

In natura esistono, come abbiamo visto, materiali conduttori e isolanti, ma non sono stati considerati tutti gli elementi che hanno valori intermedi come il silicio e il germanio. I componenti elettronici sono in gran parte composti di silicio o di germanio. L'elemento più usato nei componenti elettronici del settore "auto" è senz'altro il silicio. L'atomo di silicio è composto da un nucleo intorno al quale ruotano 14 elettroni (fig. 7.1). L'atomo di silicio, come tutti gli atomi, è neutro e si lega agli atomi vicini tramite gli elettroni posti sull'ultima orbita. Ogni atomo può legarsi con altri quattro atomi, impiegando per legarsi un elettrone per ciascun atomo. Se si potesse disporre di silicio puro al 100% con tutti i legami fra gli atomi (legami covalenti) completati (come mostrato in fig. 7.2), questo sarebbe un perfetto isolante.

In pratica ciò non succede mai e alcuni elettroni, anziché formare legami covalenti, restano liberi di muoversi, e lasciano al loro posto un buco o lacuna. La produzione di buchi o lacune cresce all'aumentare della temperatura. Il silicio si comporta come un materiale N.T.C. (coefficiente di temperatura negativo).

Drogaggio

A temperatura ambiente il silicio ha una bassa conduttività.

Drogaggio di tipo N

Se si introduce nel materiale di silicio una certa percentuale di impurità con 5 elettroni sull'ultima orbita, 4 elettroni parteciperanno ai legami fra gli atomi (fig. 7.3) e un elettrone resterà libero. Il materiale così ottenuto si definisce drogato di tipo **N** e per il drogaggio si usano materiali quali fosforo, arsenico, antimonio, ecc. Il materiale è tanto più ricco di elettroni liberi, quanto più alto è il drogaggio.

Drogaggio di tipo P

Introducendo nel materiale delle impurità con soli 3 elettroni sull'ultima orbita, rimarranno degli spazi vuoti detti buchi o lacune (fig. 7.4). Il materiale così ottenuto viene definito di tipo **P**.

Sia i materiali di tipo P sia i materiali di tipo N sono elettricamente neutri perché composti ciascuno da atomi completi.

Giunzione P N (diodo)

Drogando una barretta di silicio da un lato di tipo P, e dall'altro di tipo N, comparirà una zona (detta di giunzione) dentro la quale il materiale passa da tipo P a tipo N.

Nella zona di giunzione avviene un fenomeno detto di diffusione; alcuni elettroni liberi della zona N si diffondono in zona P, andando a colmare le lacune e completando i legami tra gli atomi (fig. 7.5). Le due zone, che inizialmente erano neutre, presentano ora delle polarità.

La zona N ha perso elettroni e presenta polarità positiva, mentre la zona P ha acquisito elettroni e presenta polarità negativa. La polarità negativa acquistata dalla zona P (a ridosso della giunzione) impedisce l'ulteriore diffusione di elettroni.

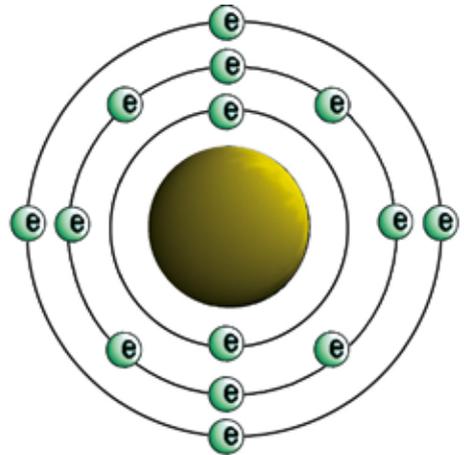


Fig. 7.1 - Atomo di silicio puro.

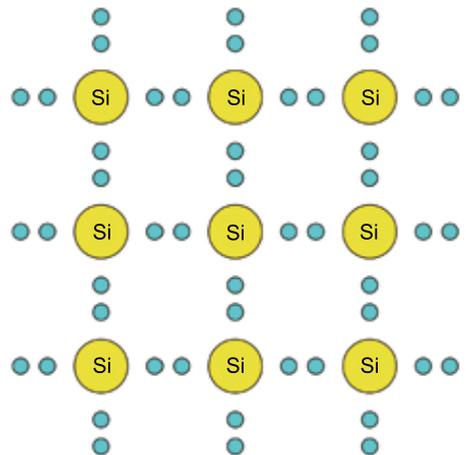


Fig. 7.2 - Struttura atomica del materiale di silicio puro.

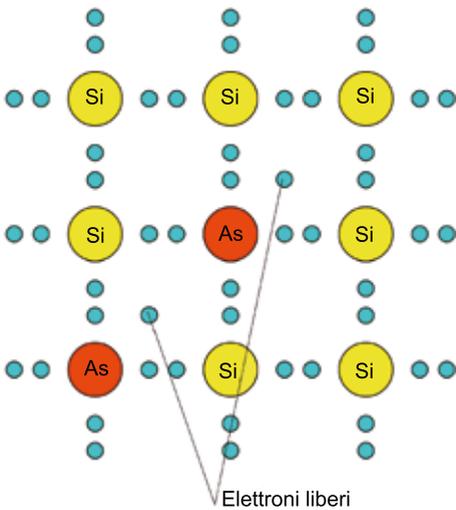


Fig. 7.3 - Silicio drogato con arsenico (As). Strato di materiale tipo N.

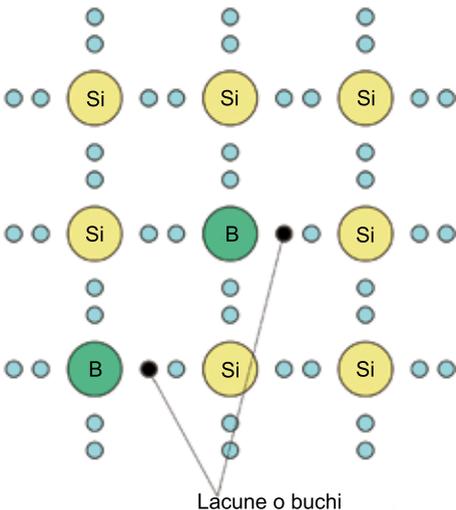


Fig. 7.4 - Silicio drogato con boro (B). Strato di materiale tipo P.

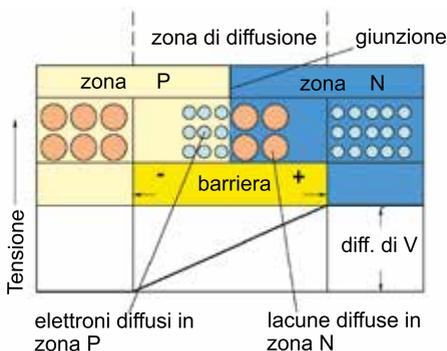


Fig. 7.5 - Formazione della barriera di potenziale per diffusione dovuta all'unione di uno strato di materiale tipo P con uno di tipo N.

Il fenomeno si arresta una volta completati i legami tra gli atomi più vicini alla giunzione. Se si collega il positivo di batteria allo strato **N** e il negativo allo strato **P** come indicato in figura 7.6, il campo elettrico, creato dalla tensione della batteria, rinforza il potenziale di diffusione che ha verso opposto a quello di batteria. Non si ha quindi nessun passaggio di corrente attraverso la barretta. La giunzione si dice polarizzata inversamente.

Collegando invece il morsetto positivo di batteria allo strato **P** e il negativo allo strato **N** (fig. 7.7), il campo elettrico creato dalla tensione di batteria si oppone alla barriera di potenziale dovuta alla diffusione e permette un passaggio di cariche elettriche da uno strato all'altro. Si dice che la giunzione è polarizzata direttamente e, attraverso la barretta, vi è passaggio di corrente.

Il componente si comporta da valvola unidirezionale e prende il nome di diodo.

Un diodo polarizzato direttamente viene attraversato da corrente e la tensione V_d ai suoi morsetti (fig. 7.8) si mantiene costante a valori compresi tra **0,4 e 0,7 V** per i diodi al silicio e compresi tra **0,1 e 0,3 V** per i diodi al germanio.

Un diodo polarizzato inversamente può essere considerato un isolante anche se una piccolissima corrente inversa, detta corrente di perdita, è accettabile (nei diodi per alternatori la **corrente inversa massima è intorno ai 5 mA**). Nel senso dell'interdizione non dovrà essere superata la tensione inversa massima sopportabile dalla giunzione stessa pena la distruzione del diodo; in commercio si possono trovare diodi da pochi volt e diodi da migliaia di volt.

Esistono diodi che sopportano pochi mA, nel senso della conduzione, e diodi che possono sopportare anche decine di ampere.

Attenzione: è buona norma non eseguire mai prove di isolamento su parti elettriche o meccaniche che contengono componenti elettronici, quali alternatori, regolatori, ecc.

I morsetti del diodo si chiamano **catodo** e **anodo**. Se si collegano i morsetti a una batteria in modo che essa conduca, è necessario inserire una resistenza in serie o una lampadina per limitare la corrente di prova al valore nominale. Nel senso della conduzione sarà **anodo** il morsetto collegato con il polo **positivo** di batteria e **catodo** il morsetto collegato con il polo **negativo** di batteria.

Controllo di un diodo con tester

Per il controllo di un diodo, il tester deve essere predisposto per le misure ohmmetriche.

Per i diodi con catodo marcato (di solito con una barretta colorata sulla carcassa), collegando il positivo del tester con l'anodo e il negativo del tester con il catodo (fig. 7.9), il tester deve indicare una resistenza

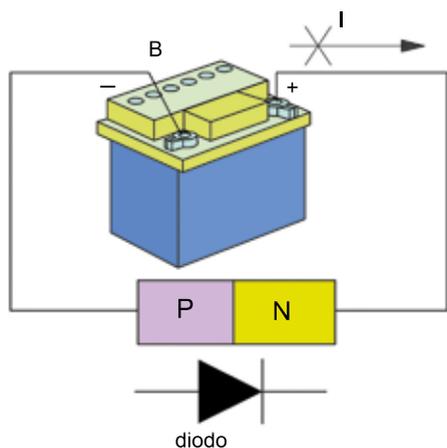


Fig. 7.6 - Polarizzazione inversa di un diodo. Il diodo non conduce.

da poche centinaia a qualche migliaia di Ω . Invertendo il collegamento del tester deve indicare una resistenza dell'ordine dei $M\Omega$.

Dovendo effettuare il controllo di un diodo non marcato, basterà appurare che il diodo conduca in una sola direzione. Se conduce nelle due direzioni, il diodo si definisce in cortocircuito.

Se non conduce in nessuna direzione, il diodo è interrotto. Le prove effettuate con tester alimentati da una batteria interna di 1,5 V o 3 V non sono attendibili. I diodi per auto lavorano con tensioni di $12 \div 16$ V. Come abbiamo visto al capitolo precedente (vedi fig. 6.9), molti tester hanno la possibilità di misurare la caduta di tensione caratteristica di un diodo. In questo caso il multimetro ha una pila interna da 9 V e forza una corrente attraverso il diodo che provoca la caduta di tensione misurabile dal tester stesso. Questo tipo di controllo è il più affidabile per la prova di un diodo o in genere di qualsiasi giunzione P-N.

Prova di un diodo con batteria e lampada da 3 W

Si può provare un diodo con una lampadina da **3 W** e la batteria da 12 V, se il diodo è quello di un componente per auto oppure con la batteria a 24 V se proviene da un impianto a 24 V.

Si collega dapprima la lampadina in serie con il diodo e la batteria e poi si invertono i collegamenti alla batteria; la lampadina si dovrà accendere in un solo caso (fig. 7.10). Se la lampadina si accende in entrambi i casi il diodo è in cortocircuito, se non si accende mai è interrotto.

I diodi di alternatore sono costruiti in modo che, in caso di guasto, si interrompano piuttosto che cortocircuitarsi.

Il diodo come raddrizzatore

Se si inserisce un diodo in un circuito percorso da corrente alternata (fig. 7.11), il circuito viene percorso

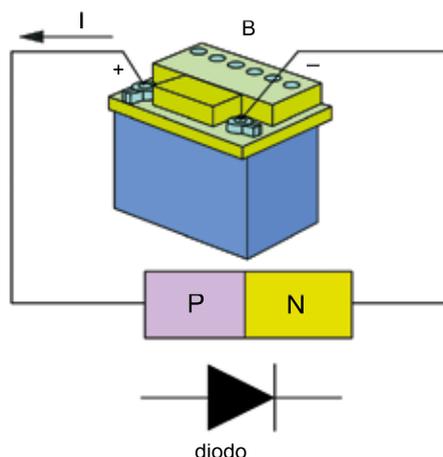


Fig. 7.7 - Polarizzazione diretta di un diodo. Il diodo conduce.

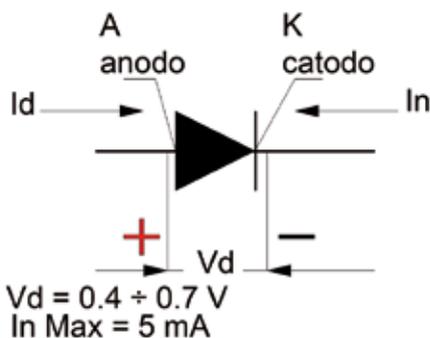


Fig. 7.8 - Valori caratteristici di tensione diretta e corrente inversa per un diodo al silicio.

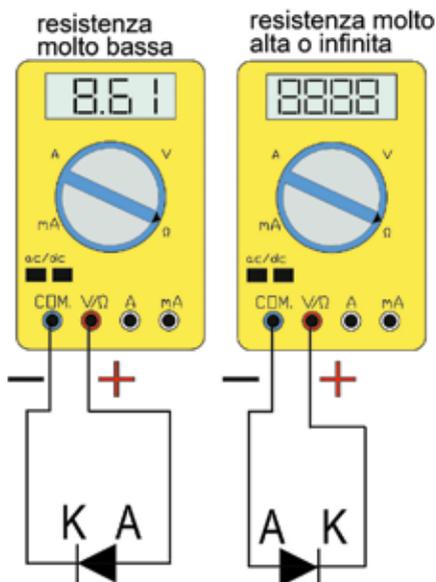


Fig. 7.9 - Prova di un diodo usando il tester come ohmmetro.

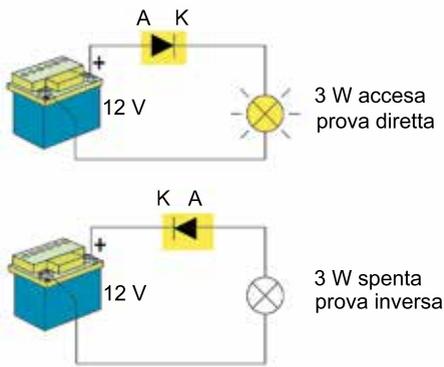


Fig. 7.10 - Prova diretta e inversa di un diodo al silicio con lampada da 3 W e batteria.

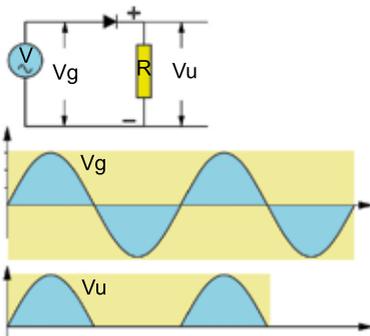


Fig. 7.11 - Corrente alternata raddrizzata a semionda con un solo diodo.

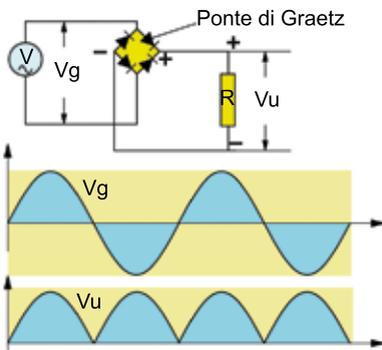


Fig. 7.12 - Corrente alternata raddrizzata ad onda intera con ponte di Graetz.

da corrente in un solo senso. La semionda negativa (ritorno di corrente) verrà bloccata dal diodo, perché durante questa fase il diodo è polarizzato inversamente. Con il collegamento a ponte di Graetz (fig. 7.12), si ottiene il raddrizzamento di entrambe le semionde. Il circuito a valle del ponte (V_u) è percorso da una corrente pulsante come rappresentato nel grafico in figura 7.12.

Il transistor bipolare

Il transistor è alla base dell'elettronica dei nostri tempi. Anche se come componente singolo viene usato molto meno che in passato, è sempre opportuno e utile conoscerne le caratteristiche principali e il funzionamento.

Un transistor può avere diversi aspetti, a seconda del fabbricante e del tipo di applicazioni per cui è previsto; in ogni caso, i terminali o punti di contatto che permettono di inserirlo in un circuito sono tre, e sono sempre gli stessi: **collettore**, **emettitore** e **base**.

I transistor di bassa potenza, il cui scopo è principalmente l'amplificazione dei segnali, hanno in genere l'aspetto di figura 7.14; da un piccolo corpo più o meno cilindrico, metallico o di materiale plastico, fuoriescono tre reofori, nella forma di fili o di linguette, che sono i tre elettrodi. La disposizione di questi elettrodi può variare da un tipo all'altro, e va quindi determinata disponendo delle informazioni tecniche relative fornite dai produttori.

Per certi transistor di vecchio tipo, sul corpo cilindrico era marcato un puntino colorato che indicava il collettore; in altri è presente sull'involucro metallico una minuscola linguetta, in corrispondenza della quale si trova l'emettitore. Per i transistor NPN il collettore deve essere collegato al polo positivo e l'emettitore al negativo, nel caso di un PNP le polarità sono di segno opposto. L'esistenza di queste due famiglie di transistor torna molto utile, perché permette di realizzare circuiti particolari, sfruttando le diverse polarità. I transistor NPN e PNP si chiamano bipolari proprio perché basano il loro principio di funzionamento su due giunzioni di materiali drogati P ed N. Il transistor NPN equivale a due diodi con gli anodi collegati fra loro a formare la base. I due catodi sono l'emettitore e il collettore. Il transistor PNP può essere considerato come se fosse formato da due diodi uniti nei catodi; la base è l'unione dei catodi, mentre gli anodi sono l'emettitore e il collettore (fig. 7.13). In base all'impiego, i transistor presentano caratteristiche che possono variare anche molto da un tipo all'altro.

Caratteristiche principali di un transistor a giunzione bipolare (BJT)

Alcune caratteristiche sono fondamentali in quanto, superandone il limite di funzionamento, il transistor si distrugge:

- **V_{ce}** è la massima tensione che può essere applicata fra il collettore e l'emettitore;
- **V_{be}** è la massima tensione che può essere applicata fra la base e l'emettitore;
- **I_c** è la massima corrente che può attraversare il circuito di collettore;
- **I_b** è la massima corrente che può attraversare il circuito di base.

Frequenza di taglio del transistor

È la frequenza oltre la quale la capacità di amplificazione del transistor diminuisce rapidamente. Qualunque transistor può lavorare con segnali all'interno di una certa banda di frequenze. Se, per esempio, siamo nel settore di un amplificatore audio, quello della frequenza di taglio non sarà certo un problema, visto che qualunque transistor può funzionare ben al di là dei 20 kHz delle frequenze acustiche. Se, invece, siamo nel settore dell'amplificazione di segnali ad alta frequenza (per esempio onde radio a modulazione di frequenza), il transistor dovrà presentare un buon guadagno a frequenze di 100 MHz ed oltre. Lo stesso dicasi per un generatore di onda quadra (vedi circuiti CAN-bus): in questo caso ci si imbatte più facilmente in quei tipi definiti "transistor per commutazione", che sono caratterizzati da tempi di salita e discesa molto brevi e che si adattano alle tecniche impulsive.

Guadagno del transistor

Il guadagno si definisce come la capacità di amplificazione del transistor e viene indicato in **db** (decibel). Il decibel è il logaritmo di un rapporto: nel nostro caso, indicando con **dIb** una qualsiasi variazione della corrente di base e con **dIc** la corrispondente variazione della corrente di collettore, il guadagno risulta dalla formula:

$$G = 20 \log (dIc / dIb)$$

Il guadagno è legato alla frequenza del segnale; rimane praticamente costante fino ad un certo valore, oltre il quale comincia a diminuire rapidamente: tale valore viene appunto definito frequenza di taglio.

Provare un transistor

I transistor NPN o PNP si possono testare provando (con il multimetro sul prova diodi) separatamente i due diodi di cui sono formati. L'NPN condurrà se alimentato con il positivo in b ed il negativo sul collettore o sull'emettitore, mentre il PNP condurrà se alimentato con il negativo in b ed il positivo sull'emettitore o sul collettore. Alcuni multimetri sono dotati anche di prova transistor. In ogni caso, visto che i transistor sono sempre montati su circuiti stampati o in circuiti integrati, non capita spesso di doverli provare separatamente.

Il transistor come amplificatore

Immaginiamo di disporre del circuito di figura 7.15 composto da un transistor, un LED e due resistenze (premesso che il LED si accende con una tensione a partire da 1,5 V). Come si vede in figura, in serie al LED vi è una resistenza R_1 , del valore di 220 Ω , per limitare la corrente che passa attraverso il collettore. Con la R_2 (da 1,5 k Ω) staccata, il diodo LED non deve accendersi; la corrente, infatti, non può passare, essendo presente il transistor che la blocca. Collegando la resistenza R_2 vedremo che il diodo LED si

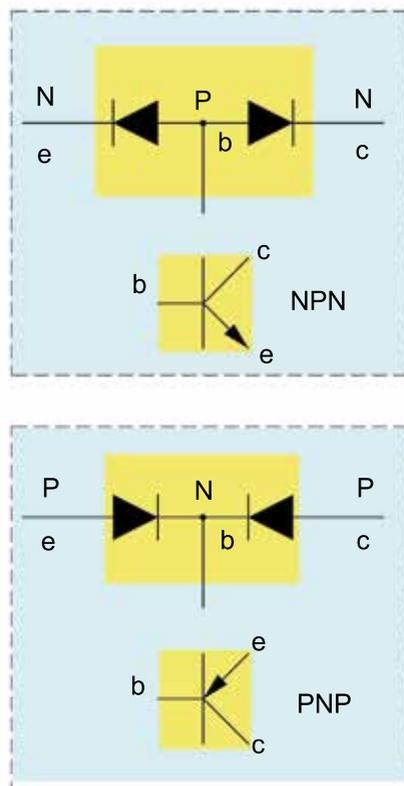


Fig. 7.13 - Il transistor NPN equivale a due diodi contrapposti con anodi collegati a formare la base. Il transistor PNP equivale a due diodi contrapposti con catodi in comune a formare la base.

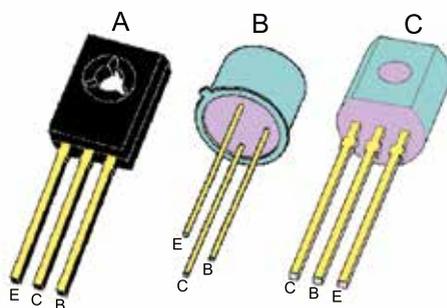


Fig. 7.14 - Tipi di transistor.

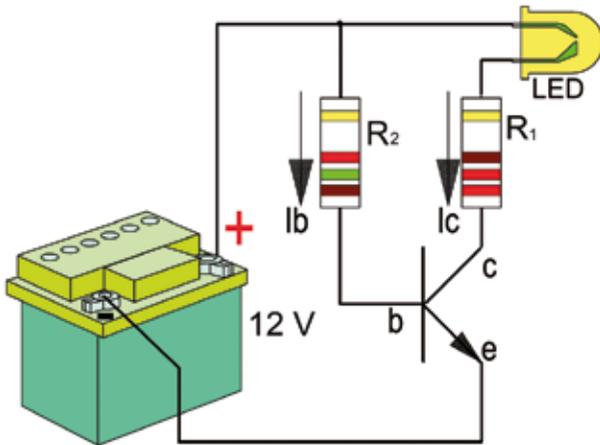


Fig. 7.15 - Circuito di comando di un LED. Il transistor è utilizzato come amplificatore di corrente. $R_1 = 220 \Omega$, $R_2 = 1,5 \text{ k}\Omega$.

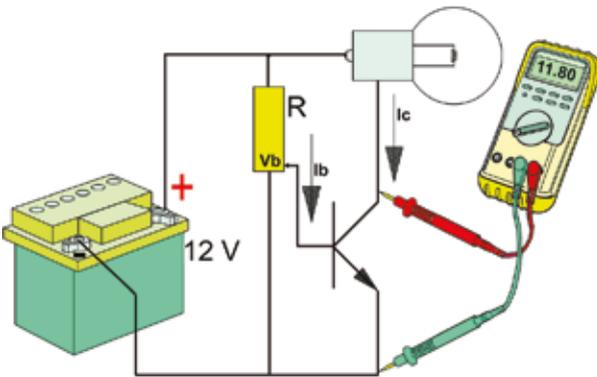


Fig. 7.16 - Circuito di comando a transistor di una lampadina da 5 W. Lampada spenta.

sufficiente regolare la posizione del cursore del reostato R regolando di conseguenza la V alla base del transistor (V_b).

Primo caso: lampada spenta

Con il cursore in posizione abbassata, come in figura 7.16, la tensione di base è bassissima; il transistor non entra in conduzione e la corrente di collettore è debolissima (qualche μ ampere). La V_{ce} è pari quasi a quella di alimentazione e la potenza dissipata dal transistor è praticamente nulla.

Secondo caso: lampada completamente accesa

Con il cursore in posizione alta (come in fig. 7.17), la tensione di base è tale da mandare in completa conduzione il transistor; la tensione V_{ce} scende a valori molto bassi ($0,5 \div 0,6 \text{ V}$). In questo caso, la lampadina si accende completamente (quasi dal momento che è soggetta a $11,4 \div 11,6 \text{ V}$). La corrente che attraversa la lampadina (si suppone a 28 A) è:

$$\frac{11,5}{28} = 0,41 \text{ A}$$

La potenza dissipata dal transistor sarà:

$$\text{Potenza dissipata} = (V_{ce} \cdot I_c) = 0,6 \cdot 0,41 = 0,246 \text{ W}$$

accende. Cosa è cambiato nel transistor? Attraverso la resistenza R_2 , una debole corrente, indicata in figura con I_b , circola nel circuito di base; questa corrente innesca il passaggio di una corrente più forte nel circuito di collettore (indicata con I_c) e così il LED si accende.

Osserviamo, quindi, che con una corrente di pochi milliampere (la corrente che entra in base) possiamo comandare una corrente di alcune centinaia di milliampere nel circuito di collettore. In sostanza, questo è il principio del transistor utilizzato come "amplificatore di corrente".

I transistor e il controllo della potenza

Il transistor, impiegato come amplificatore di segnale, genera in uscita una tensione che riproduce, amplificata, quella in ingresso. Lo fa controllando la corrente che scorre nel collettore e nella resistenza ad esso collegata. La corrente che passa è piccola e non crea problemi per quanto riguarda la potenza che il transistor può sopportare. La potenza dissipata dal transistor dipende dalla tensione collettore emettitore e dalla corrente I_c secondo la seguente formula:

$$\text{Potenza dissipata} = (V_{ce} \cdot I_c)$$

Prendendo in considerazione il circuito di figura 7.16, avremo la possibilità di controllare la tensione ai capi della lampadina (e quindi la luminosità), controllando la tensione ai capi del transistor (V_{ce}). La lampadina da 5 W a 12 V ha una resistenza di circa 28Ω . Per far questo è

sufficiente regolare la posizione del cursore del reostato R regolando di conseguenza la V alla base del transistor (V_b).

Terzo caso: lampada parzialmente accesa

Con il cursore in posizione intermedia, la tensione di base è tale da mandare in parziale conduzione il transistor; la tensione V_{ce} scende a valori intermedi ($1 \div 11$ V).

In questo caso, la lampadina si accende parzialmente. Se supponiamo una tensione di 7 V ai capi della lampadina, il transistor dovrà sopportare una $V_{ce} = 5$ V.

La corrente che attraversa la lampadina in questo caso è:

$$\frac{7 \text{ V}}{28 \Omega} = 0,25 \text{ A}$$

La potenza dissipata dal transistor sarà:

$$\begin{aligned} \text{Potenza dissipata} &= \\ (V_{ce} \cdot I_c) &= 5 \cdot 0,25 = 1,25 \text{ W} \end{aligned}$$

Il transistor deve sopportare (e quindi dissipare) una potenza 5 volte superiore con lampada parzialmente accesa. Se la lampada fosse da 50 W il transistor dovrebbe dissipare ben 12,5 W.

Transistor ad effetto di campo MOSFET

MOSFET è l'acronimo di *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, cioè transistor metallo-ossido-semiconduttore a effetto di campo. È un tipo di transistor, usato principalmente nei dispositivi digitali perché ha una dispersione di calore molto ridotta rispetto ai BJT. Il MOSFET è certamente il più comune **transistor a effetto di campo** utilizzato sia nei **circuiti digitali** sia in quelli **analogici**. Il MOSFET è composto da un canale di materiale semiconduttore di tipo N o di tipo P, ed è chiamato di conseguenza **NMOSFET** o **PMOSFET**. Solitamente il semiconduttore scelto è il **silicio**, ma alcuni produttori usano anche una miscela di silicio e germanio (SiGe) nei canali MOSFET.

Il funzionamento di un transistor MOSFET può essere illustrato facendo riferimento alla figura 7.19.

Il dispositivo è realizzato sulla superficie di un semiconduttore drogato **P** (substrato) ed è formato da due canali **N** sui quali sono posti i due contatti (**source** e **drain**).

Tra i due canali è posto uno strato isolante formato da **ossido di silicio** ricoperto

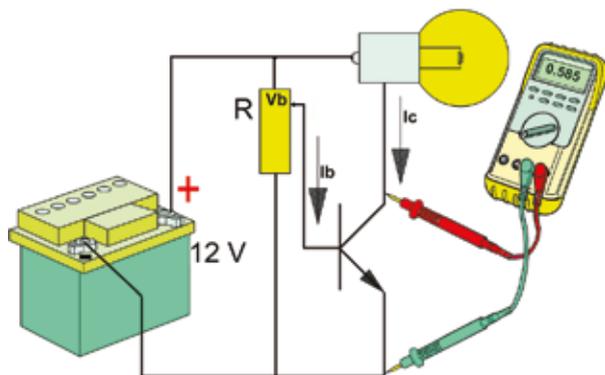


Fig. 7.17 - Circuito di comando a transistor di una lampada da 5W. Lampada completamente accesa.

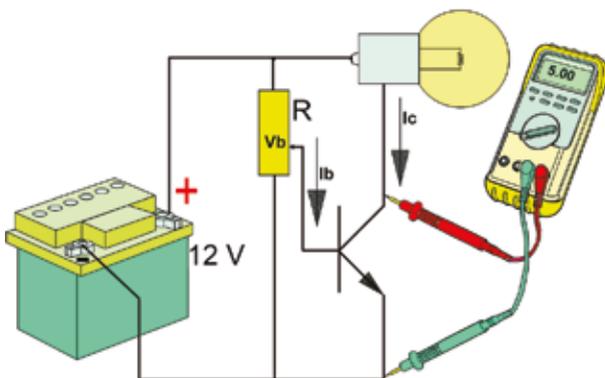


Fig. 7.18 - Circuito di comando a transistor di una lampada da 5 W. Lampada parzialmente accesa.

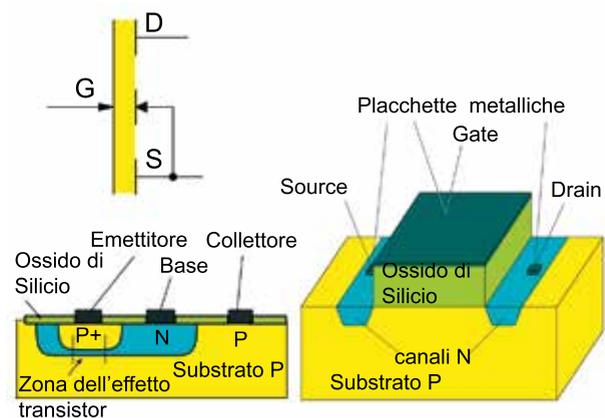


Fig. 7.19 - Struttura di un transistor BJT PNP a struttura planare (a sinistra) a confronto con quella di un transistor MOSFET di tipo a canale N (a destra). In alto a sinistra lo schema di un MOSFET a canale N.

da uno strato metallico detto **gate**. La figura 7.19 rappresenta la struttura di un transistor BJT di tipo PNP a confronto con quella di un MOSFET a canale N.

Il terminale di *gate* è uno strato di **polisilicio** (silicio policristallino) posto sopra il canale, ma separato dal canale tramite un sottile strato isolante di biossido di silicio (SiO_2). Quando si applica una tensione tra i terminali di *gate* e *source*, il campo elettrico (Field) che si genera penetra attraverso l'ossido e crea quello che si chiama "canale di inversione" nel canale sottostante. Il canale di inversione è dello stesso tipo (P o N) del *source* e del *drain*, quindi fornisce un passaggio attraverso cui la corrente può passare. Variando la tensione tra *gate* e *body* (che di solito si considera implicitamente collegato al *source*) si modifica di conseguenza la *conduttività* di questo strato e si rende possibile controllare il flusso di corrente tra *drain* e *source*. I MOSFET dunque per funzionare non sfruttano le correnti di polarizzazione come i BJT, ma bensì gli effetti prodotti dai campi elettrici sui materiali semiconduttori.

Il risultato è un minor dispendio di energia e calore del transistor e una maggiore velocità di commutazione. Il MOSFET può lavorare in tre modi: in uno agisce come un interruttore spento, negli altri due come un interruttore acceso.

Di seguito riportiamo le tre zone di lavoro del MOSFET.

1. Cut-off

Quando $V_{GS} < V_{tn}$ dove V_{tn} è la tensione di soglia del componente.

In questo caso l'interruttore è spento e non c'è corrente tra *drain* e *source*. (Mentre la corrente tra *drain* e *source* dovrebbe idealmente essere nulla poiché l'interruttore è spento, c'è in realtà una debole corrente di inversione, o corrente di sottosoglia. Questa corrente è una delle cause del consumo di potenza nei circuiti a MOSFET).

2. Zona triodo

Quando $V_{GS} > V_{tn}$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_{tn}$

L'interruttore è acceso e si crea un canale che permette alla corrente di scorrere tra *drain* e *source*. Il MOSFET lavora come una resistenza. La corrente tra *drain* e *source*, per bassi valori della tensione di drain-source V_{DS} , è dipendente dalla tensione gate-source V_{GS} .

3. Saturazione

Quando $V_{GS} > V_{tn}$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_{tn}$

L'interruttore è acceso, e si è creato un canale che permette alla corrente di scorrere tra *drain* e *source*, ma la corrente non dipende dalla tensione applicata al canale, e quindi il MOSFET non funziona come un resistore, ma come un amplificatore.

Il fatto che i MOSFET funzionino grazie a dei campi elettrici fa sì che il consumo di polarizzazione sia transitorio, come lo sarebbe la carica di un condensatore. In pratica il consumo di corrente si ha per due motivi: la commutazione da off a on e viceversa e la corrente di sottosoglia.

Controlli elettrici sui MOSFET

Purtroppo con un multimetro è praticamente impossibile eseguire dei controlli di funzionamento sui MOSFET per l'alta impedenza in ingresso. Il circuito *drain source* risulta praticamente isolato se il gate non è polarizzato con una tensione superiore al valore di soglia V_{tn} .

I circuiti nei quali il MOSFET è utilizzato come componente discreto sono piuttosto rari (soprattutto nel settore automobilistico); è molto più frequente trovarsi di fronte a centraline che integrano MOSFET, BJT, resistenze, condensatori, bobine, SCR, diodi Zener, ecc.

Abbiamo già avuto modo di vedere come le reti CAN non sempre siano controllabili con un semplice multimetro (vedi fig. 5.44) utilizzato come ohmmetro o voltmetro.

Sono necessari strumenti analizzatori di segnali logici e l'oscilloscopio.

Dimensioni dei MOSFET

Guardando la figura 7.19, (schema costruttivo), si potrà notare che la larghezza del substrato, la lunghezza della piastrina del gate, la distanza tra i due canali (zona di percorrenza della corrente drain source) hanno delle dimensioni le quali determinano la resistenza elettrica del MOSFET.

Riducendone le dimensioni si aumenta la resistenza elettrica e si diminuisce la corrente di commutazione. In pratica il MOSFET consuma meno e si scalda meno.

Con la riduzione delle dimensioni, la tensione che può essere applicata al *gate* deve essere ridotta per mantenere l'affidabilità del dispositivo. Per mantenere le prestazioni, anche la tensione di soglia dei MOSFET deve essere ridotta di conseguenza. Con tensioni di soglia ridotte, il transi-

stor non può spegnersi completamente, con il risultato che si forma uno strato con una debole tensione inversa che consuma potenza nella forma di una **corrente di sottosoglia** quando il transistor non conduce. La corrente di sottosoglia, che poteva essere ignorata in passato, ora può consumare anche il 50% della potenza richiesta dal *chip*.

La riduzione del consumo è importante anche per tutte quelle applicazioni che richiedono l'alimentazione da batteria; per esempio: i computer portatili, i telefonini, i telecomandi, ecc.

Oggi sono in produzione MOSFET con una lunghezza della piastrina di gate di circa $0,13\ \mu\text{m}$.

Le tecnologie di miniaturizzazione sempre più spinta hanno reso possibile incorporare in un unico chip circa 55.000.000 di transistor (Pentium IV). Se tali circuiti integrati non fossero però accuratamente raffreddati, si distruggerebbero immediatamente. Sono attualmente allo studio in alcuni laboratori tecnologie da $0,065\ \mu\text{m}$.

Esempio di un circuito con MOSFET

I transistor MOSFET non trovano applicazione solo nei circuiti logici e nei microprocessori, ma possono essere utilizzati anche in altri settori quali gli amplificatori musicali, i circuiti di comando di motorini elettrici o elettrovalvole, i comandi di solenoidi, e in alcuni sensori quali i sensori di luce, di accelerazione, ecc.

Nella figura 7.20 abbiamo un esempio di un MOSFET utilizzato per governare, con una tecnica ad impulsi (PWM), la corrente che attraversa un motorino. Lo schema è di principio e serve soprattutto per identificare alcuni circuiti che prenderemo in considerazione in seguito perché molto usati nell'elettronica del settore automobilistico.

Il **circuito oscillatore**: serve a creare una tensione alternata ad onda quadra da una continua.

Il **circuito integratore**: serve a trasformare il segnale ad onda rettangolare in uno ad onda triangolare.

Il **comparatore**: fa il confronto sull'ingresso di un amplificatore operazionale tra il segnale triangolare e uno di riferimento in tensione continua variabile dall'esterno (regolazione della velocità del motorino). Il comparatore genera in uscita il segnale PWM (duty cycle variabile).

Il **driver**: serve a pilotare il MOSFET.

Il **MOSFET**: serve da interruttore ad alta velocità per la corrente del motorino.

Il **diodo** in parallelo al motorino (diodo volano): serve per smorzare le f.e.m. indotte dal motorino stesso nei processi di interruzione della corrente.

L'oscillatore, l'integratore, il comparatore e il driver possono far parte anche di un unico circuito integrato o di un'unica centralina.

Ne esistono in varie versioni per svariate tensioni e correnti e prendono il nome di **Chopper**. Il circuito di figura 7.21 è un'altro esempio di come il MOSFET possa servire, in aiuto a parti elettromeccaniche, ad automatizzare la gestione del motore. Il circuito serve, infatti, a pilotare un motorino passo-passo di gestione del regime di minimo del motore.

Con questo dispositivo, la gestione del minimo può essere interamente affidata ad una centralina elettronica, a un motorino passo-passo e a un condotto by-pass della valvola a farfalla, senza nessun altro componente aggiuntivo, semplificando notevolmente il condotto dell'aria in aspira-

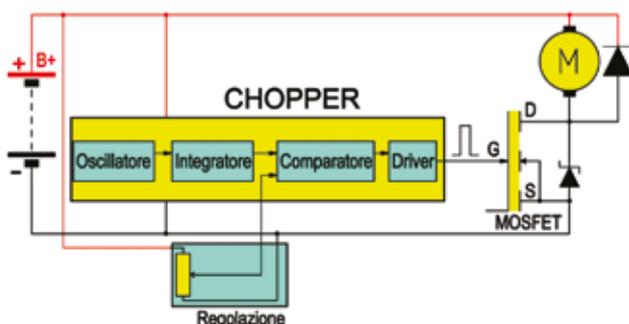


Fig. 7.20 - Circuito di principio per la regolazione della velocità di un motorino in corrente continua con l'ausilio di un MOSFET a canale N.

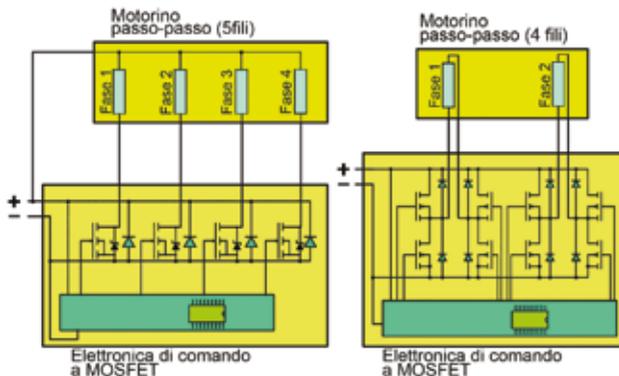


Fig. 7.21 - Circuiti di principio per la regolazione della velocità e del senso di rotazione di un motorino passo-passo a 5 fili (a sinistra) e a 4 fili (a destra) con centraline elettroniche a MOSFET.

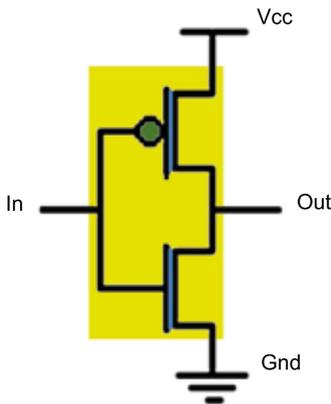


Fig. 7.22 - Schema elettrico del CMOS.

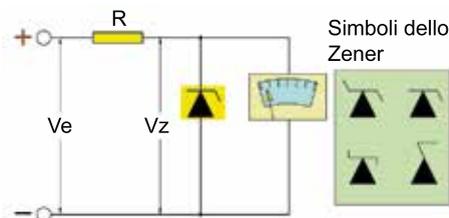


Fig. 7.23 - Diodo Zener utilizzato come stabilizzatore di alimentazione. A destra alcuni simboli dello Zener utilizzati negli schemi elettrici.

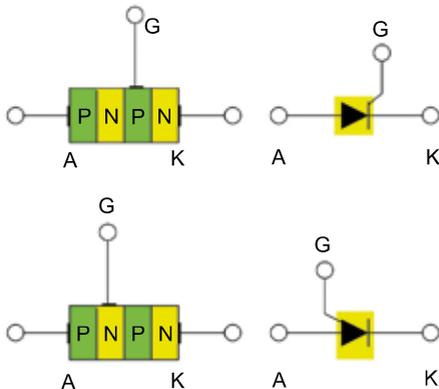


Fig. 7.24 - Tiristori o diodi SCR.

Tiristore o diodo SCR

Il tiristore è uno dei più importanti componenti dell'elettronica di potenza. Costruttivamente esso è formato da una barretta drogata con successione PNPN; presenta tre terminali: un anodo, un catodo e un gate.

Normalmente non conduce nelle due direzioni; entra in conduzione alimentando l'anodo con un positivo, il catodo con un negativo e il gate con un impulso di brevissima durata. L'impulso deve essere positivo rispetto al catodo (tiristore a porta P) o negativo (tiristore a porta N).

Lo schema costruttivo dei due tiristori è rappresentato in figura 7.24. Dopo essere entrato in

zione nel motore.

La tecnologia moderna (in tecnica ibrida) produce microcircuiti già adatti al comando di motorini in DC per pompe carburante, del vuoto, dell'acqua, elettrofrizioni, valvole a farfalla, movimento sedili, bloccaporte, alzavetri, tettucci apribili, tergicristalli, ecc.

CMOS

La **tecnologia CMOS** è un tipo di tecnologia utilizzata in elettronica per la progettazione di componenti digitali (logiche) utilizzando transistor MOSFET.

Si fonda su una struttura circuitale costituita dalla serie di una rete di "Pull-Up" ed una di "Pull-Down". La prima è formata da MOSFET di tipo P, per replicare correttamente il livello logico alto **LL1** mentre alla seconda è destinata la gestione del livello logico basso **LL0**.

La rete di Pull-Up è costituita di soli **P-MOS**, cioè quel particolare tipo di MOSFET che si "accendono" solo se la tensione presente al loro *gate* è minore della loro tensione di soglia (V_{tn}).

Inversamente la rete di Pull-Down è costituita di soli **N-MOS**, ovvero quel particolare tipo di MOSFET che si accende solo se la tensione presente al loro *gate* è maggiore della loro tensione di soglia (V_{tn}).

In una porta logica NOT (di cui ci occuperemo in seguito), si potrà notare come, nell'eventualità che il segnale d'ingresso sia a LL1, ad attivarsi sia il solo N-MOS portando l'uscita a LL0.

Inversamente, con l'ingresso a LL0, è il solo P-MOS ad attivarsi portando l'uscita a LL1.

Diodo Zener

Il diodo Zener è un diodo che con polarizzazione diretta, si comporta come un normale diodo con caduta di tensione sul diodo di $0,4 \div 0,8$ V.

Sotto ponendolo a polarizzazione inversa lo Zener viene attraversato da una corrente inversa, detta I_z , se la tensione di polarizzazione supera un determinato valore detto tensione di Zener (V_z). Sotto il valore di V_z , non vi è passaggio di alcuna corrente e il diodo si comporta come un normale diodo al silicio.

La tensione di soglia (V_z) viene mantenuta stabile per un discreto margine di variazione della corrente inversa (I_z) che attraversa lo Zener.

Il diodo Zener si presta, quindi, ad essere utilizzato come limitatore di tensione nelle protezioni da sovratensioni (fig. 7.23) o come stabilizzatore di tensione nei regolatori di tensione.

conduzione, la corrente che lo attraversa può essere bloccata solo se essa scende sotto un valore critico (I_h) regolandola o interrompendola.

Può essere spento anche inviando un impulso al gate negativo rispetto al catodo per il tiristore di tipo P e positivo per il tipo N.

Uso del tiristore per il controllo a semionda della corrente alternata

Grazie al suo particolare modo di funzionare, il tiristore si presta per il comando e per il controllo di correnti alternate. Basterà, infatti, comandare l'innesco delle semionde con degli impulsi T_z sincronizzati con la tensione V_g .

Nell'istante T_z la corrente I_r inizia a circolare e si spegne da sola al passaggio per lo 0 della tensione (fig. 7.25).

Il tiristore prende anche il nome di diodo S.C.R. per il suo funzionamento come raddrizzatore controllato (la sigla è formata dalle iniziali delle parole *Silicon Controlled Rectifier*).

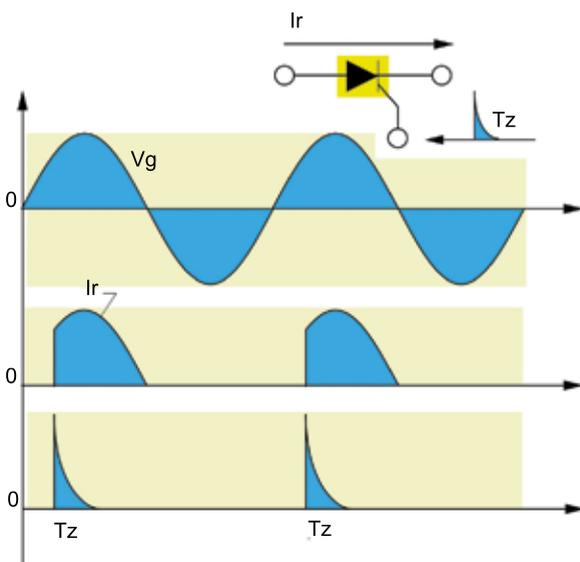


Fig. 7.25 - Controllo della semionda positiva di un segnale in alternata con diodo SCR.

V_g = tensione alternata di alimentazione;

I_r = corrente nel circuito;

T_z = impulsi al gate del tiristore (a porta P).

Triac

Il Triac può essere immaginato strutturato come due tiristori posti in anti-parallelo (fig. 7.26). Esso viene usato principalmente in circuiti per la regolazione delle correnti alternate. Esso permette il controllo e la regolazione di entrambe le semionde della corrente alternata. Un esempio è rappresentato dalla figura 7.27 nella quale si potrà osservare come, con adeguati impulsi al gate, sia possibile ottenere una conduzione a comando sia della semionda positiva che di quella negativa.

Ciò permette di controllare la potenza assorbita da carichi in corrente alternata come motori, lampade (varialuce), riscaldatori, ecc.

I circuiti di generazione e sincronizzazione degli impulsi elettrici, da inviare ai gate per l'innesco della conduzione in un senso o nell'altro del Triac, sono solitamente generati da appositi circuiti di pilotaggio. Le frequenze di generazione possono essere quelle di rete (esistono tuttavia anche circuiti per frequenze diverse) e il sistema può essere applicato sia al monofase che al trifase.

Diodo LED (Light Emitting Diode)

Il funzionamento del LED si basa sul fenomeno chiamato "elettroluminescenza", dovuto alla emissione di fotoni (nella banda del visibile o dell'infrarosso) allorché la giunzione è polarizzata in senso diretto.

Polarizzandolo inversamente esso si comporta come un normale diodo. I LED hanno un terminale positivo e uno negativo, e per funzionare devono essere inseriti in circuito rispettando tale polarità. Esistono LED con emissione diffusa o puntiforme. In genere il terminale positivo è quello

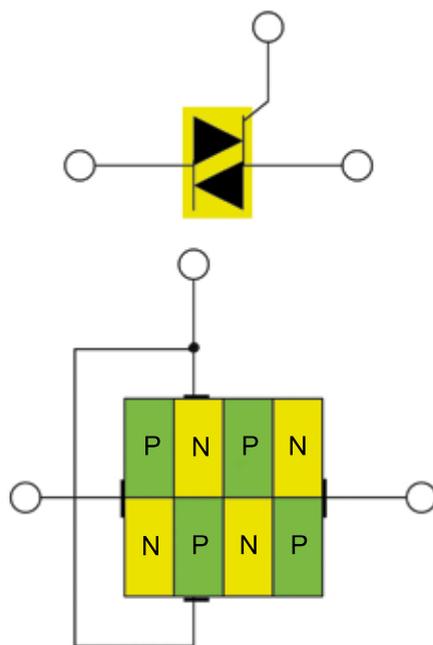


Fig. 7.26 - Struttura del Triac.

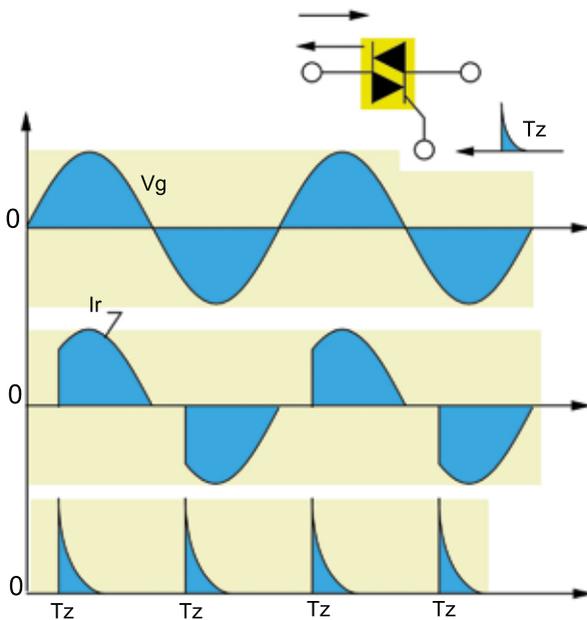


Fig. 7.27 - Controllo delle semionde positive e negative di un segnale in alternata con Triac.

V_g = tensione alternata di alimentazione;

I_r = corrente nel circuito;

T_z = impulsi al gate del tiristore Triac.

verde, una sorgente di luce bianca. Il LED trova applicazione nel settore automobilistico ormai in molteplici soluzioni, dalle semplici illuminazioni dei comandi, alle segnalazioni e oggi, grazie a tecnologie a luce bianca, anche per i proiettori anabbaglianti e abbaglianti. La caduta di tensione ai capi di un LED può variare da 1,1 a 1,6 V, in funzione della lunghezza d'onda della radiazione emessa (a lunghezze d'onda minori corrisponde una caduta di tensione più alta).

Quando si utilizza un LED, è necessario disporre sempre di una resistenza in serie ad esso, allo scopo di limitare la corrente che lo attraversa ed evitare che possa distruggersi.

La corrente necessaria per far emettere luce ad un LED di illuminazione comandi è compresa tra 2 e 15 mA. Normalmente la resistenza da mettere in serie per limitare la corrente ad un valore di 10 mA con alimentazione a 12 ÷ 14 V è 950 ÷ 1200 Ω .

Ecco come la si può calcolare:

$$R = \frac{V_b - V_d}{10 \text{ mA}} = \frac{12 - 1,5}{10 \text{ mA}} = 1050 \Omega$$

Per limitare la corrente a 20 mA:

$$R = \frac{V_b - V_d}{20 \text{ mA}} = \frac{12 - 1,5}{20 \text{ mA}} = 525 \Omega$$

Il LED sopporta una tensione inversa molto bassa che va da 3 a 10 V. Superati questi valori di tensione la giunzione si distrugge. Esistono in commercio LED a diverse tensioni nominali nei quali la resistenza è incorporata nell'involucro stesso. Esistono anche LED che si illuminano alimentandoli indifferentemente nei due sensi. In realtà questi contengono nello stesso involucro due LED contrapposti e la resistenza limitatrice (si accende un solo LED per volta).



Fig. 7.28 - LED a luce gialla.

più lungo, ma lo si può individuare con certezza osservando l'interno del LED in controluce; come si vede in figura 7.28, l'elettrodo positivo è sottile, a forma di lancia, mentre il negativo ha l'aspetto di una bandierina.

A differenza delle comuni lampadine, il cui filamento funziona a temperature elevatissime ed è caratterizzato da notevole inerzia termica, i LED emettono luce fredda, e possono lampeggiare a frequenze molto alte, superiori ai MHz.

I LED sono quindi adatti all'utilizzo per le segnalazioni di direzione, agli stop, ecc. La luce emessa è inoltre direttamente proporzionale alla corrente che li attraversa.

I LED risultano quindi particolarmente adatti alla modulazione dell'intensità luminosa (ad esempio nell'illuminazione del quadro strumenti e dei comandi).

I LED più comuni emettono luce rossa, arancione, gialla o verde. In tempi relativamente recenti si è riusciti a produrre un LED caratterizzato dall'emissione di luce blu chiara, utilizzando il nitruro di gallio (GaN).

La disponibilità di un LED a luce blu è molto importante poiché consente di ricreare, insieme alle radiazioni rossa e

In figura 7.30 abbiamo un esempio delle dimensioni di alcuni LED attualmente disponibili per gruppi ottici. Come si potrà osservare, le dimensioni sono piuttosto ridotte e le capacità di illuminazione sono ottime.

Per un faro anabbagliante occorrono circa 1000 lumen (lo stesso livello di un proiettore allo Xeno) e il faro a LED consuma $7 \div 10$ W anziché 50 W come con una lampada ad incandescenza. In figura 7.31 abbiamo un esempio di un gruppo ottico anteriore Full-LED che per tutte le funzioni quali indicatori di direzione, luci abbaglianti, luci anabbaglianti, luci di posizione utilizza sorgenti di luce a LED. Il faro svolge anche tutte le funzioni di luci adattative.

Il transistor JFET

Il JFET (simbolo in fig. 7.32) è un tipo di transistor ad effetto di campo, da considerarsi una via di mezzo tra i BJT e i MOSFET. L'acronimo JFET sta per *Junction Field Effect Transistor*.

In pratica, l'intero funzionamento si basa sull'estensione della zona di svuotamento (deplation layer) all'interno di un canale, in seguito alla polarizzazione inversa di una giunzione, che viene localizzata tra il terminale di gate e quello di source.

Trovano applicazione in circuiti audio digitali e in amplificatori a basso rumore (HiFi). Il simbolo elettrico è diverso a secondo che il JFET sia a canale P o a canale N (vedi fig. 7.32).

Il transistor FET

Sono molto simili ai più diffusi MOSFET. In un transistor FET (transistor ad effetto di campo) i tre terminali sono chiamati, rispettivamente, gate G (porta), source S (sorgente) e drain D (pozzo) e l'effetto transistor si ottiene tramite il campo elettrico indotto dalla tensione applicata al terminale gate che fa variare la resistenza elettrica del canale. Più la tensione fra gate e source è grande, più ampia diventa la regione svuotata non conduttrice, priva di portatori, e più cresce la resistenza elettrica fra source e drain. Rispetto ai transistor bipolari, i FET presentano il vantaggio di avere il terminale di controllo (gate) isolato, in cui non passa alcuna corrente. Viene utilizzato come amplificatore di tensione. Il transistor FET non è in grado di offrire molta corrente in uscita; in genere, i circuiti con transistor FET hanno un'alta impedenza di uscita, cioè erogano correnti molto deboli. Anche i FET come i transistor BJT o i MOSFET possono essere realizzati in due versioni complementari, a canale P fiancheggiato da regioni N o a canale N fiancheggiato da regioni P. La figura 7.33 mette

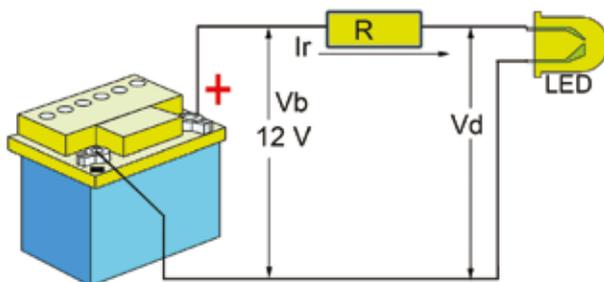


Fig. 7.29 - Esempio di un circuito a 12 V con diodo LED e resistenza limitatrice della corrente.

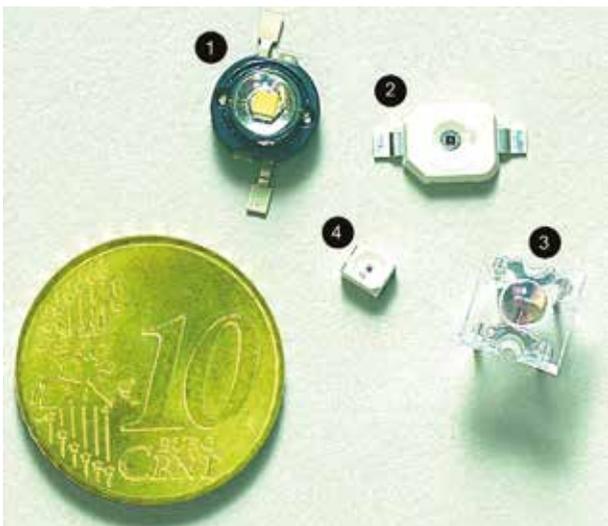


Fig. 7.30 - Esempio di alcuni LED attualmente disponibili. 1) Luxeon di Lumileds (bianco $30 \div 40$ lumen); 2) Golden Dragon di Osram (bianco $25 \div 30$ lumen); 3) Superflux di Lumileds (rosso, giallo $3 \div 12$ lumen); 4) Power Topled di Osram (rosso, giallo, bianco $1,5 \div 6$ lumen).



Fig. 7.31 - Esempio di gruppo ottico anteriore Full-LED (Mercedes).

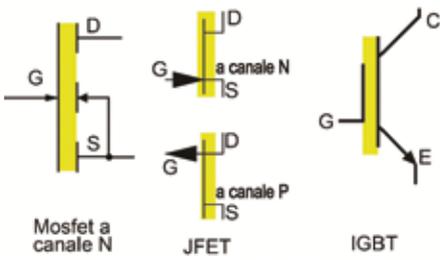


Fig. 7.32 - Simboli elettrici di transistor a confronto: a sinistra MOSFET, al centro JFET, a destra IGBT.

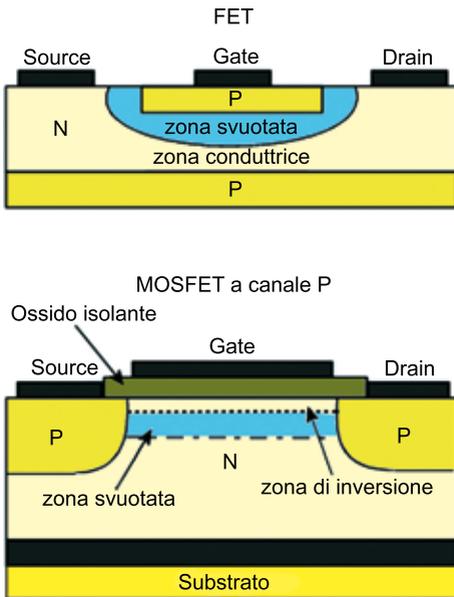


Fig. 7.33 - Struttura di transistor FET a confronto con MOSFET a canale P.

dei migliori transistor MOSFET, non sono più soggetti al latchup e tollerano molto bene i sovraccarichi. Praticamente tutti gli inverter di recente costruzione usano transistor IGBT, quali ad esempio gli inverter industriali per i motori trifase, oppure nel fotovoltaico. Sono componenti molto usati nelle automobili elettriche e ibride, perché permettono di avere unità di controllo motori

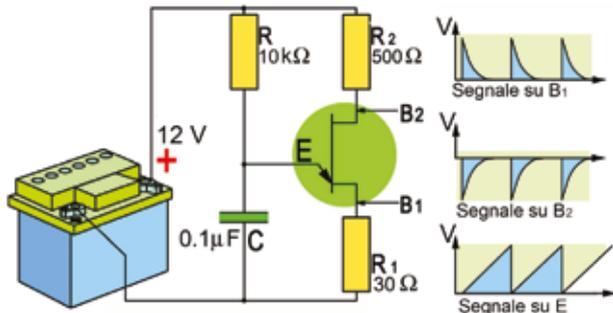


Fig. 7.34 - Esempio di un circuito oscillatore a rilassamento con l'utilizzo di un transistor UJT. I valori delle resistenze (in ohm), sono puramente indicativi.

a confronto la struttura di un transistor FET con uno MOSFET.

Come si potrà osservare (confronta anche con la fig. 7.19), le possibilità di costruire componenti elettronici diversi variando le strutture sono molteplici. Le numerose sigle (acronimi) utilizzate per indicare i diversi componenti possono anche confondere; tuttavia fanno testo le caratteristiche fornite dai produttori sui dData Sheet (caratteristiche tecniche).

Il transistor IGBT

Il transistor bipolare a gate isolato IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) è un dispositivo a semiconduttore usato come interruttore elettronico in applicazioni ad alta potenza ed è in grado di commutare alte tensioni e alte correnti. Può essere schematizzato come il collegamento di un MOSFET e di un transistor a giunzione bipolare (simbolo elettrico in fig. 7.32). Pur essendo le correnti massime sopportabili dal singolo dispositivo inferiori a quelle del tiristore, utilizzando moduli con più IGBT in parallelo si possono ottenere componenti capaci di commutare correnti di 1200 A con tensione massima di 6 kV.

Il dispositivo abbina le caratteristiche di un BJT con quelle di un MOSFET; è un dispositivo di potenza adatto a trattare correnti elevate, che abbina al pregio dell'alta impedenza di ingresso tipica dei transistor MOS quello della bassa tensione di saturazione dei transistor a giunzione bipolare (BJT). È un componente ibrido; infatti, in ingresso è presente un transistor MOS di bassa potenza che pilota un BJT di uscita con potenza elevata.

Il primo brevetto su transistor IGBT è del 1980, mentre i primi modelli commercializzati risalgono al 1983. I primi esemplari erano piuttosto lenti nella commutazione e soggetti a guastarsi facilmente (distruzione per latchup); le successive generazioni hanno migliorato molto il funzionamento e ora sono molto affidabili. Gli IGBT di oggi commutano con la stessa velocità

piccole, potenti ed efficienti. La Toyota Prius sfrutta un inverter da 50 kW basato su IGBT che controlla due motori/generatori collegati al pacco batterie (vedi capitolo 18).

È un dispositivo a scatto a soglia; un transistor IGBT rimane in interdizione finché la tensione fra gate ed emettitore non supera il valore "Vg" di soglia.

In stato di interdizione, tutta la tensione fra collettore ed emettitore è sopportata dalla giunzione P/N- che, grazie al basso drogaggio della regione di deriva N-, è molto spessa e può tollerare senza problemi tensioni inverse molto

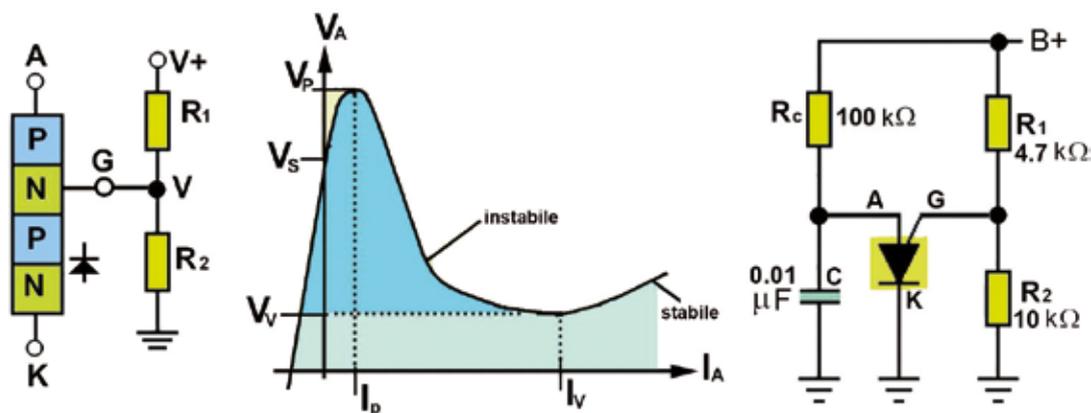


Fig. 7.35 - Schema strutturale di un PUT. Curva di corrente e tensione di un PUT. Esempio di un circuito oscillatore a rilassamento con l'utilizzo di un PUT. I valori delle resistenze sono puramente indicativi.

elevate, tipiche dei tiristori e dei Triac. La giunzione sopporta tensioni dell'ordine delle centinaia di volt. Quando la tensione del gate aumenta oltre il valore "V_g" di scatto, il dispositivo entra in stato di conduzione.

Il transistor UJT

Il transistor unigiunzione UJT è piuttosto particolare in quanto ha tre terminali, ma una sola giunzione PN. Esso non può essere utilizzato come amplificatore, può tuttavia essere usato come componente attivo negli oscillatori. Il transistor UJT è costituito da una barra di silicio con contatti ad entrambe le estremità, denominati Base 1 (B₁) e Base 2 (B₂), e inoltre da un elettrodo in alluminio collegato ad un punto lungo la barra di silicio. Nel punto di contatto, l'alluminio crea una regione di tipo P, dando origine ad una giunzione PN. Tale elettrodo viene chiamato "emettitore" (E). Un'applicazione tipica del transistor UJT è l'oscillatore a rilassamento (relaxation oscillator). Il circuito della figura 7.34 è molto semplice; ecco come funziona: il condensatore C (da 0,1 μF) si carica attraverso la resistenza R (da 10 K) finché raggiunge una tensione critica per il transistor UJT che va in conduzione scaricando completamente il condensatore C. A questo punto il transistor cessa di condurre e il condensatore C riprende a caricarsi ed il ciclo riprende. In figura si possono vedere anche i grafici dei segnali misurabili in B₁, B₂ ed E.

Il transistor PUT

Come si potrà osservare dallo schema in figura 7.35, il transistor PUT (ovvero Transistor Unigiunzione Programmabile) è un dispositivo molto simile al SCR (successione degli strati PNP), ma con una curva di risposta diversa. Anche per il PUT, come per l'SCR, gli elettrodi sono il catodo (K), l'anodo (A) e il gate (G). Il suo simbolo appare in figura ed è identico a quello dell'SCR. Alla regione N intermedia viene applicata una tensione (V_s) ottenuta grazie al partitore R₁ e R₂. Tale tensione polarizza in modo inverso la giunzione PN (diodo) finale verso il catodo, come rappresentato in figura; in questa condizione il sistema non conduce. Se si applica all'anodo una tensione che supera la V_s il PUT conduce da anodo a catodo. Il PUT viene definito transistor programmabile perché consente di scegliere a piacere (adattando le resistenze R₁ e R₂) la tensione di scatto V_s.

Il circuito che si vede in figura 7.35 è un oscillatore a PUT. Il condensatore (da 0,01 μF) si carica fino a superare la tensione di scatto, oltre la quale il PUT conduce scaricando completamente il condensatore. Il ciclo riparte con la successiva carica del condensatore e si ripete all'infinito. L'unico accorgimento per innescare l'oscillazione è che la corrente che scorre attraverso il PUT da anodo a catodo (e che quindi attraversa la R_c) deve essere inferiore a I_v.

La R_c dovrà essere sufficientemente grande da limitare la corrente ad un valore di spegnimento della conduzione.

Per esempio, se il transistor avesse una corrente I_v di 200 μA alimentando il sistema di figura con una tensione di 12 V, entrerebbe in oscillazione perché la corrente imposta dalla resistenza R_c sarebbe di soli 120 μA con un periodo di circa 0,4 ms.

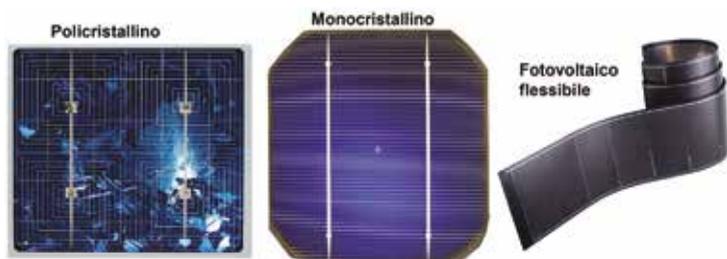


Fig. 7.36 - Esempio di alcuni tipi di pannelli fotovoltaici.



Fig. 7.37 - Pannello fotovoltaico sul tetto di una auto.

luce nella regione della base.

La **cellula fotovoltaica** converte direttamente la luce incidente in tensione e corrente elettrica. Di solito le celle fotovoltaiche non vengono utilizzate singolarmente, ma in moduli con più celle in serie-parallelo per ottenere tensioni e correnti maggiori.

Un modulo fotovoltaico è tipicamente impiegato come generatore di corrente in un impianto fotovoltaico. L'utilizzo di tali moduli nel settore auto è per ora preponderante nel settore dei veicoli ricreazionali (camper, motorhome e roulotte), ma si sta diffondendo anche per la ricarica delle batterie di bordo dei veicoli elettrici o ibridi. Tali pannelli sono molto utilizzati anche per le stazioni

di ricarica dei suddetti veicoli, dislocate nei parcheggi con ampie tettoie fotovoltaiche. I tipi di pannelli solari più diffusi sono con cellule di silicio monocristallino, policristallino e amorfi; attualmente si stanno sperimentando vari supporti (anche flessibili) e nuovi tipi di cellule.

I pannelli più diffusi sono di tipo monocristallino o policristallino.

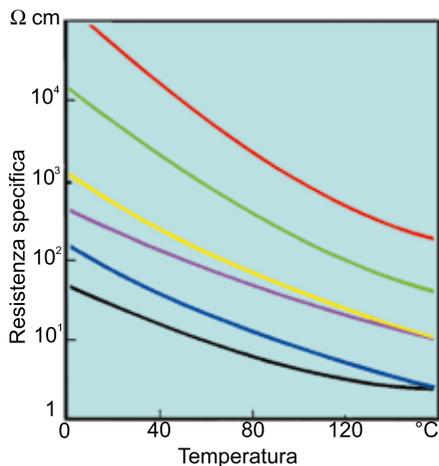


Fig. 7.38 - Resistenza specifica (resistività) in funzione della temperatura per diversi materiali NTC.

Il periodo è imposto dalla resistenza R_c e dalla capacità C .

Dispositivi fotosensibili

Il **foto diodo** è un semiconduttore PN che viene generalmente usato in polarizzazione inversa. Il fotodiode diventa conduttore quando viene esposto alla luce e la corrente inversa che lo attraversa è direttamente proporzionale alla luce che colpisce la giunzione. La **fotoresistenza** LDR (*Light Dependent Resistor* o FTR) è un semiconduttore che diminuisce di resistenza se colpito da luce. Il suo comportamento è molto più lento rispetto a quello del fotodiode. La fotoresistenza risponde a frequenze di chiaro scuro di 10 Hz massimo.

Il fotodiode risponde, invece, a chiaroscuri con frequenza fino a 100 kHz.

Il **fototransistor** è un semiconduttore PNP o NPN che diventa conduttore se colpito da

NTC

I materiali NTC sono in genere dei semiconduttori. I materiali NTC sono costituiti da insiemi molto diversi di miscele di polveri di ossidi metallici e ossidi ferrosi (in principal modo con sali metallici come per esempio titanato di zinco e cromato di magnesio). La miscela di polveri viene sinterizzata con un legante plastico, ad elevata temperatura.

La temperatura agisce sulla struttura del materiale creando separazione di cariche che diventano quindi libere di muoversi. Questo si traduce in una diminuzione di resistenza all'aumentare della temperatura.

Vengono anche definiti conduttori a caldo. Gli NTC, in conseguenza di ciò, hanno curve di resistenza che cadono verso destra; il coefficiente di temperatura è negativo. Il conduttore a caldo è una resistenza di tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*). Le resistenze NTC hanno coefficienti di temperatura compresi tra -2 e -6 $\%/^{\circ}\text{C}$ (vedi grafici in fig. 7.38). L'NTC viene usato per le misure di temperatura; in tal caso la sua struttura costruttiva è adattata alla percezione della temperatura dell'elemento sul quale si effettua la misura.

VDR

Il VDR o varistore è un insieme di minuscoli grani di carburo di silicio sinterizzati con un legante in una massa molto dura. Dal punto di vista elettrico è una rete di diodi collegati in serie, in parallelo e in anti-parallelo. I VDR, se sottoposti ad una tensione crescente, diminuiscono rapidamente di resistenza. Nel grafico di figura 7.39 si potrà osservare come, all'aumentare della tensione alla quale si sottopone il VDR, diminuisce rapidamente la resistenza e aumenta, di conseguenza, la corrente che lo attraversa.

I VDR si presentano con forma a disco con due reofori. Vengono utilizzati per lo più per la soppressione di scariche elettriche, per la stabilizzazione di tensione e come protezione contro le sovratensioni.

Indicatori a cristalli liquidi (LCD)

I cristalli liquidi sono molto usati negli indicatori digitali, ma vengono oggi utilizzati perfino negli schermi televisivi. Essi sono di natura organica a struttura filiforme. Il cristallo liquido viene chiuso ermeticamente tra due vetri che internamente sono resi conduttori da uno strato di materiale conduttore trasparente. La tensione applicata ai due sottilissimi strati conduttori delle facce interne dei vetri, sottopone il cristallo liquido ad un campo elettrico. Il campo altera la caratteristica di riflessione del cristallo che diventa opaco o cambia colore. Esistono cristalli liquidi a diversi colori che si sono diffusi a vari settori dell'elettronica e che sono utilizzati anche negli indicatori per auto. L'indicatore a LCD non emette luce propria, ma riflette la luce incidente, quindi, in condizioni di scarsa luminosità, non è visibile. Esistono però varie tecniche di retro-illuminazione che evitano l'inconveniente e che ne permettono molte applicazioni. Il cristallo liquido LCD ha un consumo bassissimo e permette di costruire ottimi schermi video a colori con zero emissione di radiazioni. Nelle auto lo si trova sia nei quadri strumenti che negli indicatori multifunzioni (navigatore, audio, clima, ecc.), sia negli schermi video per TV e lettore di CD e DVD. Gli schermi a LED stanno tuttavia soppiantando i sistemi a LCD grazie a una miglior luminosità, un maggior contrasto e una minor persistenza dell'immagine (maggiore velocità di esecuzione) che li rende più adatti alle immagini video (immagini in rapida successione e/o variazione).

Circuiti integrati

I circuiti integrati hanno senz'altro cambiato il modo di realizzare, ovvero di progettare un circuito elettronico. Con componenti singoli (transistor, diodi, resistenze, condensatori, bobine, SCR, PUT, ecc.) detti "discreti", ci si preoccupa di determinare per ognuno di essi le giuste condizioni

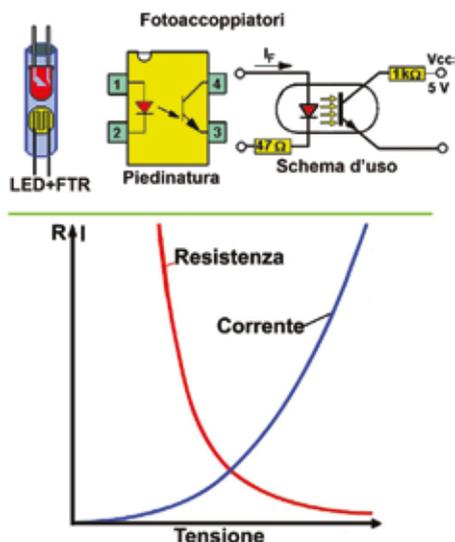


Fig. 7.39 - Sopra a sinistra: diodo LED accoppiato con una fotoresistenza FTR. A destra sopra: circuito integrato fotoaccoppiatore LED-fototransistor. Sotto: andamento di resistenza e corrente in funzione della tensione applicata ad un VDR.

Tensione in entrata	Sigla dell'integrato	Tensione in uscita
Volt		Volt
Circa 7	7805	5
Circa 10	7875	7,5
Circa 13	7809	9
Circa 15	7812	12
Circa 18	7815	15
Circa 24	7818	18
Circa 30	7824	24

Tab. 7.1 - Tabella degli integrati della serie L7800.

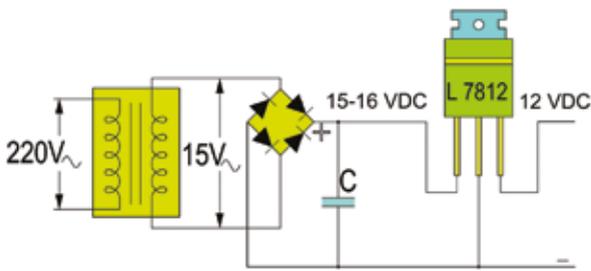


Fig. 7.40 - Schema di principio semplificato di un alimentatore stabilizzato a 12 VDC che si basa su di un circuito integrato regolatore di tensione L 7812.

transistor non è altro che una minuscola particella di silicio (o altro materiale semiconduttore) opportunamente trattato. Realizzando i collegamenti (studiati al microscopio) con procedimenti fotografici, è possibile ottenere su una piastrina di pochi millimetri quadrati un circuito completo formato da migliaia di transistor, resistenze, diodi, condensatori, ecc.

Non serve sapere come funziona un circuito integrato al suo interno, ma quali funzioni svolge e con quali caratteristiche.

Un esempio esplicativo lo affronteremo nel paragrafo successivo, occupandoci di un circuito integrato alimentatore.

Circuiti integrati regolatori di tensione

Questo circuito, in grado di fornire in uscita una tensione ben stabile, indipendentemente dalla corrente assorbita, richiedeva una volta il collegamento tra loro di componenti discreti come lo Zener, resistenze, condensatori, alcuni diodi e uno o più transistor. Era necessario collegare insieme i diversi componenti, realizzando uno schema più o meno complesso. L'integrazione e la miniaturizzazione hanno permesso di realizzare un apposito circuito integrato che ha solo 3 piedini da collegare.

In figura 7.40 è rappresentato lo schema di uno stabilizzatore di tensione basato su di un circuito integrato L7812. Il suo impiego è piuttosto semplice e, come si vede in figura, basterà inserirlo in un circuito a $15 \div 16$ VDC.

La trasformazione della VAC in VDC è già stata oggetto di studio (vedi fig. 7.12).

Naturalmente, se ci occorre in uscita una tensione stabile a 12 V, non potremo utilizzare un alimentatore che fornisca in entrata al regolatore di tensione un valore inferiore a $15 \div 16$ VDC. Questi circuiti integrati sono in grado di regolare perfettamente la tensione, nel senso che la abbassano con precisione al valore richiesto, ma se la tensione che ricevono in ingresso non è abbastanza alta, non possono certo funzionare.

Il circuito integrato L7812 fornisce in uscita una corrente da 1 A (come tutta la famiglia dei circuiti della serie L7800).

In funzione della tensione che si vuole ottenere in uscita, sarà necessario utilizzare un diverso integrato, come si vede nella tabella 7.1. Se il circuito deve funzionare alla massima potenza e per tempi lunghi è consigliabile provvedere al raffreddamento del circuito integrato; esso è infatti dotato di un apposito foro che permette di fissarlo, tramite vite con dado, su una piastrina metallica, di alluminio o di rame, atta a dissipare il calore. Il calcolo del dimensionamento del trasformatore, del ponte raddrizzatore, del condensatore, ecc. sono in funzione della corrente assorbita dal carico. In questo esempio abbiamo scelto una corrente da 1 A e quindi sarà sufficiente un trasformatore da $15 \div 18$ W e un integrato L7812, ma se volessimo potenze più elevate sarà necessario sostituire il trasformatore, il ponte raddrizzatore e il circuito integrato con altri di maggior potenza.

D'ora in poi chiameremo i circuiti integrati semplicemente IC.

IC amplificatori operazionali

Si chiama amplificatore un dispositivo atto ad aumentare l'ampiezza o il livello di una grandezza elettrica, variabile nel tempo, senza alterarne la forma d'onda.

Il segnale in ingresso ad un amplificatore viene fedelmente riprodotto in uscita, ma ad una potenza maggiore. La potenza viene consumata dal circuito di alimentazione del circuito amplificatore.

di funzionamento, in termini di tensioni e correnti, e quindi di collegare un componente all'altro in modo da ottenere un circuito che abbia determinate caratteristiche.

Un circuito integrato contiene al suo interno un numero elevatissimo di componenti e in pochissimo spazio abbiamo un circuito che ha le stesse caratteristiche di uno costruito con componenti discreti.

Naturalmente non si tratta di componenti confezionati nel loro involucro e dotati di reofori di collegamento, come quelli visti nei paragrafi precedenti. Il cuore di un

L'amplificatore operazionale è forse il circuito integrato più utilizzato. Grazie alla produzione in larghissima scala, il suo costo è sceso a livelli talmente bassi da renderne conveniente l'uso in moltissime applicazioni.

L'amplificatore operazionale è un amplificatore in continua, cioè esiste una continuità elettrica fra ingresso e uscita.

Il nome di "operazionale" è dovuto all'uso per cui era nato tale amplificatore, ossia il funzionamento all'interno di elaboratori analogici per l'esecuzione di operazioni matematiche quali somme, differenze, integrazioni.

Con l'aggiunta di pochi componenti esterni si possono realizzare i più svariati tipi di circuito.

Guadagno di un amplificatore

Si definisce guadagno di un amplificatore il rapporto tra il valore del segnale di uscita e il valore di quello in ingresso.

Il guadagno viene anche espresso in decibel e si indica con la lettera A maiuscola:

$$A_{dB} = 20 \text{ Log } \frac{V_u}{V_i}$$

Se si dovessero collegare due o più amplificatori in cascata (serie), il guadagno complessivo sarebbe pari alla somma dei singoli guadagni espressi in decibel (dB).

Larghezza di banda di un amplificatore operazionale

La larghezza di banda di un amplificatore è la banda di frequenze compresa tra la frequenza di taglio superiore (fs) e quella di taglio inferiore (fi).

Si definisce frequenza di taglio quella alla quale il guadagno si riduce di 3 dB rispetto al valore massimo o di lavoro.

La larghezza di banda si riduce in funzione del guadagno con il quale l'amplificatore viene utilizzato. Per esempio, l'IC μA 741 ha una larghezza di banda di 1 MHz se utilizzato con guadagno uguale a 1, se viene utilizzato con guadagno = 100, la larghezza si riduce a 10 kHz, se viene utilizzato con guadagno = 10.000, la larghezza si riduce a 100 Hz, mentre in corrente continua il guadagno è di circa 100.000.

Ingressi dell'amplificatore operazionale

L'amplificatore operazionale ha due ingressi, che prendono il nome di ingresso invertente e ingresso non invertente; il segnale di uscita è legato agli ingressi dalla seguente relazione:

$$V_u = A \cdot (V_1 - V_2)$$

dove A è il guadagno a catena aperta, cioè senza nessun collegamento tra ingresso e uscita.

Caratteristiche ideali dell'amplificatore operazionale

Un amplificatore operazionale ideale dovrebbe avere le seguenti caratteristiche:

- resistenza di ingresso R_{in} = (infinito);
- resistenza di uscita R_{out} = 0;
- larghezza di banda B = infinito ($f_i = 0$, $f_s = \text{infinito}$)
- guadagno di tensione ad anello aperto A = infinito;
- CMRR = infinito.

Il CMRR (rapporto di reiezione al modo comune) è definito dalla seguente formula:

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c}$$

$$A_d = \frac{V_u}{V_1 - V_2} \text{ ed } A_c = \frac{V_u}{\frac{V_1 + V_2}{2}}$$

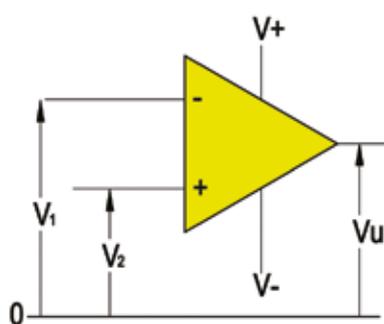


Fig. 7.41 - Ingressi dell'amplificatore operazionale.

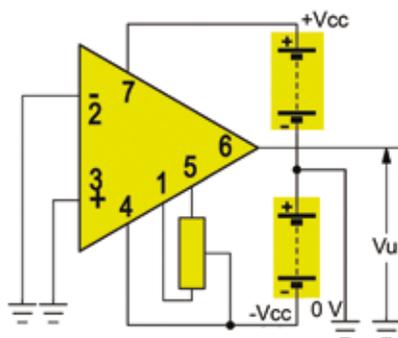


Fig. 7.42 - Regolazione dell'offset di un IC amplificatore operazionale.

Vista la resistenza infinita in ingresso, l'amplificatore operazionale ideale non dovrebbe consumare corrente sugli ingressi e la massa è, di conseguenza, una massa virtuale rispetto alle tensioni e non rispetto alle correnti.

Vista la resistenza in uscita ideale, un circuito di questo tipo sarebbe in grado di fornire potenza a qualsiasi carico senza assorbire potenza dal segnale in ingresso.

Utilizzarlo senza una rete di controreazione sarebbe impossibile in quanto avrebbe in uscita un segnale infinito con un segnale anche debolissimo in entrata.

In pratica il CMRR non è infinito, così come non lo è la resistenza in ingresso e nemmeno il guadagno ad anello aperto. La resistenza in uscita non è zero e la larghezza di banda non è infinita.

Le caratteristiche reali sono fornite dai costruttori tramite i "data sheets".

Offset di un IC operazionale

Un inconveniente di molti IC amplificatori operazionali è che la loro tensione in uscita può subire variazioni con il tempo e con le variazioni di temperatura.

Il valore di tensione che compare in uscita con tutti e due gli ingressi collegati alla massa si chiama offset. Questa tensione può essere riportata a zero regolando un potenziometro collegato come in figura 7.42 (mantenendo i due ingressi a zero) e misurando la tensione in uscita con un millivoltmetro. A volte i data sheets forniscono indicazioni in merito. La tensione di offset è invece la tensione che deve essere applicata tra i terminali in ingresso affinché sia nulla la tensione di uscita V_u .

Tensione differenziale d'ingresso

Il segnale totale applicato all'ingresso dell'amplificatore operazionale è la differenza dei potenziali V_1 (pin 2) e V_2 (pin 3) e si chiama tensione differenziale d'ingresso. L'IC amplificatore operazionale prende il nome anche di amplificatore differenziale. La tensione in uscita V_u dipende infatti dal guadagno A e dalla differenza di potenziale in ingresso ($V_1 - V_2$) come abbiamo già visto in figura 7.41 (ingressi dell'amplificatore operazionale).

		μA 741	OP17	OPA27HT
Guadagno	A	200.000	300.000	1.000.000
Resistenza ingresso	R_{in}	2 M Ω	10 ¹² Ω	3 · 10 ¹² Ω
Resistenza uscita	R_{out}	75 Ω	70 Ω	70 Ω
Larghezza di banda	B	1 MHz	30 MHz	36 MHz

Tab. 7.2 - Principali caratteristiche di alcuni operazionali.

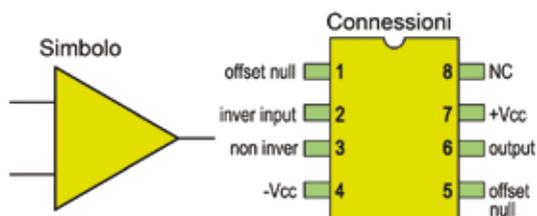


Fig. 7.43 - Simbolo elettrico e connessioni di un amplificatore operazionale di uso comune (dual-in-line-package).

Alimentazione e massima tensione di uscita

L'IC amplificatore operazionale (o amplificatore differenziale) richiede solitamente una alimentazione duale di 15 V (± 15 V, cioè 30 V totali); ne esistono anche ad alimentazioni diverse.

Per massima tensione di uscita si intende la massima tensione che l'IC operazionale può fornire in uscita senza deformare, distorcere o saturare il segnale. Solitamente per quelli alimentati a 15 V il valore è di circa $\pm 13,5$ V.

Corrente di corto circuito

La corrente $I_{c.c.}$ è la massima corrente che l'IC operazionale può fornire al carico. Per un IC μA 741, ad esempio, il valore è di circa 25 mA.

Slew rate

Lo slew rate rappresenta la massima velocità di variazione della tensione d'uscita nel passaggio dal massimo valore positivo al massimo negativo e viceversa, in risposta ad un'onda quadra in ingresso (tempo di commutazione).

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

Tensione di uscita in funzione delle tensioni di ingresso

Per vedere che cosa succede in uscita in funzione delle tensioni presenti in ingresso prendiamo in considerazione il circuito di figura 7.44.

Supponiamo di alimentare i circuiti delle figure 7.44, 7.45 e 7.46 a 12 V e che le due resistenze R_1 ed R_2 abbiano lo stesso valore. La tensione presente all'ingresso (+3) dell'IC sarà 5 V.

Muovendo il cursore C del potenziometro R_v si fa variare la tensione sull'ingresso (-2) dell'IC.

Spostando lentamente il cursore del potenziometro si noterà che la tensione di uscita non è regolabile; si mantiene al minimo o al massimo e cambia improvvisamente.

Non si riesce mai ad ottenere dei valori intermedi tra lo 0 V e il +12 V pur facendo attenzione a muovere il potenziometro con estrema lentezza intorno al valore intermedio. Non appena oltrepassato il punto di commutazione di nuovo non si riesce ad ottenere nessuna regolazione. Facendo ritorno alla regolazione precedente il sistema commuta di nuovo e così via. Che cosa succede? È sufficiente che vi sia anche una minima differenza (di pochi μV) tra gli ingressi perché l'uscita commuti al positivo o al negativo dell'alimentazione. In realtà, la tensione di uscita si porta a valori molto vicini al valore del minimo e del massimo di alimentazione senza mai raggiungerli.

In figura 7.45 il tester segna in uscita 0,96 V perché il potenziometro è regolato al valore massimo e la tensione sull'ingresso invertente (-2) è maggiore di quella presente sull'ingresso non invertente (+3).

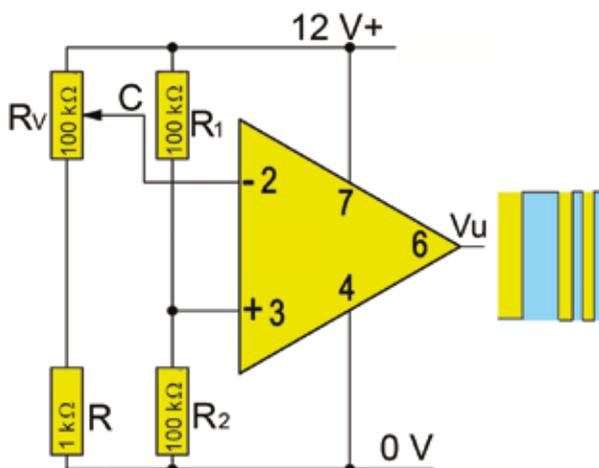


Fig. 7.44 - Circuito test dell'IC amplificatore differenziale.

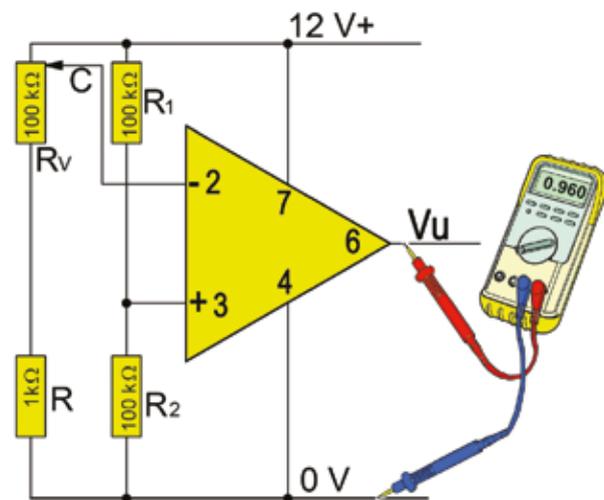


Fig. 7.45 - Tensione sull'ingresso invertente (-2) maggiore della tensione sull'ingresso non invertente.

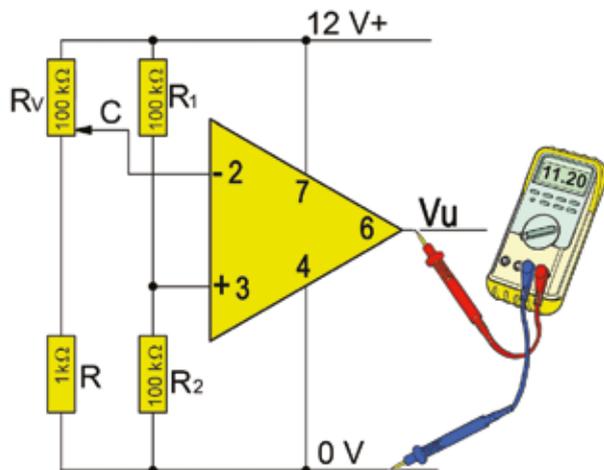


Fig. 7.46 - Tensione sull'ingresso invertente (-2) minore della tensione sull'ingresso non invertente.

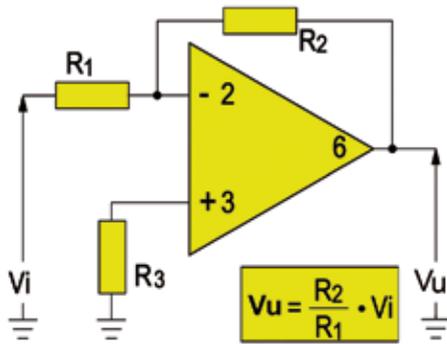


Fig. 7.47 - Amplificatore lineare invertente.

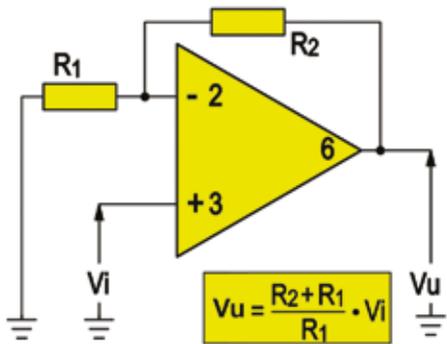


Fig. 7.48 - Amplificatore lineare non invertente.

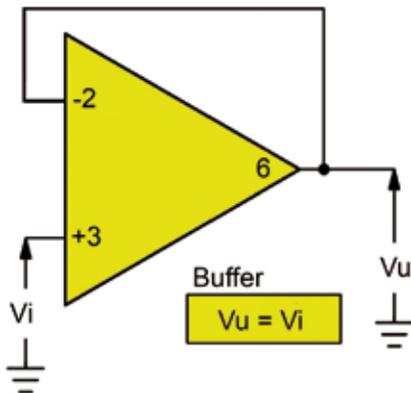


Fig. 7.49 - IC amplificatore operazionale utilizzato come "buffer".

all'ingresso non invertente attraverso la resistenza R_1 . V_u è la tensione amplificata che si ritrova in uscita. La resistenza R_2 riporta all'entrata invertente parte del segnale in uscita, realizzando in tal modo una controreazione. L'amplificazione del circuito di figura 7.48 dipende dalle due resistenze R_1 ed R_2 , secondo la formula:

$$V_u = \frac{R_2 + R_1}{R_2} \cdot V_i$$

Buffer

Lo schema del circuito in figura 7.49 mostra l'utilizzo dell'IC operazionale come buffer. Per buffer si intende un circuito che svolge una funzione di separazione o di adattamento. Nel caso specifico, il circuito presenta la più alta impedenza d'ingresso ottenibile con gli amplificatori

Il valore in uscita indicato in figura è indicativo in quanto è variabile in funzione del tipo di IC amplificatore, della temperatura, del carico, ecc. In figura 7.46 il tester segna 11,2 V perché l'ingresso invertente è alimentato con una tensione inferiore a quella del pin 3 (ingresso non invertente). Se volessimo una conferma di quanto appena scoperto, basterà alimentare a 5 V con il partitore R_1 e R_2 l'ingresso invertente (-2) e l'ingresso non invertente (+3) con una tensione variabile. Quando la tensione sul pin 3 supererà quella di riferimento sul pin 2, l'uscita commuterà al positivo (in questo caso 11,2 V).

Amplificatore lineare invertente

Lo schema di collegamento dell'IC amplificatore operazionale come amplificatore lineare invertente è quello di figura 7.47. La tensione V_i viene applicata all'ingresso invertente attraverso la resistenza R_1 . V_u è la tensione amplificata che si ritrova in uscita. La resistenza R_2 riporta all'entrata parte del segnale in uscita, realizzando in tal modo quella che viene detta controreazione. Senza R_2 , l'IC operazionale non potrebbe funzionare come amplificatore lineare, poiché la sua uscita commuterebbe con estrema rapidità fra un valore minimo (prossimo a zero) e un valore massimo (prossimo alla tensione di alimentazione). Come abbiamo appena visto. L'amplificazione del circuito di figura 7.47 dipende dalle due resistenze R_1 ed R_2 , secondo la formula:

$$A = \frac{R_2}{R_1}$$

Vediamo un esempio numerico con $V_i = 1\text{mV}$:

$R_1 = 100\text{ k}\Omega$ (cioè 100.000 Ω), $R_2 = 1\text{ M}\Omega$ (cioè 1.000.000 Ω).

L'amplificazione R_2/R_1 sarà:

$$A = 1.000.000 : 100.000 = 10$$

Poiché l'amplificazione è 10, con 1 mV in entrata avremo in uscita 10 mV. Il segnale in uscita è invertito, ovvero è di segno opposto a quello in entrata; se V_i aumenta, V_u diminuisce, e viceversa.

Amplificatore lineare non invertente

Lo schema di collegamento dell'IC amplificatore operazionale come amplificatore lineare non invertente è quello di figura 7.48. La tensione V_i viene applicata

operazionali. Per ottenere tale risultato, si applica il massimo valore possibile di controreazione, collegando direttamente l'uscita con l'ingresso invertente.

Per tale motivo, il guadagno di questo circuito è uguale a 1, il che vuol dire che il circuito non amplifica (essendo il segnale di uscita uguale a quello di entrata); in altre parole, non si ottiene un guadagno di tensione, ma un guadagno di impedenza. Abbiamo già avuto modo di vedere che l'adattamento di impedenza è una necessità che spesso si presenta nei circuiti elettronici. Di seguito prenderemo in esame alcuni circuiti che fanno uso dell'amplificatore operazionale o amplificatore differenziale che chiameremo semplicemente IC A.O.

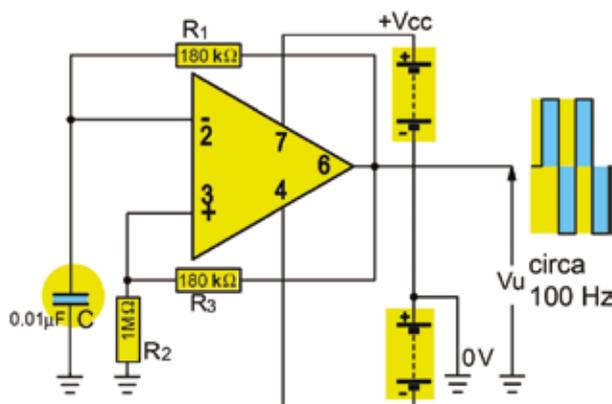


Fig. 7.50 - IC amplificatore operazionale utilizzato come oscillatore.

Oscillatore con IC A.O.

Con l'amplificatore operazionale è facile realizzare un multivibratore che produce in uscita un'onda quadra perfettamente simmetrica.

Uno dei vantaggi di tale oscillatore è, per esempio, che si possono ottenere basse frequenze di oscillazione senza ricorrere a capacità di valore troppo elevato. Il circuito illustrato in figura 7.50, con i valori indicati, oscilla a circa 100 Hz. Lavorando con gli IC amplificatori operazionali, come del resto con qualsiasi altro circuito integrato, occorre sempre fornire una alimentazione stabile (in questo caso duale come indicato appunto in figura). Con due batterie da 6 V, si ottiene una alimentazione duale ed un segnale ad onda quadra in uscita che oscilla tra 1 e 11 V circa.

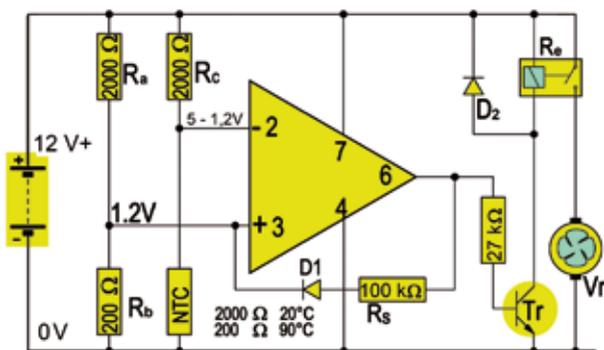


Fig. 7.51 - Circuito semplificato per il comando a termostato della ventilazione radiatore. Il termostato elettronico si basa su di un NTC che a 90 °C ha una resistenza di 200 Ω e sull'utilizzo dell'IC A.O. come circuito di scatto.

Termostato con IC A.O.

Lo schema del circuito in figura 7.51 si basa sull'IC A.O. come circuito di scatto e regolazione della temperatura radiatore motore. Il sensore NTC è montato sul tubo di collegamento motore (uscita testata) e radiatore di raffreddamento motore. Il sensore ha una resistenza di 200 Ω a 90 °C mentre a 20 °C ha una resistenza di 2000 Ω.

La tensione di riferimento (di soglia o scatto) è di 1,2 V perché ripartita dalle due resistenze Ra ed Rb rispettivamente da 2000 Ω e 200 Ω.

All'aumentare della temperatura del liquido motore, diminuisce la resistenza del NTC che a 90 °C raggiunge il valore di 200 Ω. Non appena si supera questa soglia di temperatura il valore della resistenza del NTC scende sotto i 200 Ω e la tensione sul pin 2 (invertente) scende a un valore inferiore a quello di riferimento (1,2 V). L'IC A.O. commuta in uscita al positivo polarizzando la base del transistor Tr tramite la resistenza di polarizzazione (27 kΩ in figura). Il transistor entra in conduzione e fa scattare il relè Re che, a sua volta, comanda la ventola di raffreddamento Vr. Il diodo D₂ serve a evitare le sovratensioni di ritorno quando il transistor interrompe la corrente di comando del relè Re.

Il diodo D₁ e la resistenza Rs servono ad alzare la soglia di rilascio ad un valore di tensione superiore a 1,2 V. In pratica si fa scattare il relè a circa 90 °C e lo si fa rilasciare a circa 87 °C.

Lo schema che abbiamo preso in considerazione è solo un esempio (didattico) di come si possa

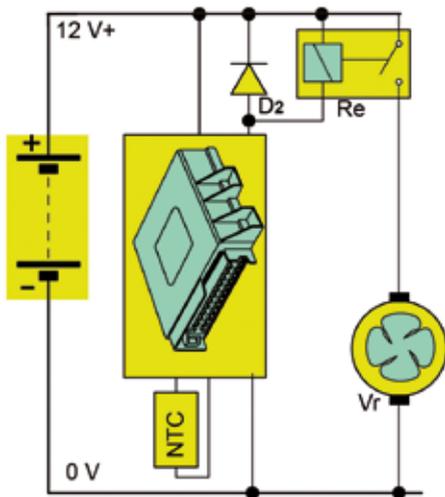


Fig. 7.52 - Circuito raffreddamento radiatore motore con termostato elettronico governato da centralina motore.

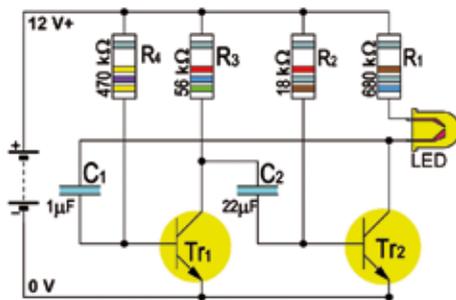


Fig. 7.53 - Circuito oscillatore a transistor BJT e condensatori.

costruire oscillatori anche a MOSFET. La scelta del tipo di oscillatore dipende dalle caratteristiche che si vogliono ottenere (frequenza, potenza, ecc.). Esistono anche oscillatori al quarzo (di precisione) ad alta frequenza utilizzati per scandire tempi con estrema precisione (sono il clock degli elaboratori e dei nostri orologi). Nello schema di figura 7.54 ci occuperemo di un altro circuito IC molto diffuso che, con pochi componenti esterni, permette di costruire oscillatori e temporizzatori; l'IC NE555.

Generatore di onda quadra o rettangolare

In figura 7.54 utilizzeremo un circuito IC NE555 per la realizzazione di un segnale di 60 Hz ad onda quadra. Le relazioni tra le resistenze R_1 ed R_2 ed il condensatore C_1 che stabiliscono il periodo dell'oscillazione sono definite dalle seguenti formule:

$$T_1 = 0,693 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1$$

$$T_2 = 0,693 \cdot R_2 \cdot C_1$$

$$T_0 = 0,693 \cdot (R_1 + 2R_2) \cdot C_1$$

Ci siamo occupati di come comandare un motorino in corrente continua tramite un MOSFET ed una regolazione PWM.

Il circuito a blocchi in figura 7.20 contiene come primo blocco proprio un oscillatore ad onda quadra. Come secondo blocco contiene un integratore. Il segnale in uscita (V_{out}) dall'oscillatore NE555 è una forma d'onda quadra di circa 60 Hz con un duty cycle di circa il 50% che oscilla tra 0,6 V e 4,4 V circa e che noi useremo come segnale di ingresso per un circuito integratore.

realizzare facilmente un termostato con un IC A.O. e pochi altri componenti. In realtà, il circuito di cui sopra viene realizzato con valori di resistenze diversi per ridurre il consumo di corrente. Inoltre, tale circuito si trova all'interno delle centraline di gestione motore con componenti miniaturizzati ed alimentati a tensione diversa da quella dell'esempio. Le centraline hanno all'esterno solo il sensore NTC e il relè di comando dell'elettroventola (vedi fig. 7.52).

Circuito lampeggiatore a transistor BJT

Per considerare il circuito di figura 7.53 partiamo dalla posizione con Tr_1 in conduzione e il LED spento. Se Tr_1 è in conduzione significa che il suo collettore è sceso a tensione zero; ma allora anche la base di Tr_2 , collegata al collettore di Tr_1 tramite il condensatore C_2 , è necessariamente scesa a tensione zero. In questa situazione, infatti, Tr_2 non conduce ed il LED risulta spento.

Lentamente, tuttavia, il condensatore C_2 si carica con la corrente, che fluisce attraverso la resistenza R_2 , e così la tensione di base di Tr_2 comincia a salire.

Quando la tensione sulla base di Tr_2 raggiunge un valore sufficiente, il transistor passa in conduzione; a questo punto, il LED si accende, la tensione di collettore va a zero e, tramite il condensatore C_1 , porta a zero anche la tensione sulla base di Tr_1 , che passa in interdizione.

Questa situazione non dura a lungo, ma è solo momentanea, perché il condensatore C_1 inizia a caricarsi attraverso la R_4 ; quando la tensione di base diventa abbastanza alta, il transistor passa in conduzione e torna a bloccare il transistor Tr_2 (e quindi a spegnere il LED). Il ciclo si ripete all'infinito e il circuito viene definito multivibratore. Si possono costruire lampeggiatori anche con altri circuiti; abbiamo già visto come si possa costruire un oscillatore con un IC A.O. e un oscillatore a rilassamento con UJT; infine, si possono

Circuito integratore

Il circuito integratore di figura 7.55 genera un segnale ad onda triangolare grazie alla resistenza di ingresso R_1 , alla resistenza di contro-azione R_2 e al condensatore C . Il condensatore C fissa sia i tempi di salita dell'onda triangolare che quelli di discesa. Dato che la frequenza del segnale in entrata è fissa, e dipende dall'oscillatore NE555, si può calibrare il circuito in figura 7.55, tramite R_1 ed R_c in modo che in uscita vi sia sicuramente un'onda triangolare (e non la curva di carica tipica del condensatore). La frequenza di funzionamento dell'integratore è compresa tra f_c ed f_i ; dipende dal condensatore e dalle resistenze secondo le seguenti formule.

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C}$$

$$f_i = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C}$$

La regolazione della tensione di soglia sul pin non invertente tramite R_c permette la calibratura dei tempi di salita e discesa dell'onda triangolare.

Circuito comparatore

Il circuito comparatore si basa su di un amplificatore operazionale che sull'ingresso non invertente (3+) ha una tensione di riferimento e sull'ingresso invertente (2-) riceve un segnale da comparare con il riferimento stesso.

In figura 7.56 abbiamo un circuito comparatore che viene alimentato in ingresso con un segnale ad onda triangolare (proveniente dal circuito integratore precedente) con frequenza di circa 60 Hz. La presenza di questo segnale sul pin invertente dell'IC A.O. provoca delle commutazioni in uscita (come rappresentato in fig. 7.57) che dipendono dal valore di regolazione della tensione presente al pin 3 (non invertente).

In sostanza, è possibile regolare il duty cycle del segnale in uscita regolando la soglia di tensione sul comparatore.

Tornando al circuito descritto in figura 7.20, si vede che il circuito Chopper termina con un segnale PWM da inviare al transistor MOSFET in serie al motorino di cui si vuole regolare la velocità.

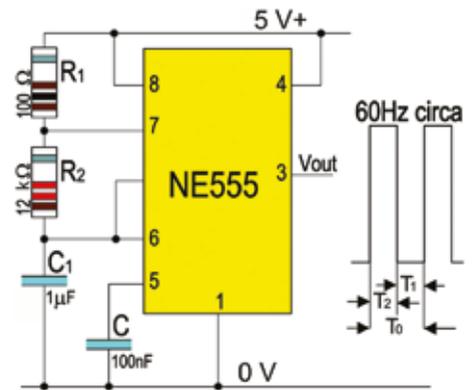


Fig. 7.54 - Circuito oscillatore con NE555; oscillazione a circa 60 Hz con duty cycle a circa 50%.

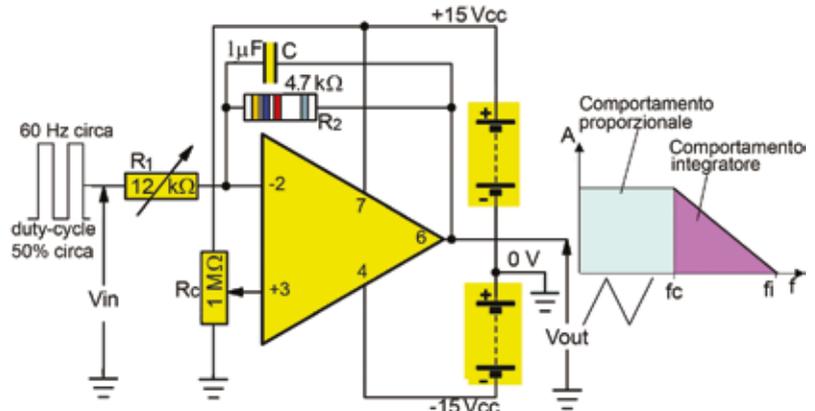


Fig. 7.55 - Circuito integratore con IC A.O.

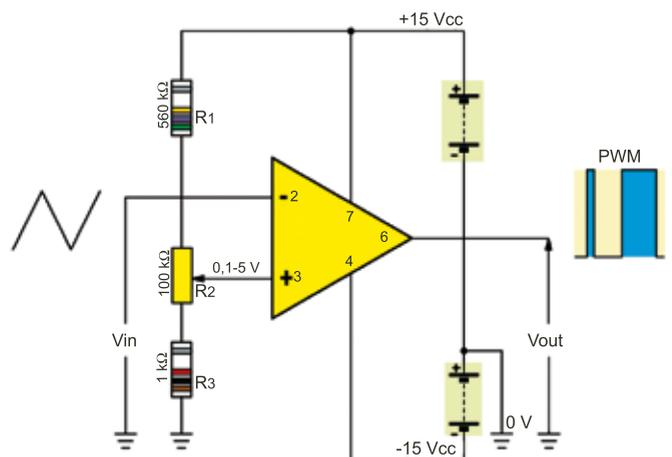


Fig. 7.56 - Circuito oscillatore comparatore tra il segnale ad onda triangolare ed un riferimento regolabile (tra 0 e 5 V).

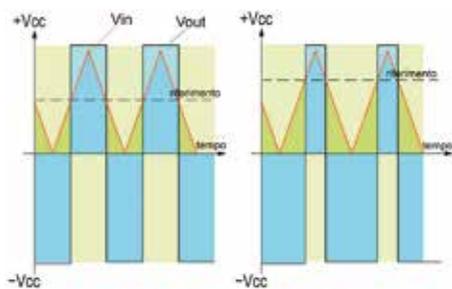


Fig. 7.57 - Segnale in uscita dal comparatore in funzione della regolazione della tensione di riferimento con un segnale in ingresso ad onda triangolare.

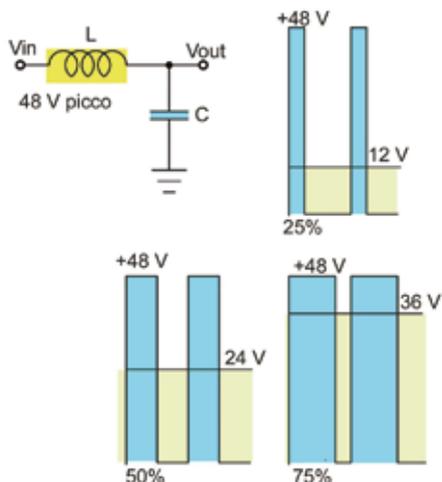


Fig. 7.58 - Tensione continua ottenuta in uscita da un circuito filtro di tipo L-C alimentandolo con un'onda rettangolare a duty cycle variabile.

La caduta di tensione sul regolatore in questo caso è:

$$25 \text{ V} - 12 \text{ V} = 13 \text{ V}$$

con carico al massimo (1 A), la potenza che L7812 dovrebbe dissipare sarebbe:

$$P = V \cdot I = 13 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 13 \text{ W}$$

Dunque, la potenza da dissipare è in questo caso addirittura più elevata di quella da fornire al carico. A tensioni di uscita più basse la situazione peggiora ulteriormente.

Gli alimentatori basati sugli stabilizzatori di tensione vanno molto bene con carichi a tensione costante. In questo caso si possono ottenere tensioni molto stabili con un "ripple" (oscillazioni residue in percentuale della tensione fornita al carico) molto contenuto.

Nei casi in cui si debbano alimentare carichi a tensione variabile, senza ricorrere a trasformatori a più uscite, ma con un solo trasformatore come quello di figura 7.40, si può ricorrere agli alimentatori di tipo "switching".

Il principio si basa ancora una volta sulla tecnica ad impulsi PWM. Prendiamo in considerazione il circuito di figura 7.58, composto da una semplice induttanza L e un condensatore C e alimentiamolo con un onda rettangolare che abbia un picco positivo di 48 V.

Se il duty cycle dell'onda è 25% avremo in uscita (sul condensatore) un segnale in tensione continua di 12 V, se il duty cycle è 50% avremo l'uscita a 24 V e con il 75% di duty cycle avremo l'u-

La regolazione di potenza o energia tramite sistema ad impulsi modulati PWM permette di costruire circuiti a ridotto consumo.

La stessa regolazione di velocità per un motorino in c.c. richiederebbe una resistenza in serie al motorino stesso che dissiperebbe in calore una notevole parte di energia.

Switching

In genere, il compito di un alimentatore è quello di trasformare una tensione di un certo tipo e valore in un'altra avente caratteristiche adeguate alla apparecchiatura da alimentare.

Un circuito classico è quello di figura 7.40, che risulta composto dal trasformatore, il ponte di diodi, il condensatore di filtro e l'elemento IC L7812 di regolazione.

In particolare, l'elemento di regolazione, che in genere è un circuito integrato di tipo serie, mantiene costante la tensione in uscita comportandosi più o meno come una resistenza variabile.

Se la tensione in ingresso è troppo alta, oppure se il carico richiede poca corrente, il regolatore aumenta la sua resistenza; se la tensione in ingresso scende, oppure se il carico richiede più corrente, la resistenza dell'IC diminuisce. La regolazione della tensione in uscita è quindi ottenuta variando la caduta di tensione ai capi dell'elemento di regolazione.

In poche parole l'IC regolatore funziona perfettamente, ma ci sono casi in cui la dissipazione di potenza è notevole.

Si pensi ad un alimentatore in grado di fornire 1 A in uscita, con una tensione regolabile da pochi volt fino a 25 V. Se per esempio usiamo tale alimentatore per far funzionare un apparecchio a 12 V siamo costretti ad usare un trasformatore (con riferimento alla fig. 7.40) 220-25 V.

scita a 36 V. In figura 7.59 abbiamo aggiunto al filtro L-C del circuito di figura 7.58 un transistor, un diodo e un circuito di controllo che invia impulsi di tipo PWM alla base del transistor.

Con il transistor in conduzione ON (circuito sopra), siamo nella fase positiva dell'onda di alimentazione; la corrente passa attraverso l'induttanza L, il condensatore C e il carico.

Con il transistor OFF (circuito sotto), siamo nella fase negativa dell'onda di alimentazione; la corrente non si spegne perché l'induttanza, grazie al suo campo magnetico e il condensatore, grazie al suo campo elettrostatico, continuano a sostenerla. Il percorso di ritorno della corrente è però diverso; il circuito si richiude attraverso il diodo D.

Il comando dello switch è affidato ad un apposito circuito (control) che verifica la tensione presente sul carico e, di conseguenza, modifica la durata dei tempi T_{on} e T_{off} .

La corrente nell'induttanza (fig. 7.60) ha quindi un andamento triangolare, con tendenza a salire nelle fasi di switch ON, e tendenza a scendere nelle fasi di switch OFF.

Chiaramente i tempi di sostenimento non possono essere troppo lunghi e la corrente attraverso il carico non tanto elevata da scaricare rapidamente l'energia residua del filtro L-C. In sostanza, dimensionando opportunamente l'induttanza L ed il condensatore C si può regolare la tensione di uscita regolando semplicemente il duty cycle della corrente che passa attraverso il transistor senza sprecare energia.

Questo sistema detto anche "step-down" permette la costruzione di alimentatori switching di dimensioni molto ridotte ed a scarso consumo.

Grazie al metodo PWM, si ottiene inoltre il vantaggio di una maggiore elasticità nella scelta della tensione in entrata. Per ottenere ad esempio una tensione di uscita di 12 V, si può usare anche un trasformatore con secondario a 50 V; provvederà il circuito di controllo ad effettuare la giusta regolazione degli impulsi, senza problemi di potenza perduta e di eccessivo riscaldamento dei vari componenti.

Esistono naturalmente diverse altre tipologie di alimentatori switching, ma la loro trattazione esula dagli obiettivi di questo testo, concepito prevalentemente per avvicinare gli autoriparatori all'elettronica applicata all'auto.

Esempio di un alimentatore switching da 1 A

Le caratteristiche di un alimentatore switching sono particolarmente vantaggiose per realizzare, ad esempio, un caricatore di batterie tipo NiCd o NiMH, che oggi sono molto usate per fotocamere digitali, videocamere, ecc. Il circuito che esamineremo adotta un IC L6902 della ST Microelectronics che, oltre alla possibilità di regolare la tensione in uscita, prevede di fissare al valore desiderato la corrente in uscita.

L'IC L6902 è disponibile in involucro SO8, dotato di 8 piedini. La tensione continua non regolata entra sul piedino 8.

Siccome la tensione di uscita è regolabile da poco più di 1,2 V fino a circa 34 V, trattandosi di un alimentatore step-down, la tensione da applicare in entrata deve essere almeno di qualche volt

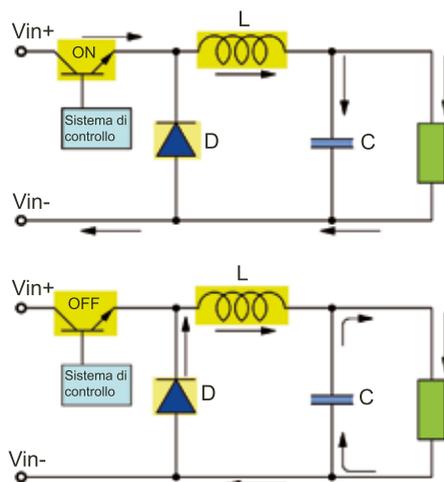


Fig. 7.59 - Regolatore di tipo "step-down"; sopra fase "switch ON", sotto fase "switch OFF".

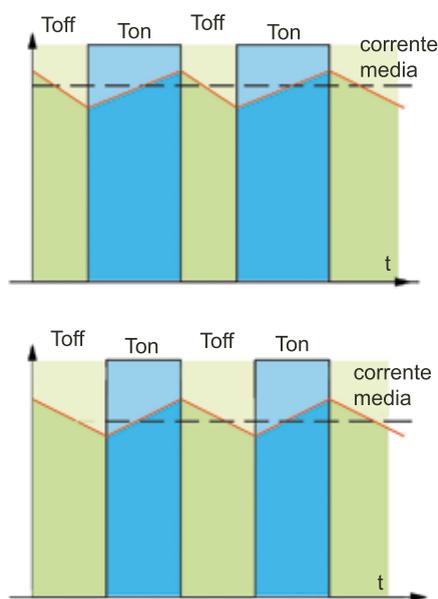


Fig. 7.60 - Andamento della corrente di ondulazione (o "ripple") e della corrente media nell'induttanza L in funzione del duty cycle dell'onda.

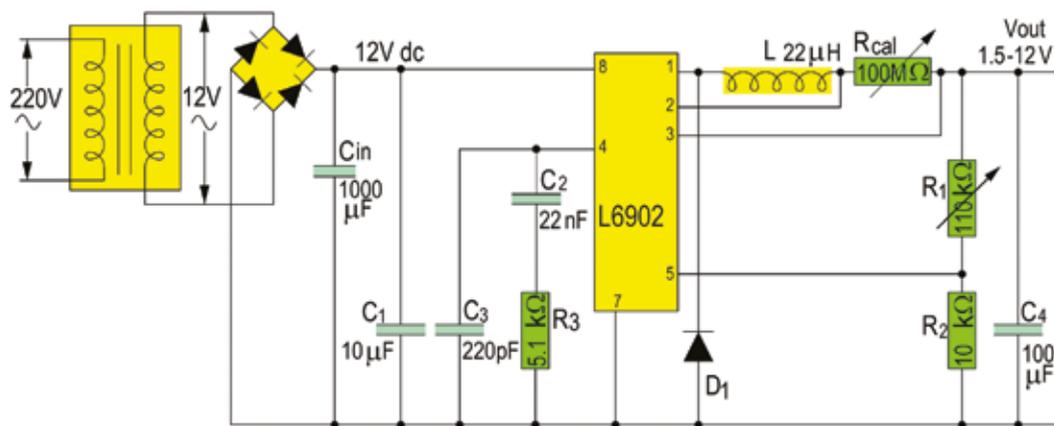


Fig. 7.61 - Schema di un alimentatore switching da 1 A basato sull'IC L6902 con ingresso a 12 V, uscita a tensione variabile da 1,5 a 12 V tramite potenziometro R_1 e corrente regolabile tramite resistenza di calibrazione R_{cal} .

superiore a quella che si prevede di ottenere in uscita. Sempre in entrata, è collegato il condensatore C_1 da 10 μF , che deve essere di tipo ceramico.

Sul pin 4 viene collegata la rete per la compensazione della frequenza, che è composta da C_3 in parallelo a $C_2 + R_3$.

L'IC L6902 ha un oscillatore interno che lavora ad una frequenza prefissata di 250 kHz. Il pin 7 va collegato a massa, mentre l'uscita, corrispondente al pin 1, viene collegata al carico attraverso l'induttanza L da 22 μH (microHenry). Il condensatore C_4 da 100 μF completa il filtro L-C in uscita. La tensione in uscita viene determinata dai valori di R_1 ed R_2 , il cui punto intermedio è collegato al pin 5 (feedback input). La formula per calcolare la tensione di uscita è:

$$V_{out} = 1,235 \cdot (1 + R_1/R_2)$$

La corrente di uscita viene determinata dal valore di R_{cal} (regolabile per fissare il valore di corrente di ricarica delle batterie).

Tramite i pin 2 e 3, l'IC L6902 legge la tensione presente ai capi della resistenza di calibratura e regola di conseguenza la corrente in uscita.

Supponendo di voler utilizzare l'alimentatore per ricaricare 2 batterie NiMH da 150 mA disposte in serie, serve una tensione di uscita di circa 4 V. Solo nel caso l'alimentatore serva per la ricarica di accumulatori NiMH serve regolare la corrente di carica al valore scritto in targa (in questo caso circa 150 mA). Per avere in uscita 4 V, basta un trasformatore da 1 ÷ 2 VA, la cui tensione sia intorno ai 12 V.

Regolando R_1 a circa 22 k Ω si otterranno circa 4 V in uscita.

Conversione AC-AC, AC-DC, DC-AC, DC-DC

- **AC-AC** - Trasformare una tensione alternata in una di valore diverso è facilissimo grazie al trasformatore di tensione (o di corrente). Questo funziona infatti solo in corrente alternata.
- **AC-DC** - Trasformare una tensione alternata in una continua è ormai una tecnica diffusa e consolidata grazie ai raddrizzatori statici a diodi (esistevano infatti anche sistemi rotanti motore-dinamo).
- **DC-AC** - La trasformazione di una tensione continua in una di valore più basso non presenta, come abbiamo visto ai paragrafi precedenti, particolari difficoltà.
- **DC-DC** - La trasformazione di una tensione continua in una di valore più elevato non è possibile, a meno che non si utilizzi uno stadio intermedio DC-AC che si basa su di un circuito che già conosciamo: l'oscillatore.

La figura 7.62 è un esempio semplificato di questa soluzione offerta dall'oscillatore e dal trasformatore. La frequenza di oscillazione deve essere obbligatoriamente 50 Hz e la tensione di uscita 220 V se la conversione DC-AC serve per l'alimentazione di apparecchiature funzionanti con la normale rete domestica. Un settore in forte espansione e che impiega sempre più il convertitore DC-AC è quello della generazione di tensione tramite pannelli solari fotovoltaici. I pannelli vengo-

no applicati anche a veicoli ricreazionali quali camper e roulotte e, proprio su questi, si possono trovare già oggi molte applicazioni del convertitore DC-AC. Tale applicazione trova spazio inoltre in molti veicoli ibridi, sui quali è necessario convertire diversi valori delle tensioni di alimentazione. Un'altra applicazione ormai diffusissima di tale circuito la si ritrova nei gruppi di continuità (UPS) di alimentazione per banche, uffici, ecc. per sopperire alle interruzioni di alimentazione dalla rete (dannose per la perdita di dati informatici). L'aggiunta al circuito di figura 7.62 di un gruppo di raddrizzamento AC-DC a ponte di Graetz e di un alimentatore stabilizzatore ci permette di ottenere tensioni in DC anche più elevate di quelle in partenza, come si può osservare in figura 7.63.

In questo circuito l'oscillatore è a 25 kHz perché una frequenza più elevata, pur permettendo ancora l'utilizzo di un trasformatore normale, permette un miglior sfruttamento del circuito di carica ed accumulo nel condensatore dopo il ponte. Tale frequenza non rientra inoltre nel campo delle frequenze udibili evitando sibili che a volte i circuiti o i cavi possono emettere. Circuiti di questo tipo sono utilizzati per l'alimentazione delle lampade stroboscopiche; questo tipo di lampadina richiede alimentazioni con scariche elettriche anche superiori a 250 V.

Le nuove lampade dei fari allo Xenon richiedono alimentazioni con innesco a scarica elettrica e tensioni di alimentazione anche di 85 V.

Alcune funzioni con l'IC A.O.

Alcune delle funzioni che si possono ottenere con l'utilizzo di un IC A.O. come l'amplificatore invertente, l'amplificatore non invertente, il buffer (o inseguitore), l'integratore o il comparatore sono già state oggetto di studio ai paragrafi precedenti.

L'IC A.O. è utilizzabile anche come oscillatore, amplificatore logaritmico, amplificatore logaritmico invertente, amplificatore differenziale, comparatore a finestra, sommatore, sommatore invertente, derivatore e come raddrizzatore a semionda o ad onda intera. L'amplificatore operazionale si presta dunque ad eseguire somme, sottrazioni, moltiplicazioni e altre operazioni matematiche su segnali analogici.

Con gli IC A.O. si possono anche ottenere circuiti logici con i quali eseguire operazioni matematiche in tecnica binaria. I calcolatori utilizzano per le operazioni matematiche altri circuiti elettronici integrati più adatti a questo scopo.

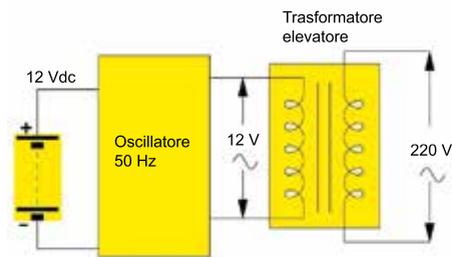


Fig. 7.62 - Gruppo di conversione DC-AC a 220 V 50 Hz.

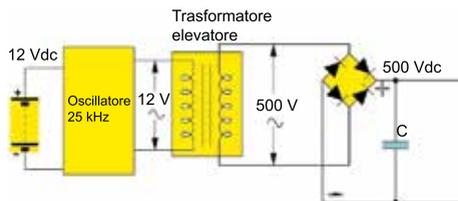


Fig. 7.63 - Gruppo di conversione DC-DC; 12/500 V.

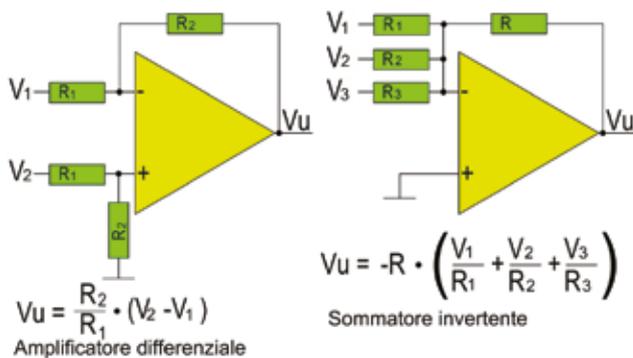


Fig. 7.64 - IC A.O. utilizzato come amplificatore differenziale e come sommatore dei segnali in ingresso.

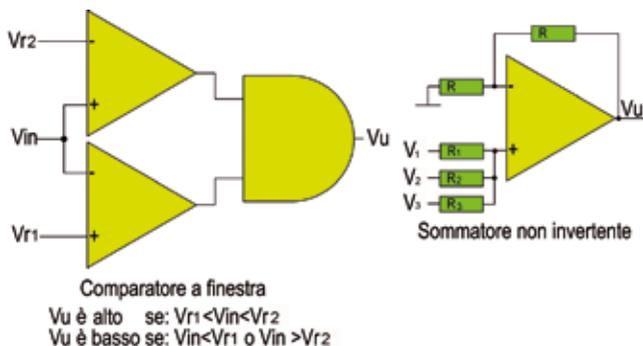


Fig. 7.65 - IC A.O. utilizzato come comparatore a finestra e come sommatore non invertente dei segnali in ingresso.

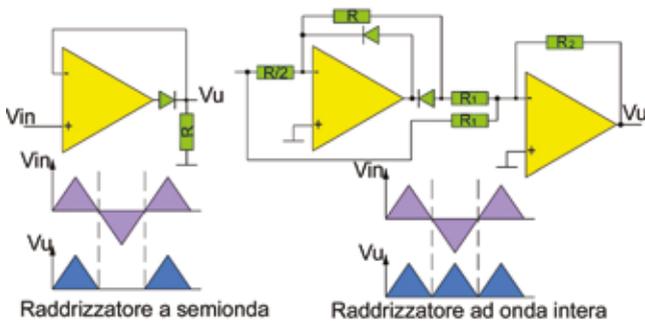


Fig. 7.66 - IC A.O. utilizzato come raddrizzatore a semionda ed a onda intera di un segnale alternato triangolare.

un componente digitale con un altro sono:

- le tensioni di alimentazione;
- le correnti assorbite in ingresso e fornite in uscita;
- i livelli logici di commutazione;
- i tempi di commutazione.

Questi requisiti vengono soddisfatti, diciamo più o meno, per famiglie. Le più importanti sono:

- Standard TTL (*Transistor-Transistor-Logic*);
- Schottky TTL;
- Low Power Schottky TTL;
- ECL (*Emitter Coupled Logic*);
- IJL (*Integrated Injection Logic*);
- Logica CMOS.

Alimentazioni dei circuiti logici

Nella stragrande maggioranza dei casi la tensione d'alimentazione è uguale a 5 V, 15 V o 3,3 V. All'inizio non c'erano livelli di tensione compatibili e ogni casa utilizzava un suo standard. In seguito, tra tutte le varie famiglie logiche si è affermata la famiglia logica TTL che usava un'alimentazione di 5 V, quindi i nuovi componenti sono stati resi compatibili con questo tipo di logica. I 15 V nominali sono invece l'alimentazione tipica per la famiglia CMOS serie 4000, ICD nati per esigenze spaziali, per circuiti da montare su satelliti.

Questi sono integrati ancora prodotti in quanto sono gli unici a essere omologati per l'uso spaziale.

Tuttavia le nuove famiglie di transistor CMOS funzionano con una tensione di alimentazione di 5 V. Il 3,3 V è una tensione nuova utilizzata a partire dal 1992 per i circuiti del tipo Low Voltage CMOS; viene utilizzata per minimizzare la potenza e il consumo. Il valore di gran lunga più diffuso rimane comunque il 5 V nominali.

Logiche digitali

Prima di affrontare i circuiti logici prendiamo in considerazione su quali principi si basa il calcolo con i circuiti digitali. George Boole, nel 1854, dimostrò che la maggior parte del pensiero logico, privato di particolari irrilevanti e verbosità, può essere concepito come una serie di scelte. Questa idea è alla base del modo di lavorare delle logiche matematiche sulle quali sono basati i computer. Presupposto: qualsiasi processo logico può essere ricondotto a una sequenza di eventi elementari, che nell'insieme prende il nome di algoritmo.

Tale sequenza può essere rappresentata con un diagramma di flusso (*Flow chart*, vedi fig. 7.67), il quale a sua volta è facilmente traducibile in un particolare programma comprensibile dall'elaboratore.

Per visualizzare un problema con un diagramma di flusso, si utilizzano vari simboli grafici standard:

- il rombo per indicare controlli decisionali;
- il rettangolo per indicare operazioni da effettuare.

Immaginiamo, per esempio, di voler tradurre in un diagramma di flusso le seguenti affermazioni:

- "il tergi-fari si muove se sono accesi i fari e se è acceso il motore";
- "il tergi-fari si muove se sono accesi i fari o se è acceso il motore".

Circuiti integrati digitali

La tecnica digitale utilizza una serie di circuiti di base e i loro derivati. La gamma dei circuiti integrati digitali comprende la piccola scala di integrazione (le porte), la media scala di integrazione (combinatori, flip-flop, ecc.) e la larga scala di integrazione (memorie, microprocessori, microcontrollori, ecc.). I componenti digitali possono essere raggruppati in un sistema solo se hanno caratteristiche compatibili. Le caratteristiche che incidono sulla possibilità di accoppiare

Si può affermare che le due decisioni sono distinte: la prima (diagramma a sinistra), comporta il verificarsi di due condizioni (evidenziate in verde); la seconda (diagramma a destra), comporta il verificarsi di almeno una fra le due condizioni.

È importante rendersi conto che, come vedremo, l'elaboratore non "comprende" il significato delle frasi "fari accesi, motore acceso": si limita a considerare il valore di certe costanti associate ad ogni singolo evento. Come secondo passo, si tratta di convertire un diagramma di flusso in un linguaggio numerico, il solo comprensibile dal computer. Ciò si ottiene con i cosiddetti operatori logici elementari. Ci limiteremo, per semplicità, ai tre elementi di base.

Con le istruzioni riportate nella tabella 7.3, possiamo tradurre i due differenti diagrammi di flusso in due sequenze di istruzioni. Per far questo, è necessario aggiungere un nuovo simbolo grafico (un parallelogramma) di inizio ai nostri diagrammi di flusso.

Questo simbolo implica che il calcolatore si attende che gli vengano forniti i dati del circuito elettrico dell'auto; i valori di A e B (che possono essere 0 o 1).

Appena letti questi valori (per es. A = 1 e B = 1), l'elaboratore esegue il programma tenendo conto dei valori di inizializzazione (C = 1 "si muove"; C = 0 "non si muove").

A = 1 corrisponde all'evento "fari accesi"

B = 1 corrisponde all'evento "motore acceso"

C = 1 corrisponde all'azione "si muove"

A = 0 corrisponde all'evento "fari non accesi"

B = 0 corrisponde all'evento "motore non acceso"

C = 0 corrisponde all'azione "non si muove"

Con queste condizioni, il primo diagramma di flusso risulta così formalizzato:

IF A AND B THEN C SE A E B ALLORA C

Le istruzioni AND e OR, dette operatori logici, sono prese dall'algebra di Boole e forniscono il risultato 1 o 0, a seconda del valore delle variabili A e B.

Ad esempio, se entrambe le variabili A e B valgono 1, allora l'operatore AND assumerà il valore 1. In questo caso, il simbolismo, tradotto in parole, corrisponde a:

- SE fari accesi E motore acceso ALLORA muove.

Viceversa, se una sola delle due variabili, oppure entrambe valgono 0, allora l'operatore AND assumerà il valore 0. In questo caso, il simbolismo, tradotto in parole, corrisponde a:

- SE fari non accesi E motore acceso ALLORA non muove;
- SE fari accesi E motore non acceso ALLORA non muove;
- SE fari non accesi E motore non acceso ALLORA non muove.

I valori delle variabili A e B sono introdotti dal circuito elet-

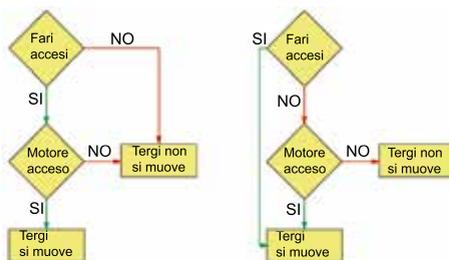


Fig. 7.67 - Diagrammi di flusso (Flow chart): a sinistra; se si verificano entrambe le condizioni; a destra; se si verificano almeno una delle due condizioni.

Operazione	Istruzione	Porta logica
Controllo	IF (se.....)	
Azione	THEN (allora....)	
Congiunzione	AND (... e ...)	AND
Separazione	OR (...oppure...)	OR
Negazione	NOT (negazione)	NOT

Tab. 7.3 - Istruzioni.

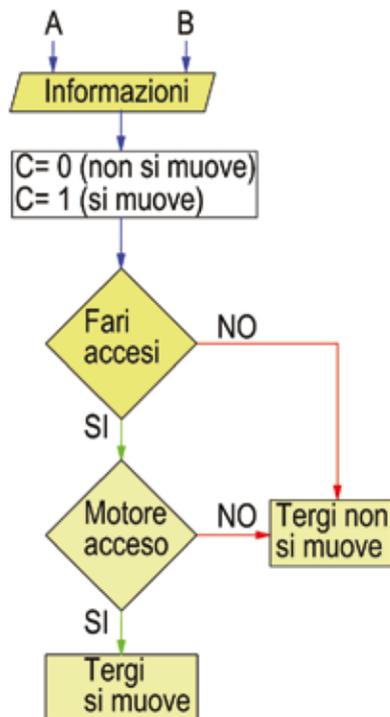


Fig. 7.68 - Diagramma di flusso: il tergi-fari parte se si verificano entrambe le condizioni.

A e B sono le informazioni sullo stato dei fari e del motore, C è lo stato del comando di uscita per l'azionamento del tergi-fari.

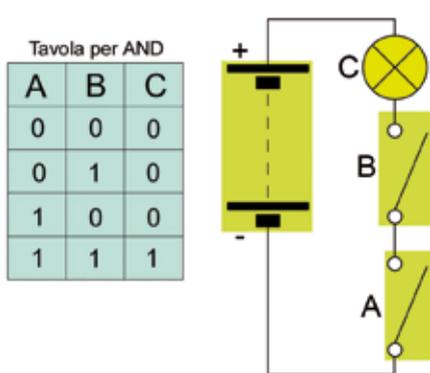


Fig. 7.69 - Schema elettrico di circuito corrispondente all'operatore AND.

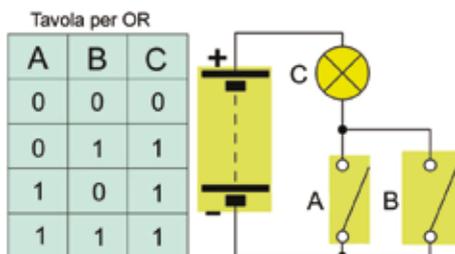


Fig. 7.70 - Schema elettrico di circuito corrispondente all'operatore logico OR.

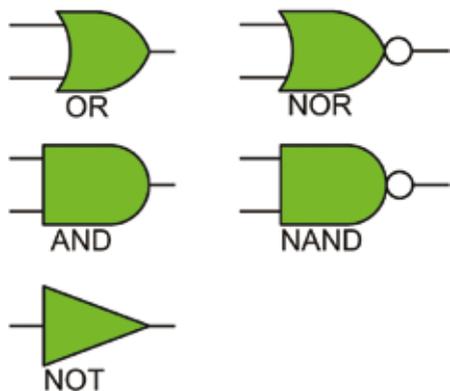


Fig. 7.71 - Simboli degli operatori logici.

costruire un operatore (in questo caso un XOR) utilizzandone altri di funzione diversa (NOT, AND e OR). Il blocco XOR rende l'uscita allo stato alto solo se gli ingressi sono a stati diversi, come mostra la tabella di verità in figura 7.74. Alcuni operatori possono avere anche molti ingressi e quindi compiere tanti confronti in contemporanea. I vari operatori logici che si possono ottenere dalle combinazioni di più porte esulano dal nostro studio. Ci occuperemo invece di come sia possibile trasformare informazioni anche non direttamente matematiche, come quelle dei circuiti elettrici, in funzioni digitali in formato binario (solo 0 e 1).

Numerazione decimale e binaria

La numerazione in base decimale (10 cifre, 10 dita) deriva probabilmente dal fatto che l'uomo ha utilizzato le dita delle mani per contare. I Galli contavano anche utilizzando le dita dei piedi

trico attraverso sensori (o anche semplici interruttori) e digitalizzati prima di "raggiungere" l'operatore AND. Così, se entrambe le variabili A e B valgono 1, quando saranno esaminate dall'operatore AND seguirà necessariamente il risultato $C = 1$.

Allo stesso modo, il secondo diagramma di flusso risulta così formalizzato:

IF A OR B THEN C SE A O B ALLORA C

In questo caso, se almeno una delle variabili A e B vale 1, allora l'operatore OR assumerà il valore 1; viceversa, se entrambe valgono 0, allora l'operatore OR assumerà il valore 0. Dunque, se almeno una delle variabili A e B vale 1, quando saranno esaminate dall'operatore OR seguirà necessariamente il risultato $C = 1$.

Per esempio, osservando il circuito elettrico di figura 7.69, è facile capire che la lampadina si accende solo se entrambi gli interruttori A e B sono chiusi in modo da chiudere il contatto elettrico. Questo circuito, corrisponde ad un porta logica AND. Per riassumere il comportamento di una operatore logico, si ricorre alle cosiddette tavole di verità. Per la porta AND, la tavola è in tabella a sinistra del circuito in figura 7.69. Si osservi, per esempio, che quando $A=1$ e $B=1$ (entrambi gli interruttori chiusi), allora la lampadina (indicata con C) è accesa e quindi $C=1$.

Ora, come secondo esempio, esaminiamo il circuito di figura 7.70; in questo caso, è facile riconoscere che la lampadina si accende solo se almeno uno degli interruttori A e B viene chiuso. Questo circuito, corrisponde all'operatore logico OR.

In figura 7.70, è riportata la corrispondente tavola di verità. In figura 7.71 sono rappresentati alcuni simboli dei più diffusi operatori logici.

La figura 7.72 mostra l'operatore NOR ottenuto con un circuito elettrico a relè e contatti. Sempre nella stessa figura è rappresentata la tavola della verità per tale operatore. In figura 7.73 abbiamo invece un operatore NAND ottenuto con relè e contatti e la corrispondente tavola della verità. Come si potrà osservare, l'uscita sarà bassa (lampada spenta) solo se entrambi gli ingressi saranno alti (contatti chiusi).

Combinando i vari operatori logici se ne possono ottenere altri a funzioni più complesse; la cosa più importante è la tabella di verità di ciascun operatore.

La figura 7.74 serve a dimostrare come si possa costruire un operatore (in questo caso un XOR) utilizzandone altri di funzione diversa (NOT, AND e OR). Il blocco XOR rende l'uscita allo stato alto solo se gli ingressi sono a stati diversi, come mostra la tabella di verità in figura 7.74. Alcuni operatori possono avere anche molti ingressi e quindi compiere tanti confronti in contemporanea. I vari operatori logici che si possono ottenere dalle combinazioni di più porte esulano dal nostro studio. Ci occuperemo invece di come sia possibile trasformare informazioni anche non direttamente matematiche, come quelle dei circuiti elettrici, in funzioni digitali in formato binario (solo 0 e 1).

(in base 20). Ancora oggi in francese ottanta si dice quatre-vingt (4 volte 20). Se avessimo solo un dito forse impareremmo a contare in forma binaria. La numerazione binaria può essere trasformata in decimale inserendo il numero in una riga della tabella 7.4 ed eseguendo le seguenti operazioni (ricordando che qualsiasi numero elevato alla 0 è 1).

2 elevato a	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
13								1	1	0	1
185				1	0	1	1	1	0	0	1
1015		1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
1248	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0

Tab. 7.4 - Trasformazione della numerazione binaria in decimale.

Elevare il 2 alla potenza indicata sopra ciascun numero binario nella stessa colonna; sommare il risultato con i risultati delle colonne a fianco. Per esempio, il numero 13 decimale è dato dalla somma di:

$$1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 8 + 4 + 0 + 1 = 13$$

Il numero 185 decimale, invece, è dato dalla somma di:

$$1 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 128 + 0 + 32 + 16 + 8 + 0 + 0 + 1 = 185$$

Con il procedimento inverso sarà possibile passare da un numero decimale al corrispondente numero binario.

Altro esempio. Se conosciamo il numero 185 e vogliamo ricavare il numero binario corrispondente, dobbiamo trovare qual è il massimo numero (potenza del 2) che può essere compreso nel numero decimale; 2^7 o 2^8 ? Essendo $2^7 = 128$ e $2^8 = 256$ sarà sicuramente 2^7 ; scriveremo allora 1 nella colonna con il 7 in alto. A questo punto eseguiremo la sottrazione $185 - 128 = 57$

Essendo $2^6 = 64$ maggiore di 57, scriveremo 0 nella colonna con il 6 in alto.

Essendo $2^5 = 32$, scriveremo 1 nella colonna con il 5 in alto; il resto è 25 ($57 - 32 = 25$).

Essendo $2^4 = 16$, scriveremo 1 nella colonna con il 4 in alto; il resto è 9 ($25 - 16 = 9$).

Essendo $2^3 = 8$, scriveremo 1 nella colonna con il 3 in alto; il resto è 1 ($9 - 8 = 1$).

Essendo $2^2 = 4$, scriveremo 0 nella colonna con il 2 in alto (perché 4 è maggiore di 1).

Essendo $2^1 = 2$, scriveremo 0 nella colonna con l'1 in alto (perché 2 è maggiore di 1).

Essendo $2^0 = 1$, scriveremo 1 nella colonna con lo 0 in alto.

Un altro modo semplice per trasformare un numero decimale in numero binario è quello di dividere il numero per 2 finché non si abbia quoziente 0 e resto 1.

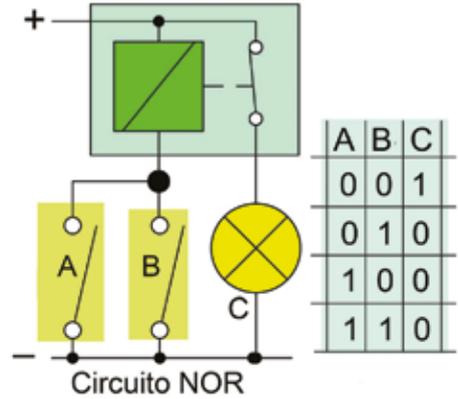


Fig. 7.72 - Circuito elettrico corrispondente all'operatore logico NOR.

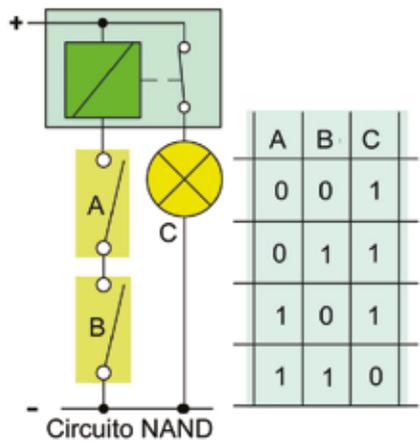


Fig. 7.73 - Circuito elettrico corrispondente all'operatore logico NAND.

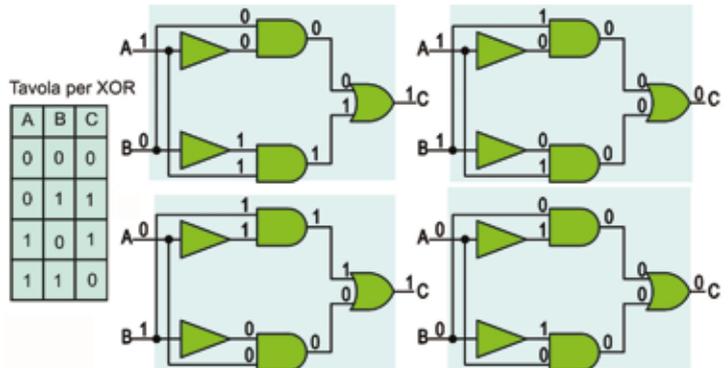


Fig. 7.74 - Costruzione di un operatore logico XOR con due NOT, due AND e una OR.

Per esempio, trasformiamo il numero 52 decimale in numero binario:

52 : 2 = 26 avanzo 0

26 : 2 = 13 avanzo 0

13 : 2 = 6 avanzo 1

6 : 2 = 3 avanzo 0

3 : 2 = 1 avanzo 1

1 : 2 = 0 avanzo 1

Il numero corrispondente sarà dunque: 110100

Rappresentazione esadecimale

Il sistema numerico esadecimale (spesso abbreviato come esa o hex) è un sistema numerico in base 16, cioè che utilizza 16 simboli invece dei 10 del sistema numerico decimale tradizionale. Per l'esadecimale si usano in genere simboli da 0 a 9 per le prime dieci cifre, e poi le lettere da A a F per le successive sei cifre, per un totale di 16 simboli.

Nella tabella 7.5 è mostrato un confronto tra le rappresentazioni esadecimali, decimali e binarie dei numeri fino a 15.

Per esempio, il numero decimale 79, la cui rappresentazione binaria è 1001111, può essere scritto come 4F in esadecimale. Il sistema esadecimale è molto usato in informatica per la sua relazione diretta tra una cifra esadecimale e quattro cifre binarie. È spesso usato come intermedio, oppure come sistema numerico a sé stante.

Ci sono numerosi modi, usati in differenti linguaggi di programmazione, per indicare che un numero è scritto nel sistema esadecimale:

- il C e i linguaggi con una sintassi simile (come il Java) usano il prefisso '0x', per esempio "0x5A3". Lo zero iniziale è presente perché i numeri devono iniziare con un carattere numerico, e la 'x' significa esadecimale;
- il Pascal e alcuni Assembly indicano l'esadecimale con il suffisso 'h' (se il numero inizia con una lettera, si usa anche il prefisso '0'), per esempio "05A3h";
- altri Assembly (AT&T, Motorola) e alcune versioni di BASIC usano il prefisso '\$', per esempio "\$5A3";
- altre versioni del BASIC usano il prefisso "&h", per esempio "&h5A3";
- quando usano sistemi di numerazione diversi dalla base dieci, o numerali in basi multiple, i matematici scrivono la base come pedice del numero, per esempio "5A316" oppure "5A3SEDICI".

Il numero esadecimale "5A316" corrisponde al decimale 1443.

Non esiste un simbolo standard e perciò tutte le convenzioni elencate sopra sono utilizzate. A volte lo stesso articolo può contenere due convenzioni diverse. Un metodo per convertire un numero esadecimale in decimale è quello di moltiplicare le sue cifre per le potenze della base 16. Ad esempio 5F in esadecimale vale 95 in decimale.

$$5 \cdot 16^1 + F \cdot 16^0 = 5 \cdot 16 + 15 \cdot 1 = 95$$

(si ricorda che $16^0 = 1$).

Le calcolatrici scientifiche hanno la funzione di conversione da numero decimale in esadecimale e viceversa (o in binario e viceversa). Anche la calcolatrice di Windows esegue queste funzioni. Ad esempio 3B9ACA00 in esadecimale vale 1.000.000.000 (un miliardo) in decimale.

Digitalizzazione di grandezze

Esiste un modo di rappresentare le grandezze che consiste nel confrontare la grandezza che si vuol misurare con una serie di valori campione, per stabilire quali e quanti di tali campioni approssimano più da vicino il valore della grandezza da misurare. Un esempio banale di questa tecnica di misurazione può essere fornito dalla classica bilancia a pesi campione.

Su di un piatto si appoggia la quantità da pesare, sull'altro piatto si dispongono i vari pesi, da quelli grandi a quelli più piccoli, che occorrono per raggiungere l'equilibrio fra i due piatti. La somma di tali pesi darà il valore del peso cercato. Questo metodo di misura è detto "digitale", dalla parola inglese "digit" che significa "dito" o "cifra".

Misurando una grandezza con la tecnica digitale, il risultato è rappresentato tramite riferimento ad un numero limitato di simboli di valore prestabilito e può pertanto essere soltanto uno dei valori ottenibili dalla combinazione dei valori utilizzati.

Per la bilancia con pesi, la pesata risulta tanto più accurata quanto maggiore è la disponibilità di pesi di basso valore. La bilancia dell'orefice dispone anche di piccoli pesi da 1 mg o ancora meno. Misurare una tensione con tecnica digitale significa confrontare tale tensione con una serie di tensioni campione, e decidere quali di queste tensioni campione occorre sommare per eguagliare la tensione in misura.

Poiché il funzionamento dei circuiti elettronici di conteggio è basato sulla tecnica binaria (ovvero utilizza un sistema numerico a base 2) i valori di tensione che si usano come riferimento corrispondono alle potenze di 2; tanto per fare un esempio, i valori di riferimento potrebbero essere rappresentati dalle seguenti tensioni (esprese in millivolt):

8 - 16 - 32 - 64 - 128 - 256 - 512 - 1024 - 2048

Supponiamo che il nostro tester digitale usi questi valori di riferimento e che si voglia misurare una tensione V_x il cui valore sia di 1,435 V.

Il circuito logico del tester procederà al confronto della tensione incognita (V_x) col valore più alto tra quelli di cui dispone:

- il valore più alto è 2048; poiché tale valore è maggiore di V_x , esso viene scartato;
- viene poi considerato il valore 1024; esso è minore di V_x e quindi vi è compreso, per cui viene inserito tra i valori che faranno parte della somma finale;
- viene quindi analizzato il terzo valore, 512: se si aggiunge questo valore al precedente, si ottiene 1536, e quindi si supera il valore di V_x ; per tale motivo, il valore 512 viene scartato;
- il valore 256 viene inserito nella somma, poiché con esso si arriva a 1280;
- il valore 128 viene inserito nella somma, arrivando a un totale di 1408;
- il valore 64 viene scartato perché sommato ai precedenti darebbe un totale superiore a 1435;
- il valore 32 viene scartato perché sommato ai precedenti darebbe un totale superiore a 1435;
- il valore 16 viene inserito nella somma poiché con esso si arriva a 1424;
- il valore 8 viene inserito nella somma poiché con esso si arriva a 1432.

Sommando a questo punto tutti i valori che non sono stati scartati, si ottiene 1432 (1,432 V), contro un valore reale della tensione V_x che era di 1435 mV. L'errore commesso nel passare dal valore reale a quel-

Basi numeriche					
esadecimale	decimale	binario			
0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1
2	2	0	0	1	0
3	3	0	0	1	1
4	4	0	1	0	0
5	5	0	1	0	1
6	6	0	1	1	0
7	7	0	1	1	1
8	8	1	0	0	0
9	9	1	0	0	1
A	10	1	0	1	0
B	11	1	0	1	1
C	12	1	1	0	0
D	13	1	1	0	1
E	14	1	1	1	0
F	15	1	1	1	1

Tab. 7.5 - Equivalenze tra numeri esadecimali, decimali e binari.



Fig. 7.75 - Per pesare con la bilancia si utilizzano dei pesi campione che si confrontano con l'oggetto da pesare finché la bilancia sta in equilibrio.

lo digitale viene chiamato errore di quantizzazione, e dipende, come vedremo, dal numero dei valori di riferimento utilizzati.

Con la stessa tecnica si possono digitalizzare segnali musicali, ottici, termici, ecc.

L'esempio appena descritto si basa su 9 valori di riferimento, dal più piccolo, di 8 mV, al più grande, di 2048 mV: si può anche dire che tale misura utilizza 9 bit.

A ogni bit è associato uno dei valori di riferimento:

- il bit associato al valore 2048 viene detto "bit più significativo" o, in inglese, MSB (*Most Significant Bit*);
- il bit associato al valore 8 viene detto "bit meno significativo" o LSB (*Least Significant Bit*).

Analogamente a quanto avviene per la bilancia usando uno scarso numero di bit, vengono a mancare i pesi più piccoli, per cui la misura risulta meno accurata, ovvero è caratterizzata da una minore risoluzione. È evidente che per ottenere una maggiore precisione occorre utilizzare un maggior numero di bit.

Nella tecnica di misura utilizzata si possono individuare due grandezze:

- la prima è il valore massimo misurabile, che corrisponde alla somma di tutti i valori di riferimento;
- la seconda è il valore più piccolo che siamo in grado di distinguere, e che corrisponde al valore del bit di peso minore.

Nel caso illustrato, il valore massimo è dato da $8 + 16 + 32 + 64 + 128 + 256 + 512 + 1024 + 2048$; vale quindi 4088. Il valore più piccolo è quello associato al bit meno significativo, e quindi 8. Il rapporto che intercorre tra il valore massimo rappresentabile e il valore più piccolo che si riesce a distinguere esprime la "dinamica della conversione" e si misura in dB (decibel).

La dinamica dipende unicamente dal numero di bit utilizzati nella conversione, e non dai valori associati ai singoli bit. Usando 9 bit, come nell'esempio visto, si ottiene una dinamica di circa 54 dB. Per esempio, per la riproduzione musicale di sufficiente qualità, occorre che la digitalizzazione della musica registrata sui CD sia basata su 16 bit, raggiungendo una dinamica superiore a 96 dB. Molti dispositivi oggi funzionano a 32 bit.

Circuiti di memoria

Per memoria si intende un dispositivo in grado di mantenere uno stato acquisito fino alla cancellazione (Reset).

Le memorie elettriche si possono ottenere anche con semplici relè. In figura 7.76 abbiamo un esempio di come un relè dotato di contatto di autoaggancio possa considerarsi una vera e propria memoria. Premendo il pulsante **H** si eccita il relè che chiude i contatti. Il contatto di autoaggancio è alimentato a massa tramite il pulsante di Reset chiuso a riposo.

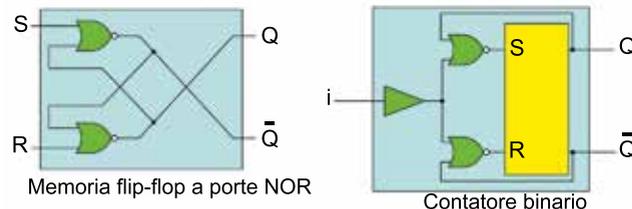
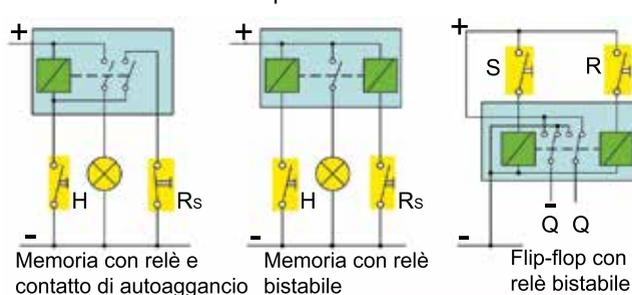


Fig. 7.76 - Circuiti di memoria costituiti da relè. Memoria elettronica "flip-flop" con due porte NOR e circuito contatore binario ottenuto con una porta NOT, due porte NOR e un flip-flop.

La massa passa attraverso **Rs** ed il contatto di autoaggancio mantiene alimentato in modo permanente con il negativo la bobina del relè. Il relè rimane eccitato e la lampadina sempre accesa.

Ripremendo **H** il relè non cambia di stato. Per cancellare la memoria occorre premere il pulsante **Rs** che interrompe il negativo alla bobina del relè. È un circuito semplice, ma ha il difetto di rimanere alimentato; il relè deve sopportare in continuazione l'alimentazione.

Esaminiamo ora il circuito con il relè bistabile disegnato al centro della figura 7.76.

Un relè bistabile è costruito con due bobine che agiscono sullo stesso contatto, oppure con una bobina a due

avvolgimenti contrari. Premendo il pulsante **H** la bobina di sinistra si eccita e chiude il contatto del relè che rimane stabile in questa posizione anche dopo aver rilasciato il pulsante (bobina diseccitata). Ripremendo **H** il relè non cambia di stato.

Per cancellare la memoria basta premere il pulsante **Rs** e alimentare la bobina di destra che sposta il contatto verso destra aprendolo.

La memoria si cancella, la lampada si spegne e la bobina di destra non ha più bisogno di alimentazione perché il contatto rimane in questa posizione (da qui il nome bistabile del relè).

Il circuito a destra della figura 7.76 vuole dimostrare come, con un relè bistabile con contatti collegati ad invertitore, si possa ottenere un operatore logico molto utilizzato in elettronica: il flip-flop.

I due ingressi sono detti:

- Set (S) = attivazione;
- Reset (R) = disattivazione.

Le due uscite del dispositivo possono assumere soltanto stati complementari, cioè Q è lo stato negato di \bar{Q} . Per questo motivo è sufficiente fornire l'indicazione dello stato presente su un'uscita, normalmente Q , per sapere di conseguenza quello dell'altra uscita.

Il funzionamento tipico di questo blocco logico sequenziale è il seguente.

A) Operando su S , il blocco si attiva e rimane attivato, qualsiasi stato assume S successivamente. Ciò significa:

- che a dispositivo attivato, il comando di Set è inoperante;
- che il dispositivo conserva, conseguentemente, memoria del comando di set precedente.

B) Operando su R , il blocco si disattiva e rimane disattivato qualsiasi stato assume R successivamente. Ciò significa:

- che a dispositivo disattivato, il comando di Reset è inoperante;
- che il dispositivo conserva, conseguentemente, memoria del comando di Reset precedente.

Il blocco logico analizzato è dunque un elemento di memoria ad un bit che consuma solo durante i transistori di comando e non consuma a riposo.

Si possono ottenere memorie anche con transistor BJT, I A.O., MOSFET o CMOS.

Una memoria a BJT consumerà in stato di riposo, mentre una a CMOS non consuma potenza statica (in stato di riposo), come abbiamo visto anche per il bistabile. In figura 7.77 è rappresentato, in modo semplificato a scopo didattico, un semplice circuito di memoria attivabile da **H** e cancellabile da **Rs** con impulsi positivi (stati logici 1). L'impulso positivo in **H** manda in conduzione il transistor T_1 (on) che diventa negativo sul collettore. Il transistor T_2 passa in conduzione (on) ed accende il LED. Il diodo riporta una tensione positiva sulla base di T_1 che lo mantiene in conduzione anche dopo la sparizione dell'impulso. L'impulso positivo (stato 1) in R_s disattiva il T_2 , spegne il LED e manda T_1 in stato off. Tutti i circuiti di memoria presi in considerazione finora si cancellano alla sparizione dell'alimentazione.

Circuito flip-flop

In figura 7.76 è rappresentato un circuito flip-flop ottenuto con due porte NOR. Questo circuito si comporta come un relè bistabile collegato con un invertitore e due pulsanti (vedi fig. 7.76). Il flip-flop è da considerarsi come una memoria elettronica.

Contatore binario

Un altro circuito importantissimo per le operazioni digitali è il contatore binario. In figura 7.76 è rappresentato come si possa ottenere un dispositivo di questo tipo. Il circuito si posiziona alto in uscita

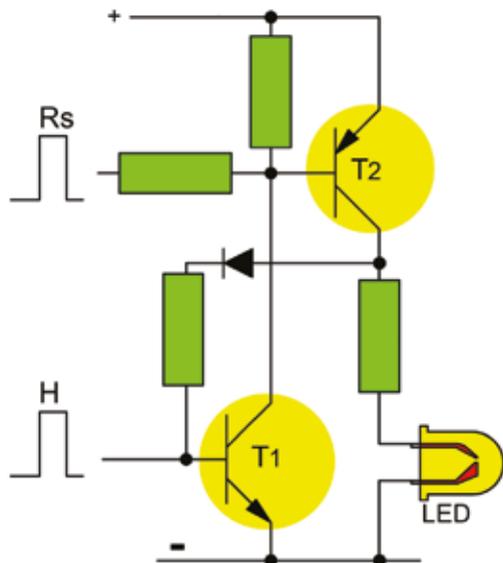


Fig. 7.77 - Circuito di memoria costituito da transistor (lo schema è semplificato a puro scopo didattico).

(Q) ogni due impulsi alti in ingresso e permette di dividere quindi per due. Un numero (rappresentato da una successione binaria di 0 e 1) che si presenta all'ingresso di questo circuito verrà suddiviso per due e in uscita avremo un numero corrispondente alla metà di quello in ingresso.

Memorie fisiche

Una memoria è un insieme strutturato costituito da elementi in grado di conservare un'informazione; nel nostro caso si tratta di informazioni memorizzate in forma elettrica o elettronica. Vediamo alcuni criteri di classificazione delle memorie.

Classificazione delle memorie elettroniche

In base al supporto:

- elettroniche: flip-flop, condensatori;
- magnetiche: dischi magnetici, nastri, card;
- ottiche: compact disc, dischi ottici.

In base alla volatilità (rispetto alla tensione di alimentazione):

- volatili: perdono il contenuto quando manca l'alimentazione;
- non volatili: mantengono il contenuto in assenza di alimentazione.

In base all'organizzazione dei dati:

- ad accesso seriale (o sequenziale), con tempo di accesso al dato dipendente dalla sua posizione all'interno della memoria;
- ad accesso casuale (o random), con tempo di accesso al dato indipendente dalla sua posizione.

Tempo di accesso

È il tempo necessario per reperire un'informazione; nel caso di accesso casuale tutte le informazioni vengono reperite nello stesso tempo indipendentemente dalla posizione fisica in cui esse sono allocate, mentre nel caso di accesso seriale il tempo di accesso dipende da dove l'informazione è allocata.

Memorie elettroniche ad accesso casuale

Volatili:

- RAM Statiche (SRAM); sono basate su flip-flop;
- RAM Dinamiche (DRAM); sono basate sulla carica di un condensatore.

Non volatili:

- ROM sono anche dette ROM a maschera; l'informazione contenuta non può essere modificata;
- PROM (*Programmable ROM*): il contenuto può essere scritto una sola volta;
- EPROM (*Erasable Programmable ROM*): sono cancellabili tramite luce ultravioletta;
- E²PROM (*Electrically Erasable Programmable ROM*): sono cancellabili elettricamente.

Le RAM (*Random Access Memory*) sono memorie per le quali il tempo necessario per scrivere e per leggere è identico.

Le ROM (*Read Only Memory*) sono memorie che consentono solo un tempo di lettura breve.

Durata delle memorie non volatili

Tralasciando i CD, i CDRW e le ROM, per tutte le altre memorie esiste un limite di durata oltre il quale perdono la sicurezza dei dati memorizzati.

I problemi che affliggono EPROM e E²PROM sono essenzialmente due:

- la ritenzione dei dati che garantisce la correttezza dell'informazione per circa 10 anni.
- il numero di cicli di cancellazione e di riprogrammazione che la EPROM può subire. Le prime EPROM potevano sopportare solo un centinaio di cicli di cancellazione e riprogrammazione, mentre con le attuali memorie il limite è arrivato fino a 10000 cicli.

Il transistor usato nelle E²PROM è molto più complesso di quello utilizzato nelle EPROM e quindi il suo costo è superiore. Al fine di ridurre i costi e lo spazio utilizzato nel chip di silicio, sono nate le memorie FLASH-EPROM basate su transistor più semplici che non permettono la riprogrammazione di una singola cella di memoria.

Le FLASH-EPROM si possono considerare delle varianti delle E²PROM; il numero di cicli di cancellazione e riprogrammazione è notevolmente ridotto rispetto a EPROM ed E²PROM (circa 100 cicli).

Struttura del microcomputer

Il microcomputer comprende:

- il microprocessore o unità centrale CPU (*Central Processing Unit*);
- le unità di ingresso/uscita I/O (*Input/Output*), che effettuano lo scambio dei dati con l'esterno (collegamento con la periferia: interfaccia);
- la memoria di programma, nella quale il programma di lavoro (o software) è memorizzato in forma imperdibile, cioè ROM e PROM;
- una memoria dati con i dati utilizzati al momento o il programma applicativo. Queste informazioni variano in continuazione e sono per questo memorizzate in una memoria RAM. L'ingresso/uscita dei dati nella RAM viene controllato dal programma operativo;
- un generatore di impulsi (generatore di clock) e un sistema di alimentazione e stabilizzazione della corrente;
- i componenti principali di un microcomputer sono riuniti su circuiti stampati sotto forma di grandi circuiti indipendenti o integrati su un'unica piastrina di silicio.

Struttura del microprocessore

Un microprocessore da solo non è in grado di funzionare: esso è sempre parte integrante di un microcomputer. Il microprocessore contiene l'unità di controllo (UC) e l'unità aritmetica ALU (*Arithmetic Logic Unit*).

Nell'unità aritmetica vengono eseguite operazioni aritmetiche (addizione, sottrazione, moltiplicazione, logaritmo, ecc.) e logiche (con gli operatori logici AND, OR, NOR, ecc.).

L'unità di controllo provvede a far eseguire le istruzioni di programma provenienti dalla memoria. Inoltre, in un apposito accumulatore vengono memorizzati i risultati intermedi dell'unità ALU.

Bus

Il bus collega i diversi elementi del microcomputer. Il bus è un fascio di conduttori paralleli (bus degli indirizzi, bus dei dati, bus di controllo), al quale possono essere collegati molti componenti con diverse funzioni, ma con interfacce elettriche uguali.

Il numero delle informazioni trasmissibili in parallelo (che corrisponde al numero dei conduttori del bus) rappresenta una misura delle caratteristiche tecniche del bus dei dati. Esistono bus da 8, da 16 e da 32 bit.

La scelta del bus dei dati è condizionata dalla capacità della CPU. Un sistema raggiunge la sua massima capacità di calcolo se la CPU e il bus hanno la stessa capacità, cioè CPU da 32 bit con bus da 32 bit oppure CPU da 64 bit con bus da 64 bit. Solo due componenti per volta possono utilizzare contemporaneamente i bus; gli altri devono bloccare le loro uscite durante questo tempo per non disturbare il collegamento tra i componenti in collegamento.

Generatore di clock

Un generatore di impulsi (clock) provvede ad una esecuzione a scansione di tutte le operazioni nel microcomputer. Il generatore deve essere adattato alla velocità necessaria all'operazione di calcolo (tempo reale). Attualmente si è arrivati a frequenze di clock di 3 GHz.

Unità di ingresso/uscita (I/O)

L'unità di ingresso/uscita effettua lo scambio dei dati con l'esterno. I segnali di ingresso vengono richiamati con la frequenza richiesta; i segnali di uscita vengono emessi alla velocità di elaborazione nella sequenza ottimale o memorizzati fino a quando vengono richiamati.

Programmazione

L'unica forma di comando interpretabile direttamente da un microprocessore è una istruzione binaria. Tutte le istruzioni fornite al microprocessore vengono trascritte automaticamente con un programma traduttore (Assembler) in un codice binario (codice in linguaggio macchina) comprensibile per il microprocessore. I microcomputer per applicazioni singole vengono programmati nel linguaggio Assembler specifico del processore.

Microcontrollore

Il microcontrollore è un componente che integra la funzione CPU, la memoria a sola lettura (ROM, EPROM o E²PROM), la capacità di ingresso e di uscita (E/U o I/O) e la memoria di lettura e scrittura (RAM). Il microcontrollore è in grado di funzionare senza altri componenti (funzionamento

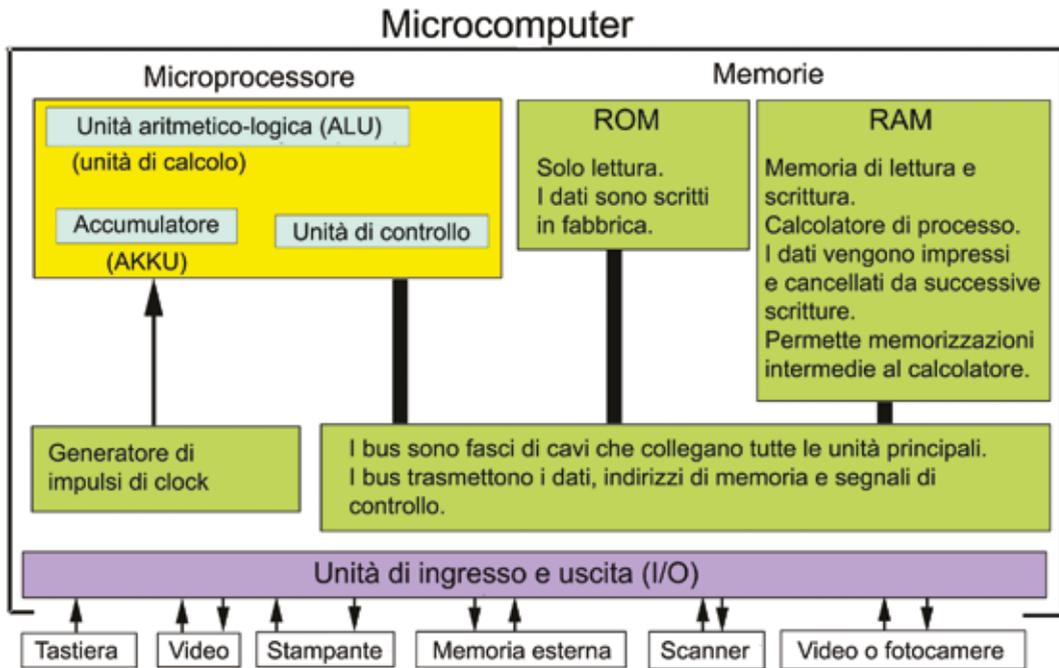


Fig. 7.78 - Struttura del microcomputer.

autonomo). Altre denominazioni usate per il microcontrollore sono: microcomputer ad un chip, calcolatore ad un chip.

Memorizzazione dei dati

I dati all'interno delle centraline sono immagazzinati all'interno delle memorie. Ma quali sono i dati che devono essere immagazzinati? Per saperlo, l'autoriparatore deve avere delle conoscenze sul funzionamento dei motori che sono oggetto di studio nei capitoli dedicati all'accensione, all'iniezione Diesel o benzina ed alla gestione del motore in genere.

Dati dell'accensione

Le centraline dell'accensione sono state le prime ad avere delle memorie interne (non rimappabili). La capacità di una centralina Digiplex della Marelli (capostipite delle centraline dedicate all'accensione di questo marchio) era di 512 punti di memoria per 8 curve di anticipo. Come si potrà osservare in figura 7.79, le curve sono quelle dell'angolo di anticipo d'accensione (prima del PMS), sono in funzione del numero giri e della depressione presente nel collettore di aspirazione. Era possibile ritoccare le curve al ribasso (angoli di anticipo inferiori) dopo aver eseguito delle operazioni meccaniche sul motore.

Le curve subivano tutte una riduzione d'angolo d'anticipo di una quantità fissa (pochi gradi), per evitare possibili fenomeni di detonazione del motore (ad esempio dopo la sostituzione della guarnizione della testata), collegando i piedini 6 o 7 o entrambi a massa. La capacità di memoria della seconda serie di queste centraline saliva a 1920 angoli di anticipo. Il grafico di figura 7.80 rappresenta un sistema ancora più evoluto (con memorie fisse) della Motronic Bosch con un numero migliaia di volte più elevato di memorie d'anticipo.

Più è alto il numero di memorie utilizzate, meglio si adegua l'angolo alle esigenze del motore. Tuttavia, con queste curve non si tiene conto di altri fattori che influenzano l'anticipo, come la temperatura dell'aria, quella del motore, l'invecchiamento del motore stesso, ecc. Ad esempio, servirebbero tante famiglie di curve come quelle della figura 7.80 quante sono le possibili temperature di funzionamento del motore.

L'autoriparatore si renderà conto dell'immenso numero di memorie che servono per tener conto di tutti questi fattori.

Dati dell'iniezione

Per il motore a benzina è necessario regolare l'angolo di anticipo, ma servono anche le memorie per i tempi di iniezione che variano in funzione di numero di giri motore, posizione della valvola a farfalla, temperatura dell'aria, temperatura del motore, fase di accelerazione, fase di decelerazione, pressione nel collettore (soprattutto per i motori turbocompressi), situazione dello scarico (temperatura e/o fase di depurazione), ricircolo vapori carburante, ecc. Non dimentichiamo che influenzano la gestione del motore la climatizzazione, l'impianto di ricarica, lo sterzo, l'ESP, il cambio e la trazione. Per il motore Diesel servono parametri diversi da memorizzare, quali ad esempio l'anticipo di iniezione prima del PMS in funzione del numero giri, la quantità di gasolio ad ogni iniezione in funzione della posizione pedale acceleratore, ecc.

Le moderne auto ibride hanno inoltre molte altre esigenze sulla gestione del motore introdotte proprio dalla ricarica delle batterie di trazione, dall'utilizzo del motore elettrico in serie o in parallelo al motore termico, ecc.

L'enorme numero di dati richiede un numero di memorie altrettanto grandi e ciascuna memoria ha un numero che il programma del microprocessore interno alla centralina deve individuare. I linguaggi di programmazione (successivamente tradotti in linguaggio macchina) usano il sistema numerico esadecimale per la rappresentazione di numeri così elevati in spazi accettabili. Questo perché alla fine tutte queste memorie possono essere rappresentate da tabelle o da grafici (vedi figure 7.79 e 7.80).

Il problema delle tabelle è che devono essere leggibili su di un foglio o su di uno schermo, ma una cifra lunghissima espressa in binario o comunque lunga espressa in decimale renderebbe le caselle enormi e di conseguenza su di uno schermo comparirebbero poche caselle. Ciò obbligherebbe l'operatore a far scorrere continuamente lo schermo o a ricorrere a rimpicciolimenti che renderebbero illeggibili le cifre nelle caselle. Ecco perché il sistema esadecimale si presta molto meglio a rappresentare le memorie delle centraline. I grafici tridimensionali (3D) presentano invece problematiche diverse di intervento. Infatti, tanto più sono dettagliati, tanto più servono potenti funzioni del software di lettura (ad esempio zoom, finestre o aree di selezione) per potervi incidere con precisione.

Parametri

Quando premiamo l'acceleratore in pratica noi non facciamo altro che indicare la quantità d'aria che il motore può aspirare (per un benzina) o la quantità di carburante da iniettare (per un

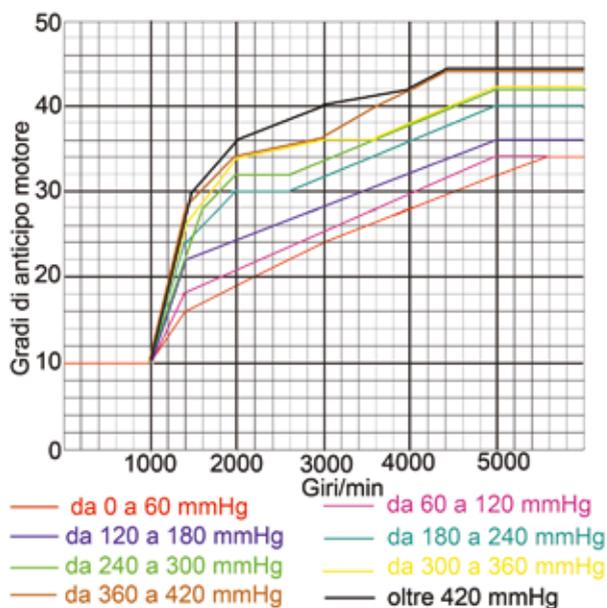


Fig. 7.79 - Otto curve di anticipo del numero giri motore "Digiplex Marelli".

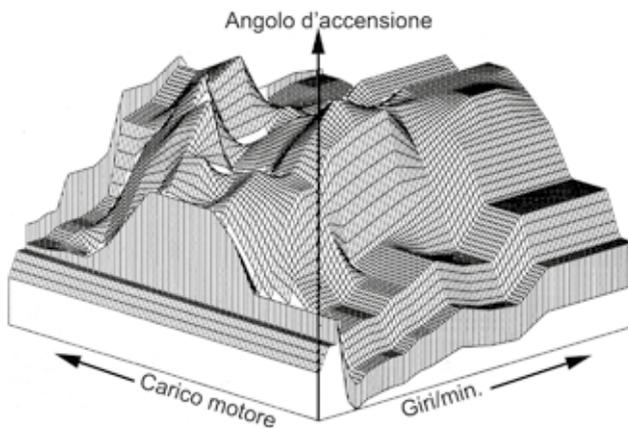


Fig. 7.80 - Rappresentazione tridimensionale (3D) delle curve di anticipo di accensione in funzione del numero giri motore e del carico motore "Motronic Bosch".

Diesel); tutti gli altri parametri sono gestiti dalla centralina elettronica.

È la centralina a dosare la migliore quantità di benzina (o di gasolio) ed effettuare l'accensione (o l'iniezione) nel momento più opportuno.

Per prendere tutte queste decisioni (che possono essere anche migliaia al secondo), la centralina elettronica è collegata a tutta una serie di sensori tramite i quali è in grado di conoscere i parametri di funzionamento del motore (anticipo, posizione albero motore, posizione albero a camme, temperatura aria, temperatura acqua, marcia inserita, numero di giri, sequenza di accensione, e decine di altri). In base alla valutazione di questi parametri la centralina decide la migliore "strategia" momento per momento (in tempo reale).

Come fa però la centralina a seguire una "strategia logica"?

La risposta è semplice: la centralina esegue il programma che l'uomo (il programmatore) le ha inserito nella memoria tramite una serie di "tabelle" che tengono conto dei vari parametri.

Tali tabelle vengono interpolate dalla CPU della centralina e determinano la regolazione istantanea dei parametri di funzionamento.

Quella che in gergo viene detta "mappatura" o "piano quotato" è in pratica la somma delle esperienze di un team di motoristi, elettronici, programmatori, collaudatori che tenta di far funzionare al meglio la vettura in tutte le condizioni possibili. Per sviluppare queste tabelle si parte da una serie di dati "standard" che vengono variati in modo specifico in funzione del veicolo.

Aspetti legali ed ecologici della rimappatura

Innanzitutto bisogna partire dal concetto che la centralina elettronica contiene una serie di tabelle in grado di ottenere le migliori prestazioni nelle condizioni d'uso più varie. Infatti, i parametri presi in considerazione possono anche essere esterni al funzionamento del motore; per esempio possono essere legati anche al controllo trazione, ABS, ESP, sospensioni, sterzo, ecc.

Inoltre, oggi le normative antinquinamento sono molto severe e i parametri di funzionamento sono progettati anche per poter soddisfare queste normative.

Auto fuori normativa ecologica

Nella maggioranza dei casi, una rimappatura della centralina elettronica comporta una variazione dei parametri legati alle emissioni, ponendo di fatto il veicolo fuori norma.

Auto fuori omologazione

In caso di dubbi, le compagnie assicurative richiedono una perizia sull'elettronica e sulla rimappatura o sulla presenza di eventuali moduli elettronici aggiuntivi. La presenza di questi moduli determina una manomissione dell'autovettura e fa decadere l'assicurazione perché l'auto perde l'omologazione. La stessa cosa può avvenire anche per una rimappatura.

Perdita di garanzia

Se l'auto è in garanzia (e oggi le auto hanno tutte almeno due anni di garanzia) effettuare una rimappatura mette a rischio la garanzia stessa: tramite i sistemi diagnostici forniti dalle case madri è possibile accorgersi se vi è stata una manomissione dell'elettronica.

Tipi di centraline

Esistono in generale due tipi di centraline: quelle che utilizzano le memorie EPROM e quelle che utilizzano le memorie FLASH. Le centraline con EPROM sono le più vecchie come concezione e produzione e sono montate sulle auto meno recenti. Per rimappare queste centraline bisogna smontarle, estrarre il circuito integrato che contiene la mappatura (e a volte anche il programma di gestione), riprogrammarne una nuova, reinserirla nella centralina e provarne il risultato.

Le centraline con memoria FLASH sono le più recenti.

La mappatura è contenuta in una o più memorie FLASH che sono riprogrammabili con apposite apparecchiature direttamente via connettore della centralina stessa smontata, oppure direttamente sulla memoria (vedi fig. 7.81 a sinistra), oppure via presa diagnosi OBD nell'abitacolo. Con



Fig. 7.81 - Attrezzatura per leggere il contenuto della EPROM. A sinistra dalla scheda, a destra tramite presa diagnosi.

queste centraline è più semplice effettuare tentativi multipli di ottimizzazione in quanto basta scaricare una nuova mappa e provare. Sono però più complicate dal punto di vista funzionale perché:

- hanno molti checksum che vanno sistemati pena il funzionamento del sistema in modalità RECOVERY (basse prestazioni);
- hanno tantissime funzioni da gestire molte interconnesse tra di loro;
- hanno diversi sistemi di protezione, sempre più sofisticati.

Attenzione: nel caso delle centraline con memorie FLASH da dissaldare e risaldare sulla scheda elettronica interna. Questa operazione è ad alto rischio perché le centraline sono sottoposte a vibrazioni continue, a sbalzi di temperature da -20 a $+80$ °C e a sollecitazioni meccaniche molto forti. Una saldatura non fatta a regola d'arte potrebbe invalidare il funzionamento della centralina.

La mappa

La mappa di gestione è formata da un insieme di tabelle esadecimali scritte per il programma della centralina stessa.

È proprio su tali tabelle che si interviene quando si vuole "mappare o rimappare" la centralina, in pratica scrivendo o riscrivendo alcune delle informazioni che in essa sono contenute e arrivando così a modificare quei parametri che danno vita alle modalità di gestione del propulsore.

Dati principali da ritoccare

Sarebbe un lavoro immenso quello di modificare l'intero programma di gestione del motore: normalmente, si interviene solo sulle mappe che riguardano la quantità di carburante da iniettare e quelle dell'istante di accensione (benzina) e di iniezione (Diesel). Le mappe che vengono solitamente ritoccate sono quelle relative al carico parzializzato e al pieno carico.

Parametri specifici

Può essere variato qualche altro parametro in base alla tipologia di propulsore: a benzina, Diesel, aspirato, sovralimentato.

Dati da non ritoccare

Per esempio, non è consigliato alterare la parte relativa al regime minimo di rotazione (che deve tener conto dell'azionamento dei vari servizi di bordo e del conseguente assorbimento di tensione); altrettanto inopportuno è intervenire sulla parte inerente alla gestione in funzione della temperatura dell'aria. E così anche per molte altre parti del programma. Non dovranno essere modificati i parametri di correzione fondamentali perché sono la logica stessa di tutto il programma di gestione.

Se si interviene aumentando di alcuni gradi l'anticipo ad un determinato numero giri e ad un determinato valore di carico (intendendo sempre per "carico", il grado di apertura della farfalla dell'acceleratore), i nuovi dati immessi saranno eseguiti solo se il motore avrà raggiunto la temperatura di regime. Infatti, nel caso la temperatura di esercizio risulti troppo bassa, la centralina andrà comunque ad applicare le "istruzioni" del caso contenute in un'altra zona della memoria,

lavorando così con un valore dell'anticipo che è quello di programma originale e non quello da noi ritoccato. La nuova mappa, semplicemente non verrà utilizzata. Ciò perché, come già accennato, i dati presenti nelle mappe dovranno essere approvati dalla logica del programma, il quale terrà sempre conto delle informazioni che alla centralina arrivano dai vari sensori. Non dimentichiamoci, inoltre, che i moderni sistemi di gestione sono oggi "ad anello chiuso" e tengono conto continuamente delle informazioni che arrivano dalle sonde lambda.

Protezioni

Le prime centraline erano molto semplici: esse ricevevano solo segnali relativi alla posizione della farfalla e al numero di giri del motore e fare modifiche era abbastanza facile, visto che non esistevano codici di controllo. Non ci si doveva dunque preoccupare di aggirare alcuna protezione. Oggi i costruttori introducono codici volti a proteggere i programmi immessi nelle centraline. I codici che la centralina legge al momento dell'avviamento o anche più volte durante il funzionamento, sono indispensabili per il funzionamento del motore; senza di questi, il motore si spegne o funziona in recovery.

Il primo codice ad essere introdotto è stato il "checksum", ovvero la somma in esadecimale di tutto ciò che è scritto nelle tabelle. Modificando anche una sola mappa, si altera ovviamente anche la somma totale dei byte e, se la somma corretta non viene ripristinata, il motore si spegne e non può più essere avviato.

I programmatori riescono ad aggirare l'ostacolo, effettuando gli interventi desiderati e riuscendo a ripristinare apparentemente la somma corretta alla fine dell'operazione.

Da parte loro, i costruttori affinano i metodi di protezione ricorrendo ad algoritmi sempre più complessi e introducendo calcoli matematici sempre più articolati (per esempio, si sommano solamente i dati di alcune zone, conteggiando tra l'altro solo i numeri pari o i numeri dispari). In figura 7.82, a destra sono indicate informazioni in esadecimale riguardanti appunto il checksum del veicolo di cui si sta eseguendo la rimappatura.

Tutte queste "protezioni" devono essere superate con dei dati forniti dalle ditte di remapping. I produttori dei programmi necessari per rimappare le centraline, oggi sono in grado di fornire, oltre ai driver necessari per leggere il programma in modo semplice e rapido, anche le diverse famiglie di checksum che si rendono di volta in volta necessarie per intervenire sui diversi modelli di auto.

EPROM

Le prime memorie EPROM erano le cosiddette DIL (*Dual In Line*, ma oggi conosciute anche come DIP, *Dual Inline Package*), un formato di memoria con due file di piedini paralleli saldati "passanti" rispetto alla scheda elettronica del circuito stampato.

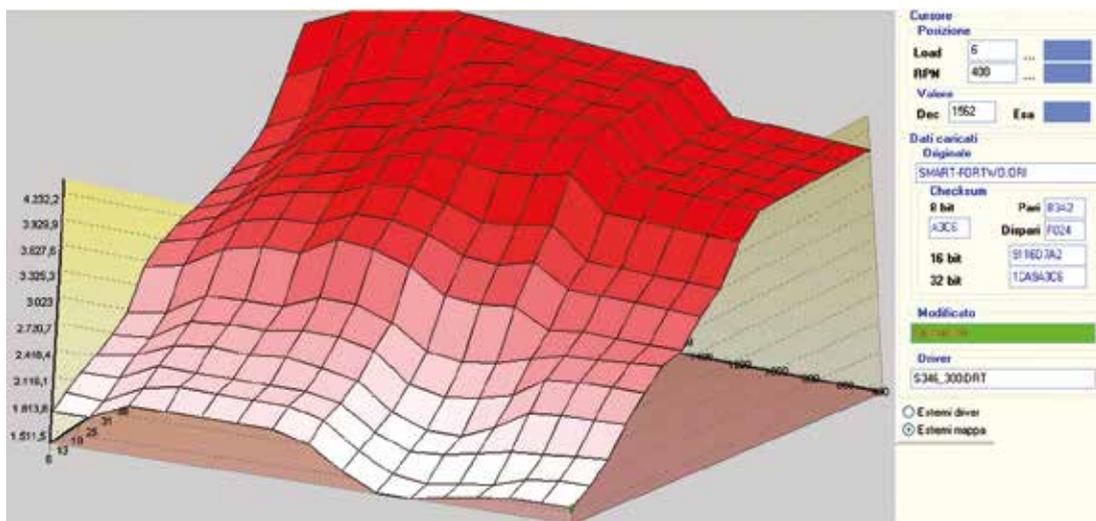


Fig. 7.82 - Rappresentazione (3D) di mappe di veicolo Smart; a destra indicazioni relative ai "checksum", al driver, ecc.

Queste memorie erano asportabili e, quindi, potevano essere facilmente sostituite con altre memorie rimappate. L'unica difficoltà era data dalla necessità di ricostruire le saldature presenti su entrambi i lati della basetta elettronica.

Poi sono arrivate le memorie PLCC (un formato chip quadrato con piedini sui quattro lati e caratterizzato da saldatura superficiale) e le PSOP (un formato "a sogliola" con due file di piedini paralleli, caratterizzato anche questo da saldatura superficiale): dissaldarli senza causare danni è un lavoro di precisione.

Alcune memorie non possono essere rimosse perché sono direttamente "annegate" in una speciale resina oppure sono fisicamente racchiuse all'interno dello stesso microprocessore.

Nelle caso in cui sia impossibile asportare la memoria, si può eseguire la riprogrammazione tramite dialogo per via seriale, cioè tramite un cavo che colleghi la presa diagnosi dell'auto al computer.

Le memorie più evolute sono le FLASH EPROM (nel formato PSOP), le quali sono delle memorie non volatili cancellabili e riprogrammabili elettricamente e che adottano un formato a blocchi tale da rendere possibile la riscrittura anche di solo una parte del programma. Queste possono essere riprogrammate semplicemente via cavo, attraverso la presa diagnosi dell'auto stessa. Ciò permette al costruttore dell'auto di modificare i propri programmi di gestione e di correggere (con facilità, nei vari centri di assistenza) anche alcune eventuali anomalie di funzionamento, in garanzia e anche successivamente.

Riprogrammazione

La strada più classica da intraprendere per rimappare una centralina è quella della rimozione della memoria, la quale deve essere asportata, riscritta nella postazione di lavoro e risaldata. Alla fine, una prova su strada o sul banco permetterà di testare i risultati dell'intervento.

Un altro sistema di riprogrammazione è quello dell'emulazione in tempo reale, un metodo che certamente garantisce una maggiore precisione, in quanto consente di verificare istante per istante le tabelle in cui va a leggere la centralina.

Utilizzando questo metodo, le caselle attive (delle varie tabelle) durante il funzionamento vengono infatti evidenziate sul monitor con un colore diverso dal software di modifica e, quindi, risultano facilmente individuabili.

Emulazione

Nell'emulazione in tempo reale, si dovrà asportare la EPROM dalla centralina, collegando al suo posto il computer tramite apposito cavo e connettore.

Naturalmente sul computer deve essere installato il software emulatore. Il programma di modifica permetterà di simulare la presenza della memoria e di leggere sul monitor le varie mappe durante il funzionamento del motore. Il problema è che tutto questo va eseguito durante una prova su strada. Dopo aver individuato e riscritto le zone da modificare, il nuovo programma di rimappatura viene salvato sul computer e, successivamente, riscritto nella EPROM. Solo allora la EPROM potrà essere rimontata.

Riscrittura via cavo

Questo sistema permetterà di intervenire attraverso la presa diagnosi.

Nel caso non si siano ottenuti dei risultati soddisfacenti, bisognerà ripetere la riprogrammazione sino al raggiungimento dei risultati voluti. Questo perché non è ancora possibile intervenire a propulsore in moto quando si dialoga per via seriale con la centralina. Il vantaggio però è che con questo sistema non sarà necessario asportare (e poi risaldare) la memoria per poterla modificare.

Moduli aggiuntivi

Un discorso a parte va fatto per le centraline aggiuntive, alcune delle quali offrono il vantaggio di poter sfruttare le mappe elaborate solo qualora si intervenisse su un apposito interruttore o telecomando posto nell'abitacolo.

Tali moduli intercettano i segnali captati dai vari sensori presenti nel propulsore e, ingannando la centralina, li variano ancora prima che la centralina possa elaborarli, permettendo così di variare alcuni parametri di funzionamento del motore. Sono molto efficaci questi componenti su motori turbodiesel common rail, perché in questi casi si riesce anche a variare la portata del gasolio e la pressione del turbo.

Le tabelle

Nelle tabelle, le parti solitamente soggette a modifica sono le cosiddette "breakpoints".

Queste sono relative ai giri del motore e sono molto fitte ai bassi regimi di rotazione, per poi diventarle sempre meno mano a mano che ci si avvicina ai regimi più elevati.

Le file potrebbero essere distanziate tra di loro anche di soli 100 giri/minuto nelle zone prossime al regime minimo, mentre potranno essere tra loro distanziate anche di 500 giri/minuto nelle zone vicine al regime massimo di rotazione.

Ciò perché ai bassi regimi il motore non deve manifestare incertezze ed esitazioni di funzionamento, visto che il propulsore funziona molto spesso a quei regimi; nel traffico urbano, per esempio, la posizione dell'acceleratore può variare anche in modo impercettibile, ma facendo variare comunque il regime di rotazione.

Sarà comunque necessario fare in modo che il propulsore non presenti seghettamenti e che le variazioni di regime siano graduali e fluide.

L'azione sulle tabelle deve prendere in considerazione parecchi punti di intervento ai bassi regimi e pochi ai regimi alti. Ai regimi alti si arriva con grandi aperture della farfalla e in regime transitorio (cioè, in accelerazione).

La rappresentazione tabellare dei dati contenuti nel file letto dalla centralina è la via più facile, veloce ed intuitiva per interpretare, aumentare o diminuire i valori. Cliccando sulla mappa desiderata, la schermata principale è sostituita da una tabella costruita attraverso l'incrocio dei parametri presenti sui due assi. Si può così intervenire direttamente sui valori fisici della mappa, ad esempio Nm, Bar, mm³.

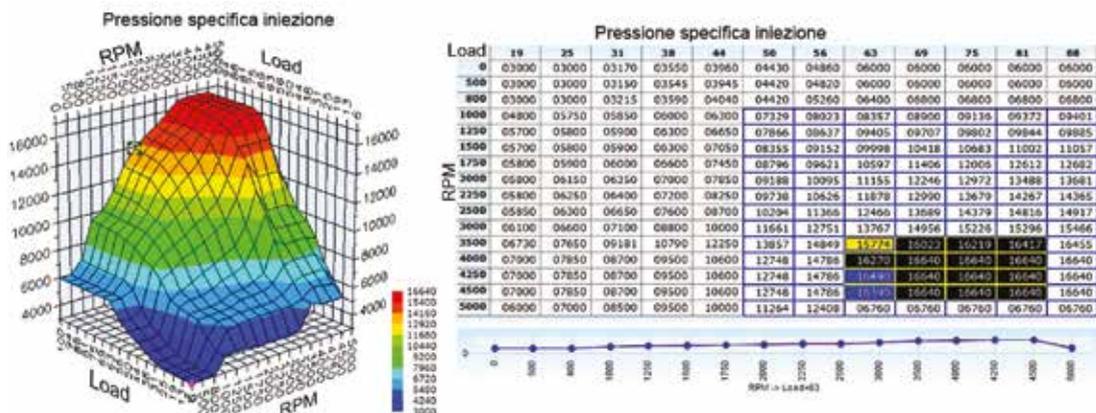


Fig. 7.83 - Rappresentazione (3D): pressione carburante in funzione di n. giri e carico motore; a destra è evidenziata la zona di ritocco.

I motori turboDiesel

I motori turboDiesel ad iniezione diretta sono gestiti da centraline elettroniche dalle caratteristiche molto simili a quelle dei motori benzina.

I motori turboDiesel dispongono di almeno un paio di mappe finalizzate alla gestione della pressione del turbo. In genere nei turboDiesel le mappe di iniezione del carburante sono in maggior numero rispetto ai motori a benzina (in funzione del carico motore).

Comunque, non è sempre necessario intervenire su tutte. La riprogrammazione della centralina sui motori turboDiesel (come, del resto, su tutti i motori sovralimentati) può portare ad incrementi di potenza notevoli. Proprio per questo motivo, però, spesso si rischia con l'esagerare e, in alcuni casi, con il compromettere l'affidabilità e la durata del propulsore. In particolare, un'eccessiva fumosità allo scarico dovrà mettere in allarme l'operatore. Il Diesel necessita di un eccesso d'aria fisiologico per non "fumare". Una combustione troppo ricca non avviene solo nel cilindro, ma prosegue anche nello scarico; è un fatto da non sottovalutare. Nei motori Diesel, un'eccessivo arricchimento della portata carburante comporta che il gasolio non riesca a bruciare completamente nella camera di scoppio e continui a bruciare a ridosso della turbina, elevando così a dismisura la temperatura di quest'ultima. Il rischio sarà quindi quello di danneggiare il turbocompressore.

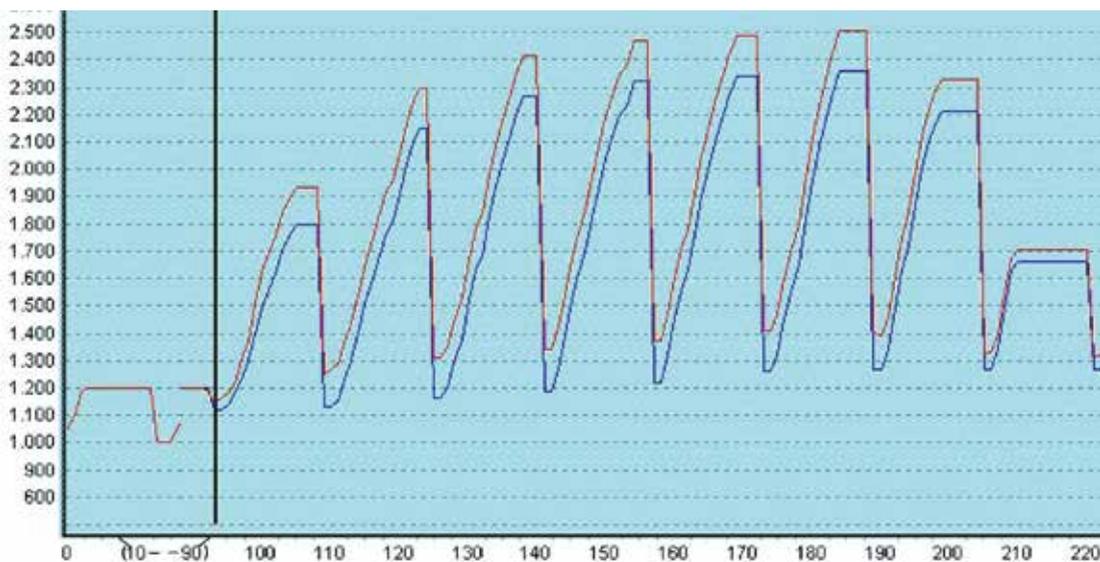


Fig. 7.84 - Modifica dell'iniezione di un common rail Diesel. Curva blu originale; curva modificata in rosso.

Nella figura 7.84 è mostrato un esempio di un grafico di un motore turboDiesel prima (in blu) e dopo il ritocco (in rosso: circa +2,5%). L'iniezione, in questo caso, subisce un incremento di mandata, alzando la curva originale dell'iniezione direttamente dal computer con un semplice colpo di mouse. Basterà successivamente memorizzare il risultato nella EPROM.