizza una EEPROM da 64 indirizzi da 8 bit cadauno.

Le celle della EEPROM sono complesse, il che limita la loro densità di integrazione, inoltre sono care. Le celle della memoria FLASH sono più simili a quelle della EPROM, per cui permettono di ottenere maggiori densità con prezzi più ridotti.

TIPI DI MEMORIE RAM

A seconda del tipo di cella da cui sono costituite, le memorie RAM si classificano in "statiche" e "dinamiche", inoltre in base alla tecnologia di fabbricazione si suddividono in "bipolari" e "MOS".

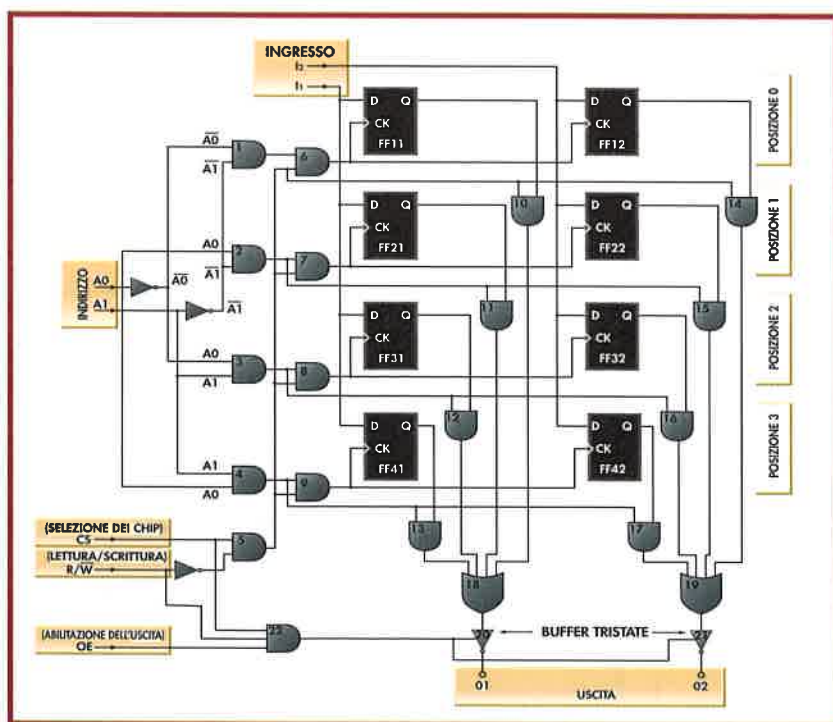
La lettura non è distruttiva e l'informazione rimane inalterata nella cella. Il loro principale problema è la volatilità, anche se ultimamente stanno arrivando sul mercato modelli di RAM non volatili, che impiegano una minuscola batteria integrata nel contenitore.



Cella DRAM con tre transistor MOS.

Le celle della RAM statica possono utilizzare transistor bipolari o MOS, con preferenza verso questi ultimi perché permettono una maggiore densità di integrazione, sono più economici e consumano meno potenza. Nella figura è riportata una RAM statica da quattro indirizzi da due bit ognuno. Le linee degli indirizzi A0 e A1 e le porte AND1 – AND4 determinano la cella a cui accedere. L'uscita AND8 ha funzione di clock per FF31 e FF32, i quali si caricano del dato che ricevono dagli ingressi I1 e I2 rispettivamente.

Le memorie RAM dinamiche, o DRAM, sono basate su celle elementari, che consistono in un condensatore, il cui livello di carica rappresenta il livello logico memorizzato. L'inconveniente di queste celle così semplici, è costituito dalla perdita del condensatore che ha bisogno di essere ricaricato, o "rinfrescato", ogni dato tempo; si tratta appunto del ciclo di rinfresco di cui necessitano costantemente queste celle, da cui deriva anche il nome di dinamiche. Nella figura si presenta una cella dinamica implementata con tre transistor. La capacità C corrisponde al livello di tensione sul transistor T2 rispetto alla massa. Si può accedere a C da due percorsi differenti, a seconda che si voglia leggere o scrivere la cella. L'operazione di lettura è controllata da T1 e la scrittura da T3.



Struttura interna di una RAM statica da quattro indirizzi da due bit ognuno.

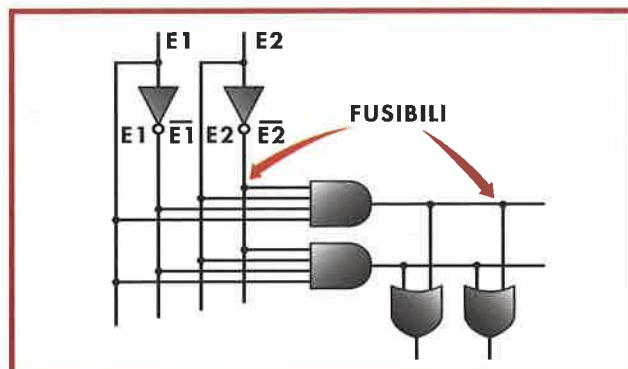
Logica programmabile

CIRCUITI INTEGRATI DIGITALI SU MISURA

Il progresso tecnologico aumenta costantemente il numero dei milioni di transistor che si possono inserire all'interno di un chip, un esempio su tutti: i microprocessori Pentium contengono diverse decine di milioni di transistor.

Approfittando di questa possibilità, alcuni fabbricanti di circuiti integrati hanno pensato di inserire nel chip diverse quantità di blocchi digitali differenti, che si possano interconnettere in modo flessibile, per generare schemi che risolvano le specifiche dei progetti. Seguendo questa filosofia costruttiva, sono stati presentati sul mercato un'infinità di prodotti che permettono di configurare un sistema digitale, in base alle connessioni programmabili dei dispositivi base contenuti in un circuito integrato. Questa tecnica si chiama logica programmabile.

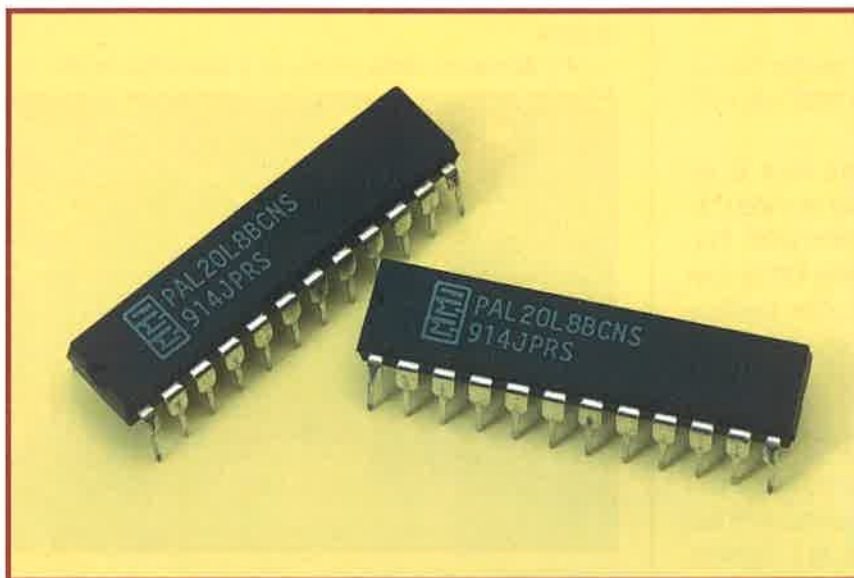
I circuiti predefiniti o "gate array" (matrici di porte) contengono centinaia di celle elementari a livello di porte (AND, OR e NOT) i cui collegamenti possono essere programmati dall'utente. Le PAL, brevettate dalla ditta Advance Micro Devices Ltd., e le GAL, di Lattice Semi-



La rottura dei fusibili configura la interconnessione fra le celle.

conductor, sono prodotti molto popolari, che riportiamo in figura.

Esistono anche circuiti logici programmabili di maggiore complessità che contengono celle a livello di registri, sommatori, contatori, amplificatori di ingresso e uscita ecc. Infine i compilatori di silicio gestiscono data base in cui sono memorizzate le descrizioni geometriche di una moltitudine di celle. Il compilatore genera la descrizione geometrica (layout) del blocco finale, governando le routines che scrivono i parametri dei dispositivi.



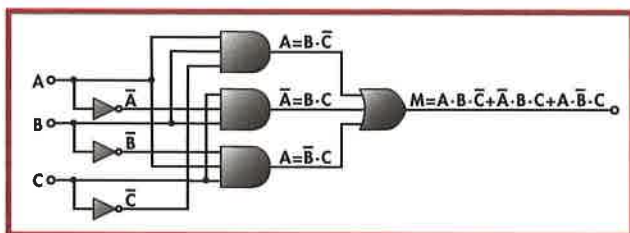
Aspetto di due circuiti integrati programmabili tipo PAL.

LE PAL

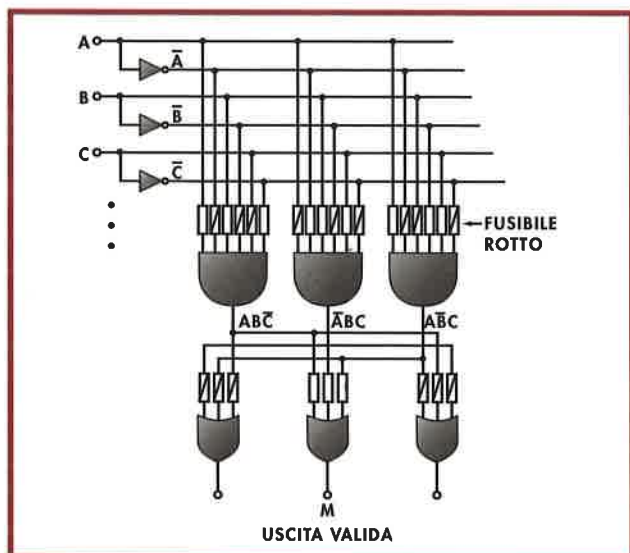
Attualmente esiste sul mercato mondiale una grande varietà di circuiti logici programmabili. In generale si può dire che al loro interno ci sono numerose porte AND, i cui ingressi, se necessario, possono essere negati mediante porte NOT, e le cui uscite si possono collegare a un altro grande insieme di porte OR. L'interconnessione fra gli ingressi e le uscite si realizza mediante fusibili che possono essere bruciati, per interrompere i collegamenti indesiderati, come mostrato nella figura.

ESEMPIO

Supponiamo di voler implementare un sistema digitale di tipo combinatoria-



Risoluzione dell'equazione logica con le porte digitali commerciali.



Quando l'utilizzatore fonde i fusibili indicati, si ottiene all'uscita M della porta OR l'uscita digitale dell'equazione proposta.

le, che risponda alla seguente equazione:

$$M = A \cdot B \cdot C + A \cdot B \cdot \bar{C} + \bar{A} \cdot B \cdot C + \bar{A} \cdot B \cdot \bar{C}$$

Lo schema logico che si offre in figura, risolve l'equazione con porte convenzionali: tre porte NOT, tre AND e una OR.

Utilizzando una PAL si selezionano tre linee di ingresso: A, B e C, che si possono applicare in modo diretto oppure negato, all'ingresso di tre porte AND. Portando le uscite di queste ultime in una porta OR, si configura il circuito adatto a risolvere l'equazione. Dobbiamo rompere o bruciare i fusibili adeguati, per poter adattare la PAL all'equazione proposta.

NOMENCLATURA E GESTIONE DELLE PAL

Le lettere e i numeri di una PAL 20L8, hanno i seguenti significati: le lettere PAL designano il costruttore, il numero 20 determina il numero di ingressi, la L significa che il livello logico attivo per le uscite è quello basso, e infine il numero 8 indica il numero di uscite. La difficoltà

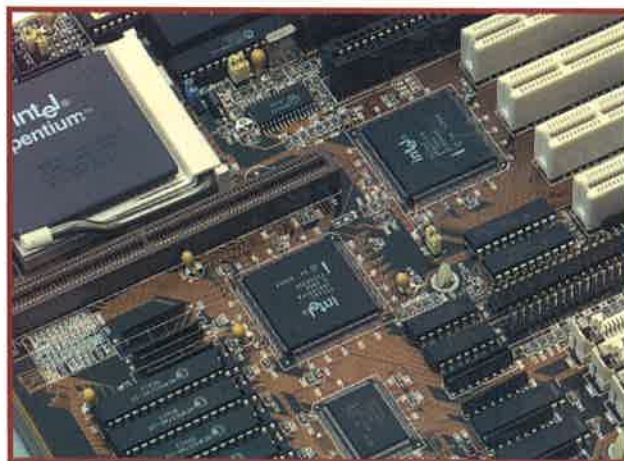
nell'utilizzo delle PAL è insita nella procedura di bruciatura dei fusibili, ovvero, nella loro programmazione. Per realizzare questo processo, i fabbricanti utilizzano un software e un programmatore di PAL che si collega alla porta del PC. La PAL si installa sopra lo zoccolo del programmatore e con il software di sviluppo si introduce l'equazione logica, bruciando i fusibili in modo che la PAL risponda alla suddetta equazione.

Oltre ad implementare il circuito combinatoriale, che richiede l'uso di molte porte logiche, sono anche impiegate nella costruzione di automi e nella sostituzione di memorie tipo ROM, aggiungendo al sistema maggior sicurezza contro le copie.

LE GAL

Sono simili alle PAL, però hanno il vantaggio che si possono scrivere, cancellare e riprogrammare. Hanno una forte diffusione nel progetto elettronico. Le loro uscite possono essere programmate per scegliere il livello attivo. Le uscite sono composte da macrocelle logiche, al cui interno è prodotta la funzione OR, per ottenere la somma dei prodotti così come avveniva con le PAL. Questa caratteristica le rende molto adatte all'implementazione di circuiti sequenziali. Per completare questa panoramica sulla logica programmabile, si espongono i quattro vantaggi principali che essa apporta:

- 1°. Semplificazione del progetto, basta introdurre l'equazione da risolvere.
- 2°. Mantiene le stesse prestazioni e le caratteristiche della logica convenzionale.
- 3°. Riduzione della superficie del PCB e della manodopera.
- 4°. Aumento della sicurezza e dell'affidabilità.



I circuiti logici programmabili sono il cuore dei moderni sistemi elettronici.

Amplificatori operazionali (I)

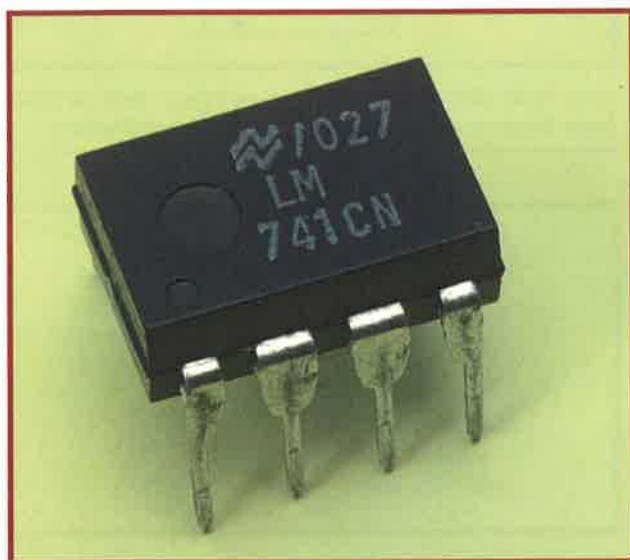
UN PO' DI STORIA

L'amplificatore operazionale, il cui simbolo è O.A. (Operational Amplifier), è uno dei dispositivi più utilizzati in elettronica.

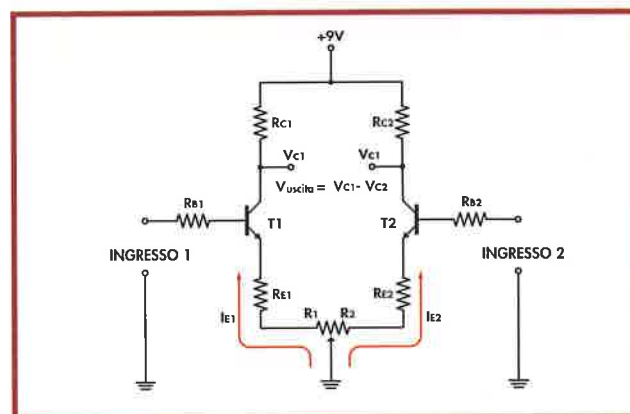
Lo sviluppo di questi amplificatori iniziò negli anni 60, i primi modelli erano costruiti con componenti discreti, quando ancora si utilizzavano le valvole a vuoto. Erano applicati soprattutto nella soluzione di operazioni matematiche, per questo ricevettero il nome di "operazionali". Con essi si fabbricavano calcolatrici che non assomigliavano per nulla a quelle attuali. Più avanti gli O.A. furono costruiti con transistor e dopo in forma di circuiti integrati, come si può vedere nella figura. La loro principale caratteristica, che li rende indispensabili in molti progetti, è la facilità nello stabilirne il guadagno. Hanno un ampio margine di tensione di alimentazione e ne esiste una grande varietà di modelli.

AMPLIFICATORE DIFFERENZIALE

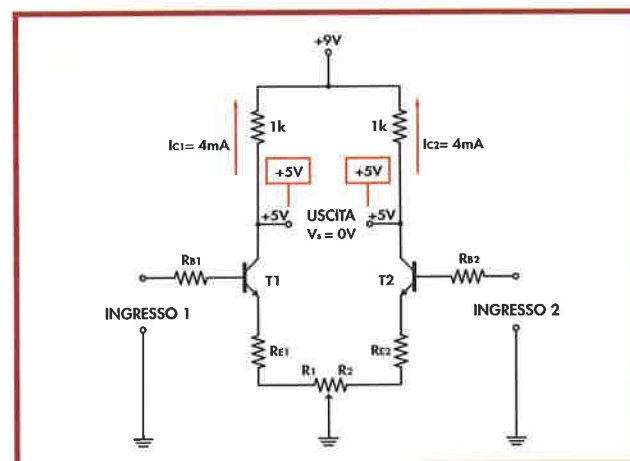
È il circuito base su cui sono implementati gli O.A. ed è formato da due transistor identici, polarizzati con la stessa tensione, che funzionano in parallelo, così come si può vedere nello schema della figura. Dato che il



Presentazione comune di un O.A. in forma di circuito integrato.



Schema base dell'amplificatore differenziale.

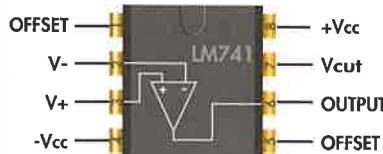


Quando il segnale dei due ingressi è uguale e la regolazione del potenziometro pareggia le correnti nei due transistor, la tensione di uscita è zero.

montaggio è simmetrico, $T1 = T2$, $RC1 = RE1 = RE2$ e $RB1 = RB2$, se le basi dei due transistor ricevono lo stesso segnale, le correnti che attraversano i due transistor saranno identiche, anche se a causa della tolleranza esiste una piccola differenza. Per ottenere la perfetta uguaglianza tra le due correnti si utilizza un potenziometro che bilancia la resistenza di emettitore, ottenendo di eguagliare la tensione sui connettori, in modo che la tensione di uscita dell'amplificatore differenziale, che è uguale alla differenza di tensione fra i collettori, sia

nulla, come si può vedere nella figura. Dopo aver effettuato la regolazione dell'amplificatore, se esiste una differenza di tensione tra i due ingressi si squilibrano le correnti, e appare un segnale sull'uscita che è un'amplificazione della differenza fra le due basi.

Un O.A. è un amplificatore dif-



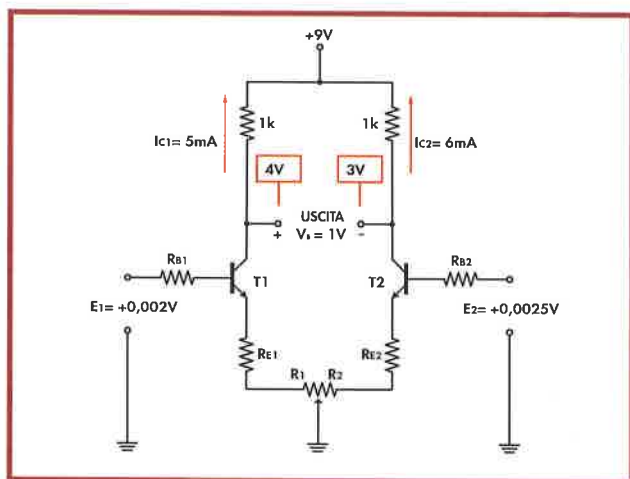
Piedinatura del O.A. LM741 a otto piedini.

l'ingresso invertente, mentre l'altro ha segno + ed è quello dell'ingresso non invertente. Il segnale introdotto tramite il terminale - esce amplificato ma invertito.

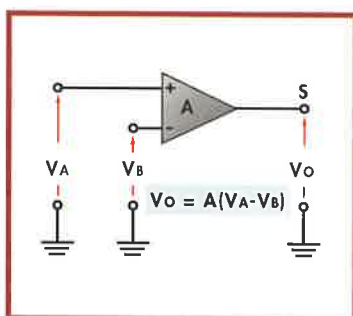
L'O.A. IDEALE

Anche se l'O.A. ideale non esiste, in pratica si utilizza per calcolare i parametri dell'O.A. reale. Quello ideale ha

un guadagno infinito, anche se quelli reali arrivano a fattori di centomila. L'impedenza di ingresso è infinita e quella di uscita nulla. Ha la capacità di amplificare i segnali le cui frequenze vanno da 0 all'infinito. La tensione di offset è nulla, ossia, la tensione di uscita è zero quando non c'è differenza fra i segnali di ingresso. L'O.A. lavora con due tensioni DCV uguali, però di diverso segno, per questo quando abbiamo una piccola differenza di tensione sui suoi ingressi l'uscita sarà la massima DCV e il segno dipenderà dal più alto degli ingressi. Per controllare il guadagno dell'O.A. si pone una resistenza R_r di retroazione fra l'uscita e l'ingresso come mostrato nella figura.



La differenza di tensione sugli ingressi provoca un segnale proporzionale amplificato sull'uscita.



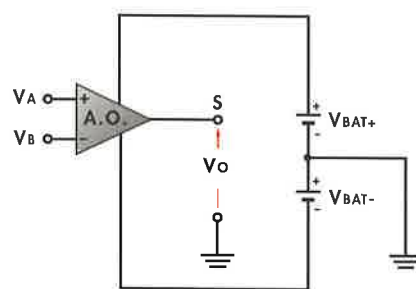
Rappresentazione del comportamento del O.A.

ferenziale con diversi stadi amplificatori e circuiti complementari, che risponde a $V_O = A(V_A - V_B)$, essendo A il guadagno, o fattore di amplificazione.

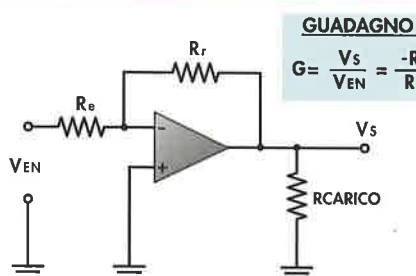
SCHEMA DEI COLLEGAMENTI

Il simbolo dell'O.A. è un triangolo con tre

terminali, due rappresentano gli ingressi e uno l'uscita. Questo non significa che un O.A. disponga solo di tre piedini di collegamento più le alimentazioni. Come si può vedere nella struttura interna dell'LM741, un classico, esistono anche terminali per la compensazione in frequenza della resistenza, e una rete di compensazione della tensione continua che può essere all'ingresso o all'uscita. Per quanto riguarda i due terminali di ingresso, sono diversi. Uno ha segno - e corrisponde al-



Una piccola differenza di tensione sugli ingressi dell'O.A. ideale porta la sua uscita alla massima tensione di alimentazione.

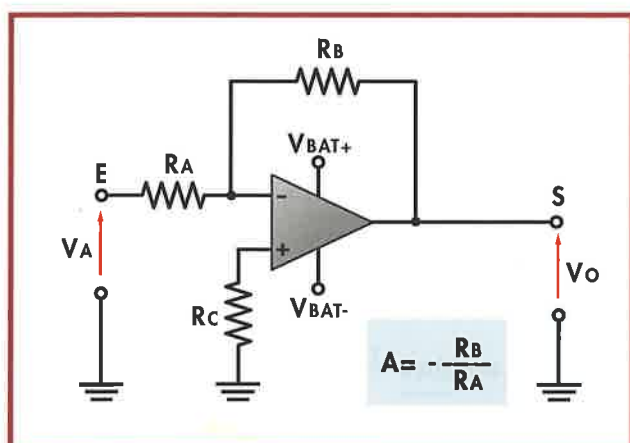


Il guadagno dell'O.A. reale dipende dai valori della resistenza del circuito, secondo la formula.

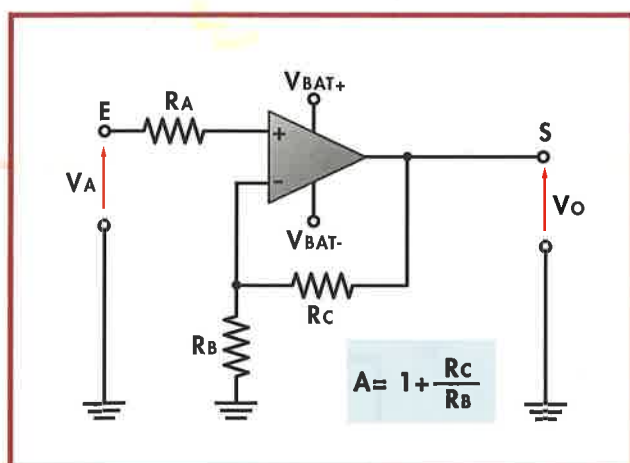
Amplificatori operazionali (II)

AMPLIFICATORE INVERTENTE E NON INVERTENTE

Il comportamento e il guadagno degli O.A., sono determinati dal circuito di retroazione esistente tra l'uscita e l'ingresso. Nella figura è mostrato un amplificatore invertente in cui la tensione di ingresso V_A , è applicata all'ingresso "-". Il valore A dell'amplificazione dipende dai valori delle resistenze R_A e R_B , e il segno "-" che appare nella formula della figura significa che la tensione



Circuito amplificatore invertente in cui si presenta il valore dell'amplificazione.

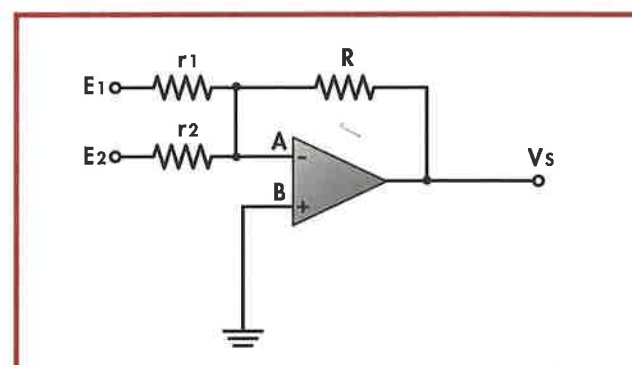


Amplificatore non invertente con il valore del guadagno.

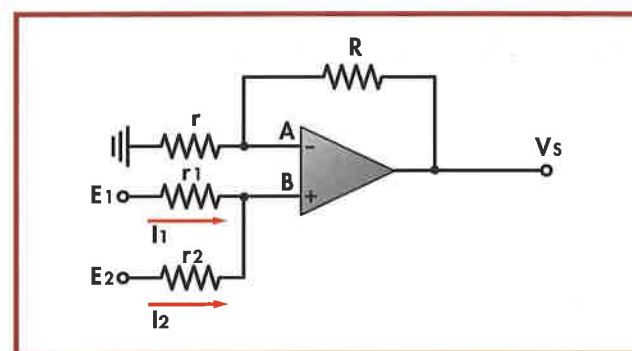
di uscita è invertita o sfasata di 180° rispetto quella dell'ingresso. Nell'amplificatore non invertente, il segnale di ingresso è applicato all'ingresso positivo "+" e l'uscita mantiene polarità e fase dell'ingresso. Il valore dell'amplificazione dipende dai valori delle resistenze del circuito di retroazione.

OPERAZIONI CON GLI O.A.

Dato che il guadagno degli O.A. dipende dal circuito di retroazione posto tra l'uscita e l'ingresso, variando la retroazione possiamo dedurre che il segnale di uscita è funzione di quello dell'ingresso, e corrisponde ad un'operazione matematica. In seguito descriveremo diversi schemi per ottenere le varie operazioni matematiche.



L'O.A. come sommatore invertente.



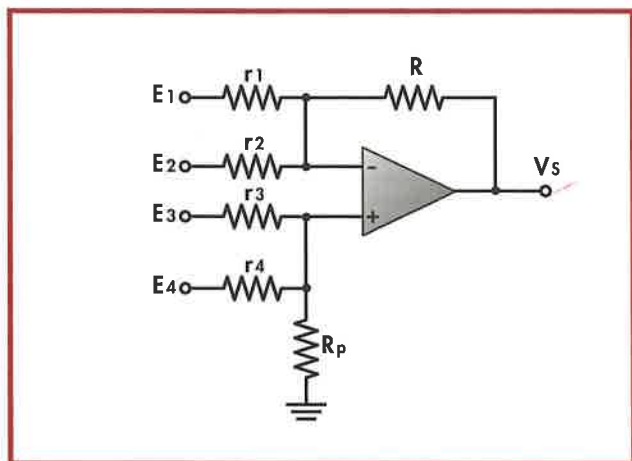
Schema di un O.A. che sta funzionando come sommatore non invertente.

SOMMATTORE INVERTENTE E NON INVERTENTE

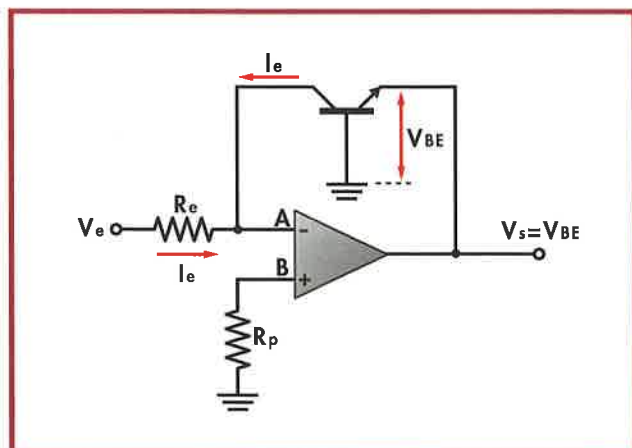
In questo caso il segnale di uscita è la somma dei segnali applicati in parallelo agli ingressi "-", tramite delle resistenze, come possiamo vedere nella figura. Nel circuito sommatore della figura se $R = r_1 = r_2$, la tensione di uscita è la somma delle tensioni di ingresso, ma invertita: $V_s = -(E_1 + E_2)$. Nella figura è rappresentata la variante del sommatore in cui i segnali di ingresso sono applicati al pin "+" che produce $V_s = E_1 + E_2$ nel caso in cui $R = r_1 = r_2 = r$.

CIRCUITO SOTTRATTORE

Lo schema della figura serve per realizzare la sottrazione dei segnali applicati all'ingresso. Nel caso in cui $R_p = R = r_3 = r_4 = r_2 = r_1$ risulterà che $V_s = E_3 + E_4 - (E_1 + E_2)$.



Schema di un O.A. in funzione di sottrattore.



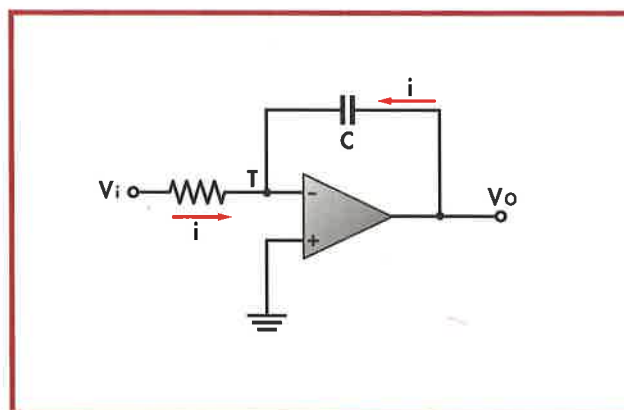
L'O.A. in un circuito che realizza la funzione logaritmica.

CIRCUITO LOGARITMICO

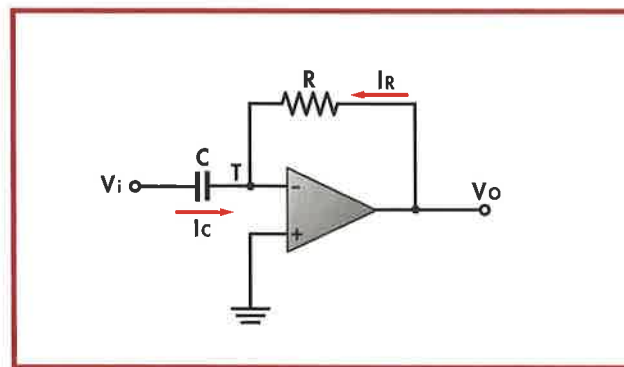
Per la realizzazione di moltiplicazioni, divisioni e potenze, si utilizza la funzione logaritmica. Anch'essa si può implementare tramite un O.A. Se si utilizza come anello di retroazione la giunzione di un collettore/emettitore di un transistor in configurazione di base comune, come quello mostrato nella figura, la risposta non lineare della giunzione N-P si approssima alla risposta logaritmica quasi perfetta per la relazione tensione/corrente e si ottiene $V_s = V_{BE} = -0,06 \log V_e + K$, essendo K una costante.

CIRCUITO INTEGRATORE E DERIVATORE

Tenendo presente le formule che stabiliscono la carica e la scarica di un condensatore, mediante un O.A., possiamo implementare la funzione integrale del segnale di ingresso moltiplicato per una costante $-(1/R.C)$, come si vede nella figura. Cambiando la posizione del condensatore si ottiene un circuito derivatore, in cui la tensione di uscita è la derivata rispetto al tempo del segnale di ingresso moltiplicato per la costante $-R.C$.



Circuito integratore basato su di un O.A.



Circuito differenziatore basato su di un O.A.

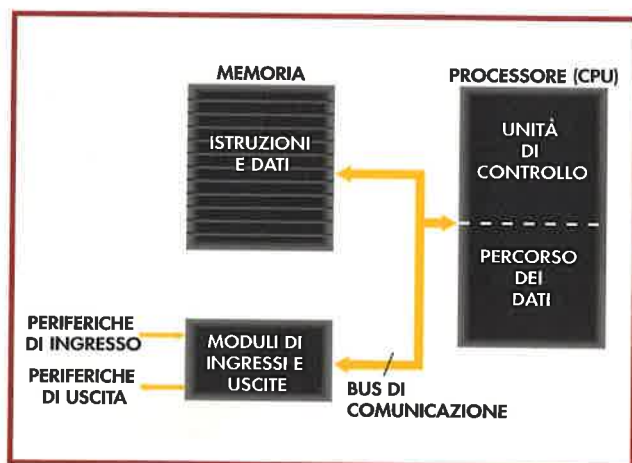
Differenze fra microcontroller e microprocessori

Un computer è un sistema digitale capace di processare programmi costruiti con un insieme di istruzioni appropriato, e di ricevere e trasmettere l'informazione, da elaborare ed elaborata, alle periferiche di ingresso e uscita. Per assolvere a questo compito si compone di tre blocchi fondamentali riportati nella figura e che sono: processore o CPU, memoria e moduli di ingressi e uscite. I microcontroller sono circuiti integrati che contengono tutti i componenti del computer. Basta caricarli con il programma di lavoro e collegare le periferiche agli I/O perché diventino operativi; ovviamente saranno necessari sia l'alimentazione sia la frequenza di funzionamento adeguata, come si può vedere nello schema della figura. Un microprocessore è un circuito integrato che contiene la parte più importante del computer, cioè il processore o

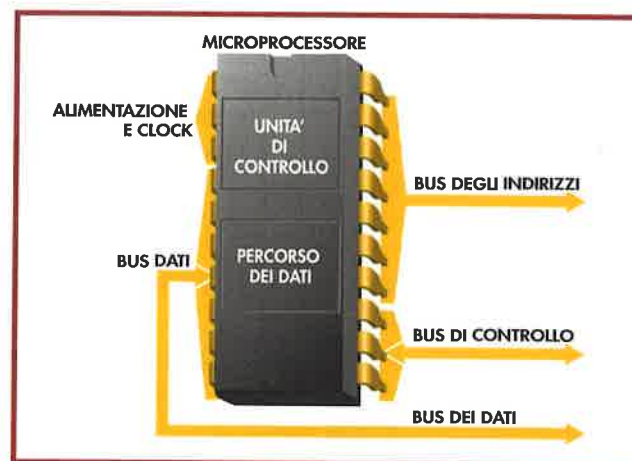


All'interno di un microcontroller ci sono tutti i blocchi del computer.

CPU, che ha il compito di interpretare le istruzioni del programma, ed eseguire le operazioni che ne derivano, ricevendo i dati che funzionano come operandi e fornendo i risultati. Per questo, da solo il microprocessore non è operativo, ha bisogno di essere collegato alla memoria con le istruzioni e i dati, e ai moduli di I/O. I piedini di un microprocessore, a parte la funzione di alimentazione e della frequenza di lavoro, corrispondono con le linee dei bus di comunicazione fra i differenti blocchi. Abbiamo tre bus, quello degli indirizzi, che fornisce l'indirizzo della posizione a cui accedere nella memoria, o nei moduli di I/O; il bus dei dati e delle istruzioni, che trasporta i dati o le istruzioni; il bus di controllo, che contiene i segnali che governano le operazioni da realizzare in ogni momento, come si vede nella rappresentazione grafica della figura.



I blocchi fondamentali del computer sono: processore (CPU), memoria delle istruzioni e dati, moduli di ingressi e uscite.



Il microprocessore contiene solo la CPU, e i suoi piedini supportano i bus di comunicazione con i restanti blocchi del computer.

SOTTOSISTEMI APERTI E CHIUSI

Si dice che un sistema computerizzato, costruito attorno ad un microcontrollore è "chiuso", perché in un solo circuito integrato sono contenuti tutti gli elementi, e non è facilmente espandibile. Il PIC16F84 possiede tutti i componenti di un com-

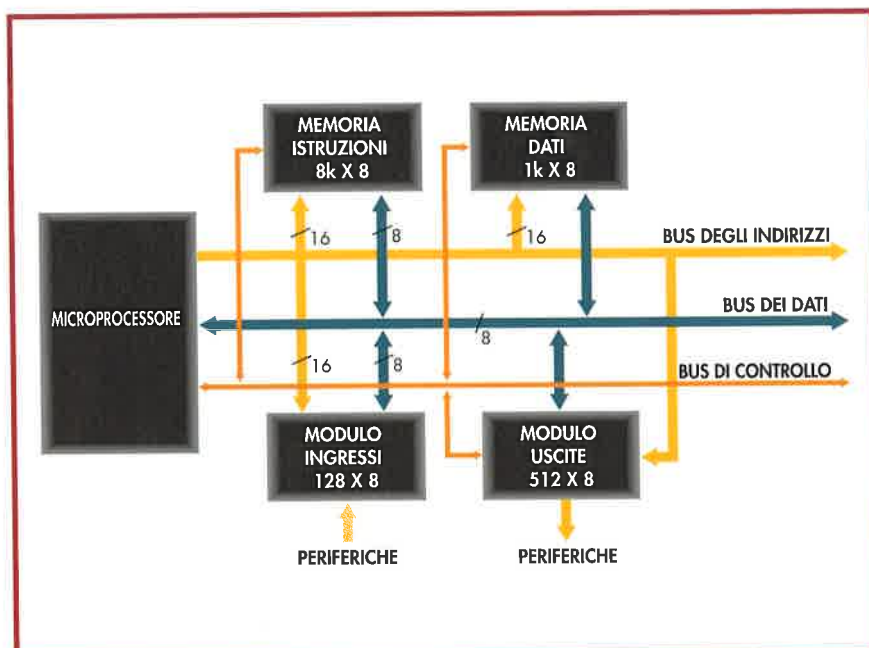


Un computer basato su un microcontroller, si dice che è un sistema chiuso, perché tutte le sue caratteristiche sono stabilite dal costruttore.

Se è necessaria più memoria o più linee di I/O sarebbe consigliabile scegliere un altro modello di PIC. Quando si costruisce un sistema basato su un microprocessore, bisogna anche definire la memoria dei dati, quella delle istruzioni, i moduli di I/O e le risorse ausiliarie; si può configurare la struttura di cui si ha bisogno collegando ai bus gli elementi necessari. Solo la dimensione dei bus limita la capacità massima della memoria. Così, ad esempio, se il bus degli indirizzi di un microprocessore è di 10 linee, il maggior numero di elementi di memoria che può essere controllato sarà di 1.024. Se il bus dei dati è di 8 linee, ogni trasferimento sarà di un byte.

QUANDO SI USA UN MICROPROCESSORE O UN MICROCONTROLLER?

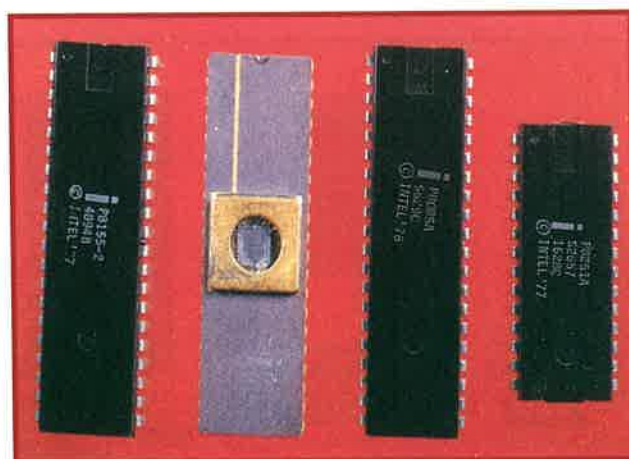
Un microcontroller è progettato per essere incorporato all'interno del prodotto che andrà a governare. In esso viene scritto il programma relativo al compito da realizzare, che sarà sempre lo stesso. Il suo massimo rendimento si ottiene quando contiene tutti gli elementi necessari. Il telefono cellulare, il mouse del computer o il



Un sistema basato su un microprocessore si chiama aperto, perché la sua configurazione è flessibile, a seconda degli elementi che si collegano ai suoi bus.

puter, come è rappresentato nella figura, però "molto limitati". Se fosse necessaria

controllo dei freni ABS delle autovetture, sono esempi rappresentativi delle applicazioni con microcontroller. Un sistema basato su microprocessore è composto da diversi circuiti integrati in grado di comunicare fra loro, ed è facilmente espandibile. Le sue capacità si adattano all'applicazione, collegando i circuiti adeguati che contengono memoria e I/O ai bus. Sono sistemi più cari, occupano più spazio e hanno bisogno di più manodopera, però la loro potenza si adatta ai cambiamenti e alle esigenze delle applicazioni.



Insieme di circuiti integrati che configurano un computer basato su un microprocessore 8085 con EEPROM, RAM e moduli di I/O.