

INDICE

◆ Spiegazione progetto.....	3
-----------------------------	---

INDICE APPENDICE

◆ Ponte di Graetz.....	1
◆ Diodi Zener.....	6
◆ Alimentatore stabilizzato.....	14
◆ Diodi Led.....	19
◆ Relè.....	23
◆ Operazionali.....	33
◆ Circuito con alimentazione singola.....	53
◆ BJT.....	59



Fondazione Villaggio dei ragazzi “Don Salvatore D’Angelo”



ISTITUTO TECNICO INDUSTRIALE

ALLIEVI: FUSCO RAFFAELE
SABATINO SALVATORE
SEANO GIOSUE’

ANNO SCOLASTICO 2004-2005

Prefazione

La nostra tesina intende fornire alla commissione d'esame una chiara visione su argomenti scelti da noi secondo un indice di gradimento.

Date le conoscenze conseguite nel corso del triennio, noi allievi, abbiamo cercato di mostrare praticamente quanto assimilato. Lo scopo è stato quello di costruire un circuito con eccitazione di un relè tramite una telefonata.

Per quanto riguarda le materie tecniche, abbiamo preferito affrontare lo studio dei componenti che costituiscono il lavoro da noi presentato.

Gli approfondimenti riguardanti le materie umanistiche sono stati trattati da noi in modo differente.

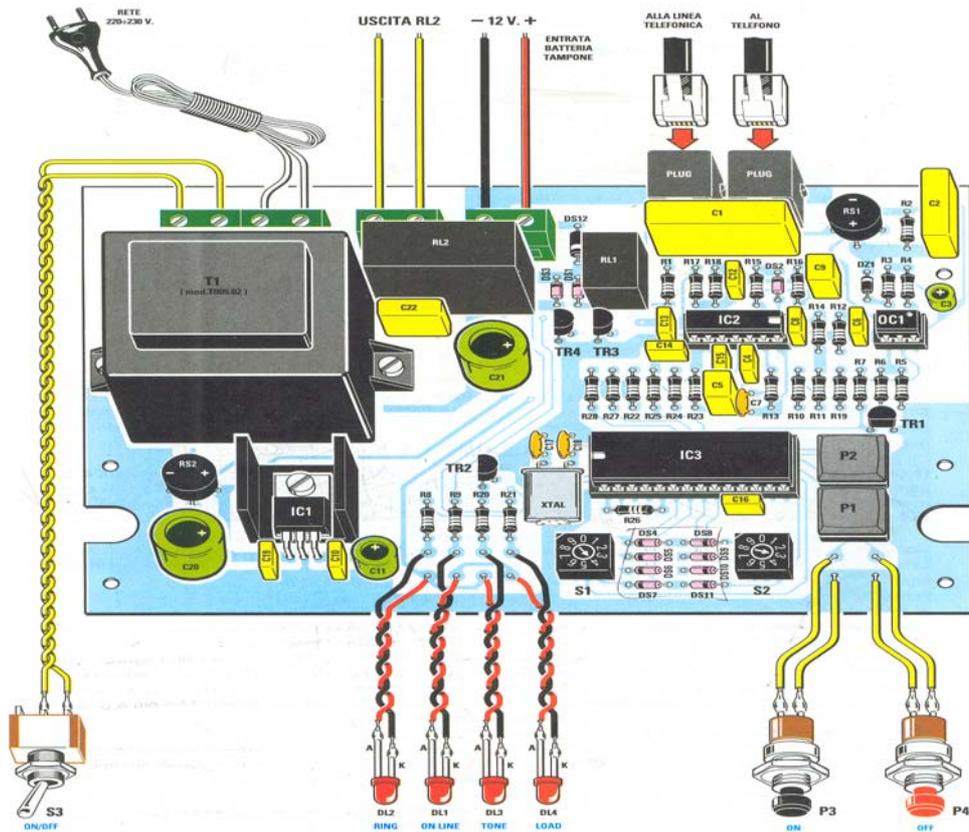
Come eccitare un relè tramite una telefonata?



Ci abbiamo pensato noi !!!

CAPITOLO I

Funzionamento e spiegazione del progetto



Per spiegare il funzionamento del circuito occorre descrivere in via preliminare il suo funzionamento.

Innanzitutto abbiamo i due commutatori S1 ed S2 che consentono di impostare una chiave numerica di identificazione composta da due cifre decimali comprese fra 0 e 9.

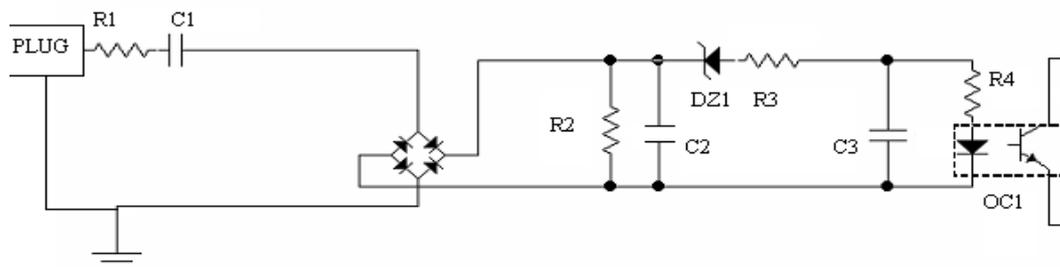
Supponiamo di aver impostato il codice di identificazione a 1-1; quando si compone il numero di telefono collegato all'apparecchio,

questo attende che vi siano cinque consecutivi di linea libera. Dopo il quinto squillo l'apparecchio invia in linea dieci note acustiche trillanti. Poiché il codice identificativo ha per prima cifra 1, non bisogna ascoltare tutte e dieci le note, ma dopo la prima nota bisogna fare un fischio o pronunciare una parola qualsiasi ad alta voce. Questo ha l'effetto di far ripartire l'invio delle dieci note. Stavolta occorre attendere un numero di note coincidente alla seconda cifra del codice identificativo; nel nostro esempio la seconda cifra è ancora un uno. L'apparecchio in questo modo eccita il relè, mantenendo in linea una nota acustica continua per avvisare che il relè si è regolarmente eccitato.

SPIEGAZIONE DEL CIRCUITO

Normalmente, in condizioni di riposo, sull'ingresso della linea vi è una tensione positiva di circa 40Volt. Una chiamata dall'esterno provoca l'invio da parte della centrale telefonica di una tensione alternata di 150 Volt.

In condizioni normali il relè RL1 è diseccitato per cui il suo contatto di scambio è in posizione tale che la linea d'ingresso è connessa al ponte di Graetz RS1. La situazione è descritta nella figura seguente:



La tensione alternata viene raddrizzata dal ponte di Graetz. [Approfondimenti riguardanti il ponte di Graetz sono stati trattati in appendice da pagina 1 a pagina 5]

Questa tensione raddrizzata viene poi resa prossima a quella continua del condensatore C3. [Approfondimenti riguardanti i diodi Zener sono stati trattati in appendice da pagina 6 a pagina 13]

Tenendo presente che il diodo zener mantiene ai suoi capi una tensione continua di 33 Volt e che in R3 circola una corrente dell'ordine dei 10mA si ha che la tensione massima ai capi di C3 sarà:

$$V_{C_3} = V_{MAX} - V_Z - R_3 * I$$

$$V_{C_3} = 150 - 33 - 5.6 * 10^3 * 10 * 10^{-3}$$

$$V_{C_3} = 150 - 33 - 56 \approx 60 \text{ Volt}$$

Tenendo presente che vale la formula

$$\Delta V = I \sqrt{2fC_3}$$

$$\Delta V = 10 * 10^{-3} \sqrt{100 * 10 * 10^{-6}}$$

$$\Delta V = 10 * 10^{-3} \sqrt{10^{-3}}$$

$$\Delta V = 10 \text{ Volt}$$

Abbiamo dunque un ΔV di ripple residuo di una decina di Volt; la resistenza R4 limita la tensione ai capi del diodo emittente del fotoaccoppiatore.

Immaginandolo come un interruttore che si chiude, si vede che esso porta la base del transistor TR1 alla tensione di 5Volt prodotta dall'integrato 7805; questo integrato insieme a RS2 e al trasformatore TR1 costituisce un alimentatore stabilizzato da 5 Volt.[[Approfondimenti riguardanti l'alimentatore stabilizzato sono stati trattati in appendice da pagina 14 a pagina 18](#)]

La resistenza R6 serve a limitare la corrente che entra in TR1

$$5=R6 \cdot I_B + V_{BE}$$

$$I_B = \frac{5 - V_{BE}}{R6}$$

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{1.2 \cdot 10^3}$$

$$I_B = (4.3 \cdot 1.2) \cdot 10^{-3}$$

$$I_B = 3.5 \text{mA}$$

Essendo TR1 in saturazione il catodo del diodo led DL2 va a massa ed esso si illumina, R8 limita la corrente il DL2.[[Approfondimenti riguardanti i diodi Led sono stati trattati in appendice da pagina 19 a pagina 22](#)]

$$5 = V_{DL2} + R8 \cdot I_D$$

$$I_D = \frac{5 - V_{DL2}}{R8}$$

$$I_D = \frac{5 - 1.7}{330}$$

$$I_D = 3.3 \setminus 330 = 1 * 10^{-2}$$

$$I_D = 10 \text{mA}$$

Andando in saturazione il transistor TR1 porta praticamente a massa il suo collettore e quindi l'ingresso 19 del microprocessore IC3 che così può contare gli squilli telefonici.

Il programma del microprocessore IC3 fa in modo che quando si contano cinque impulsi a zero sul piedino 19, si porta il pin 22 a livello uno. Questa operazione manda in conduzione il transistor TR3. R27 limita la corrente nella base di TR3.

$$V = V_{BE} + R27 * I_B$$

$$I_B = (V - V_{BE}) \setminus R27$$

$$I_B = (5 - 0.7) \setminus 4.7 * 10^3 \approx 1 \text{mA}$$

Entrando in conduzione TR3, la corrente di collettore eccita la bobina del relè RL1. [\[Approfondimenti riguardanti il Relè sono stati trattati in appendice da pagina 23 a pagina 32 \]](#)

DS1 è un diodo che si mette in parallelo alla bobina di eccitazione del relè per proteggere il transistor da impulsi di tensione negativa che si possono avere quando si usano circuiti induttivi. DL1 indica che si è avuta l'eccitazione del relè RL1. R9 limita la corrente nel diodo DL1.

L'eccitazione del relè RL1 porta così allo spostamento del suo contatto di scambio per cui la linea d'ingresso viene scollegata dal ponte RS1 e portata in ingresso all'operazionale IC2-1.

A questo punto il microprocessore genera attraverso le sue uscite analogiche (pin 21) le note acustiche.

Tale segnale viene filtrato prendendo un filtro costituito dall'operazionale IC2-D.

La situazione è quella rappresentata in figura 1:

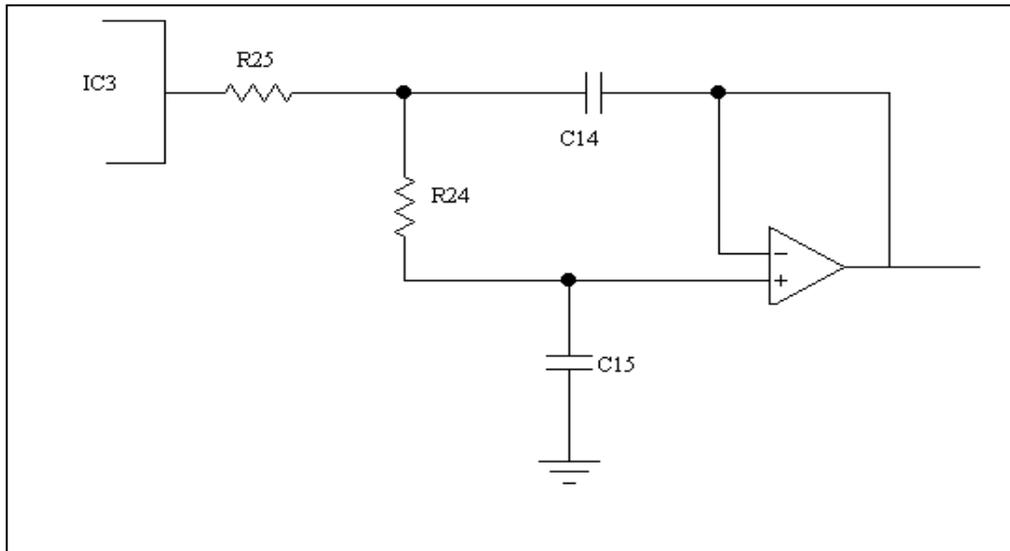


Figura 1

Se teniamo presente che per le ipotesi semplificative sull'operazionale ideale, i morsetti + e - sono alla stessa tensione la situazione è quella della figura 2

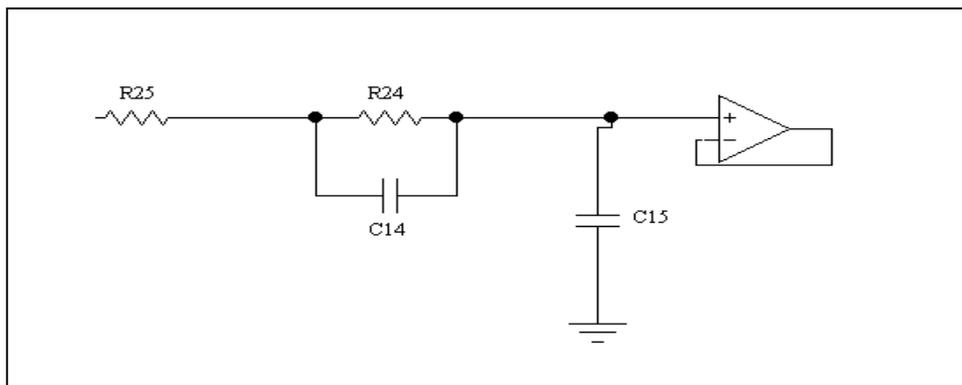


Figura 2

VALORI

$$R24=15 \cdot 10^3$$

$$R25=15 \cdot 10^3$$

$$C14=22 \cdot 10^{-9}$$

$$C15=10 \cdot 10^{-9}$$

Abbiamo un circuito RC, filtro passa basso seguito da un buffer di isolamento. [\[Approfondimenti sugli operazionali sono stati trattati in appendice da pagina 33 a pagina 52\]](#)

Le note acustiche generate dal microprocessore ed inviate in linea attraverso l'operazionale IC2-D saranno continue se il relè RL2 risulta già eccitato, e saranno trillanti se il relè è diseccitato. Il fischio o la parola che inviamo tramite la linea telefonica all'apparecchio vengono filtrati dall'operazionale IC2-A che è in configurazione passa banda non invertente.

Da notare le due resistenze R10 ed R11 entrambe a 100KΩ. Esse servono per traslare verso l'alto il segnale d'ingresso nel caso in cui l'operazionale, come in questo caso, sia ad alimentazione singola [\[Approfondimenti riguardanti i circuiti con alimentazione singola sono stati trattati in appendice da pagina 53 a pagina 58\]](#).

Abbiamo detto che l'operazionale è in configurazione amplificatore passa banda non invertente, con una banda molto stretta;

➤ [Frequenza di taglio inferiore](#)

$$F_{ti} = \frac{1}{2\pi R_{12} C_6} =$$

$$F_{ti} = \frac{1}{6.28 * 10^4 * 10^4 * 10^{-12}} =$$

$$F_{ti} = \frac{1}{6.28 * 10^{-4}} =$$

$$F_{ti} = 10 * 10^3 / 6.28 =$$

$$F_{ti} = 1.59 \text{ KHz}$$

➤ Frequenza di taglio superiore

$$F_{ts} = \frac{1}{2\pi R_{13} C_7}$$

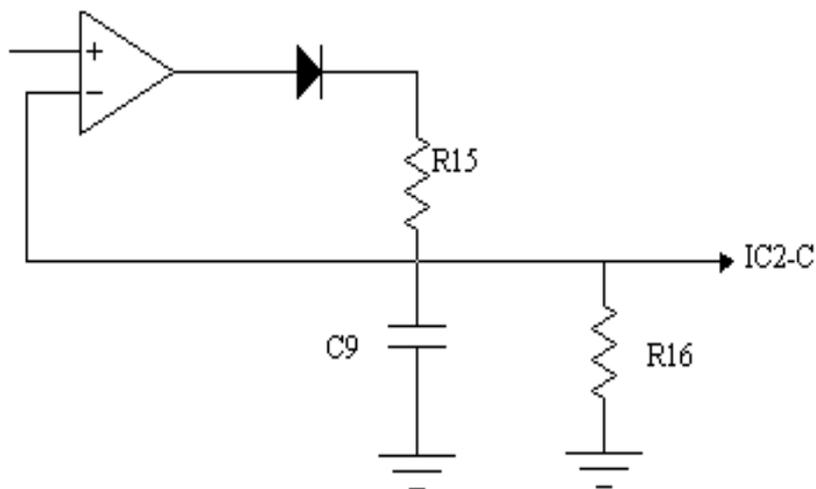
$$F_{ts} = \frac{1}{2\pi \cdot 6.28 \cdot 3.3 \cdot 10^5 \cdot 270 \cdot 10^{-12}} =$$

$$F_{ts} = \frac{1}{6.28 \cdot 3.3 \cdot 2.7 \cdot 10^{-5}} =$$

$$F_{ts} = 10^5 \cdot 55.95 =$$

$$F_{ts} = 1.78 \text{ KHz}$$

Il condensatore C_8 è un condensatore di accoppiamento tra i due stati IC2-A ed IC2-B; R_{14} stabilisce la resistenza di ingresso ($100 \text{ K}\Omega$) per l'operazionale IC2-B



IC2-B funge da PEAK DETECTOR e serve a rilevare i picchi positivi del fischio filtrato da IC2-A.

Si noti infatti che grazie alla presenza del diodo, si ha alimentazione del condensatore C₉ soltanto quando l'uscita dell'operazionale è a livello logico alto. Il condensatore si carica con una τ di carica:

$$\tau = C_9 R_{15} =$$

$$\tau = 10^{-6} * 10^5 =$$

$$\tau = 10^{-1} =$$

$$\tau = 0.1 \text{ s}$$

e si scarica con una τ di scarica

$$\tau_{\text{scarica}} = C_9 R_{16} =$$

$$\tau_{\text{scarica}} = 10^{-6} * 4.7 * 10^5 =$$

$$\tau_{\text{scarica}} = 4.7 * 10^{-1} =$$

$$\tau_{\text{scarica}} = 0.47 \text{ s}$$

La tensione del condensatore va al morsetto invertente di IC2 che la compara con la tensione di riferimento posta al morsetto positivo:

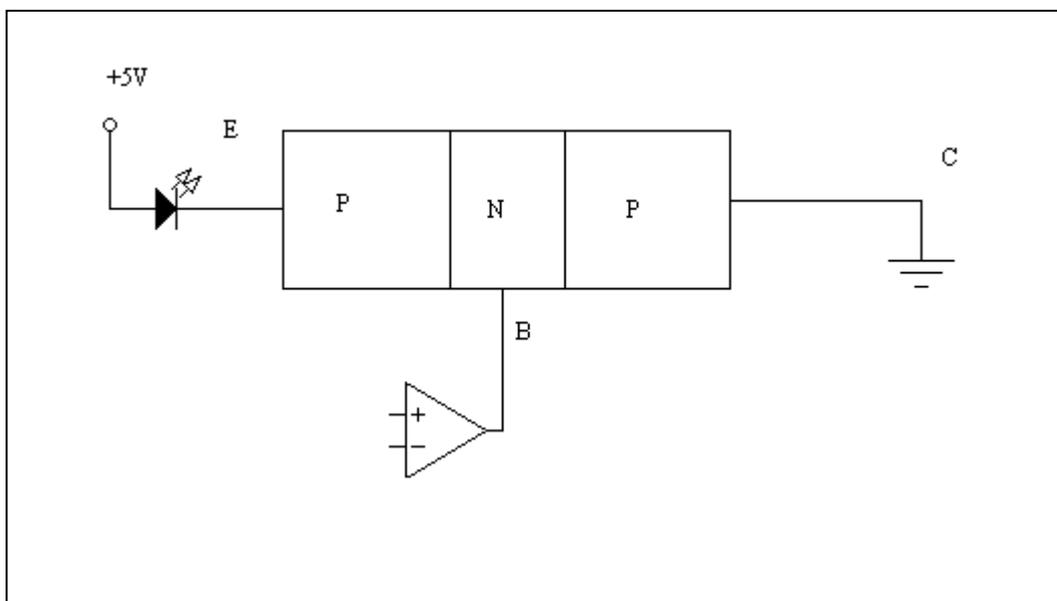
$$V_{REF} = V_{CC} * R_{18} / (R_{17} + R_{18})$$

$$V_{REF} = 5 * 10^4 / (2.2 * 10^4 + 10^4)$$

$$V_{REF} = 5 * 10^4 / 3.2 * 10^4$$

$$V_{REF} = 5 / 3.2 = 1.5 \text{ Volt}$$

Superata tale soglia, l'uscita di IC2 va a massa ; ciò viene segnalato dall'accensione del transistor TR2. Si noti che questo è un transistor PNP, in cui il catodo è a massa.



Per far illuminare il LED si deve avere una corrente positiva che attraversi il LED e giunga al collettore, ciò presuppone che la giunzione base-emettitore venga polarizzata direttamente, e per questo deve andare B a massa. [[Approfondimenti riguardanti il BJT sono stati trattati in appendice da pagina 59 a pagina 70](#)]

R19 serve a limitare la corrente nella base quando l'uscita dell'operazionale IC2 è a livello logico alto.

Intanto il microprocessore riceve attraverso il piedino 17 l'informazione sul rilevamento del fischio. Se il microprocessore rileva che l'impulso è pervenuto dopo la nota impostata secondo il codice con i selettori S1 ed S2, esso inverte il livello logico sul piedino 23. Attraverso il transistor TR4, tale piedino comanda la bobina di eccitazione del relè RL2. Se l'uscita del piedino 23 è a livello logico alto TR4 va in saturazione, e quindi circola corrente nella bobina di eccitazione, chiudendo in questo modo i contatti. Se l'uscita del piedino 23 va a livello logico basso, TR4 va in interdizione e il relè RL2 viene diseccitato.

DS3 è un diodo di protezione, che protegge il transistor da impulsi magnetici di tensione a causa del carico induttivo offerto dalla bobina di eccitazione.

Quando viene eccitato il relè si accende anche il diodo LED DL4. L'alimentazione del relè viene offerta dal circuito raddrizzatore costituito dal ponte di Graetz.

Il trasformatore dà una tensione efficace sul secondario di 10 Volt, quindi

$$V_{MAX}=V_2* 10 \text{ Volt}$$

$$V_{MAX} = 14 \text{ Volt}$$

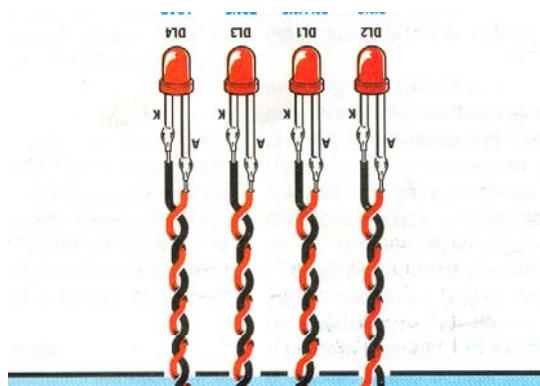
In uscita del ponte di Graetz dobbiamo togliere le cadute di tensione sui due diodi, e quindi:

$$V_{OUT} = V_{MAX} - 2V_D =$$

$$V_{OUT} = 14 - 12 =$$

$$V_{OUT} = 12 \text{ Volt}$$

FUNZIONI DEI QUATTRO DIODI LED



Sul pannello frontale del mobile sono disposte le quattro gemme cromate dei diodi led DL1- DL2- DL3- DL4 che servono da lampade spia.

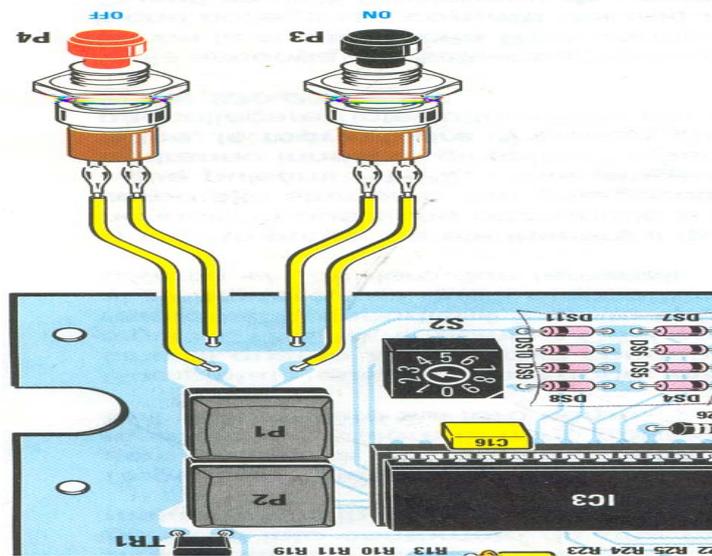
RING (diodo DL1): questo diodo led, collegato al collettore del transistor TR1, si accende ogni volta che nella linea giungono i 150 volt alternati che fanno squillare la suoneria del telefono.

ON LINE (diodo DL2): questo diodo led si accende dopo cinque squilli telefonici. Quando questo diodo si accende, significa che il relè RL1 si è eccitato scollegando il ponte raddrizzatore RS1 dalla linea telefonica

TONE (diodo DL3): questo diodo si accende per ognuna delle dieci note emesse dal microprocessore.

LOAD (diodo DL4): questo diodo led si accende nell'istante in cui il relè RL2 si eccita, e si spegne quando il relè RL2 si diseccita.

LE FUNZIONI DEI QUATTRO PULSANTI



In questo circuito ci sono quattro pulsanti siglati P1-P2-P3-P4.

I pulsanti visibili sul pannello frontale del mobile, ci permettono di eccitare e di diseccitare manualmente il relè RL2 senza dover utilizzare un apparecchio telefonico esterno.

P1: premendo questo pulsante simuliamo gli squilli che giungono dalla linea telefonica e infatti, ogni volta che pigiamo P1, si accende il diodo DL1. Dopo aver pigiato cinque volte consecutive questo pulsante, si accende il diodo led DL2 che ci conferma che il relè RL1 di linea si è regolarmente eccitato.

P2: utilizziamo questo pulsante per fissare il codice presalvato sui due commutatori binari (S1-S2). Ovviamente non è possibile ascoltare le note acustiche dal nostro apparecchio telefonico, ma possiamo invece vederle tramite il diodo led DL3 collegato all'emettitore del transistor TR2.

P3: RL2 on: quando il relè è diseccitato (vedremo il diodo led DL4 spento), noi possiamo eccitarlo premendo questo pulsante.

P4: RL2 off: quando il relè RL2 è eccitato (vedremo il diodo led DL4 acceso), noi possiamo diseccitarlo premendo questo pulsante.

BIBLIOGRAFIA

- ◆ Appunti scaricati da Internet
sito: www.antoniosantoro.com
Del docente Santoro Antonio

- ◆ Dizionario Enciclopedico Italiano, Istituto della Enciclopedia Italiana
fondata da Giovanni Treccani.
Roma, Istituto Poligrafico dello Stato, 1970

- ◆ Rivista mensile N.211\2002
Nuova Elettronica
Bologna, Istituto Litoincisa

- ◆ Enciclopedia multimediale Microsoft
Encarta 2005

APPENDICE

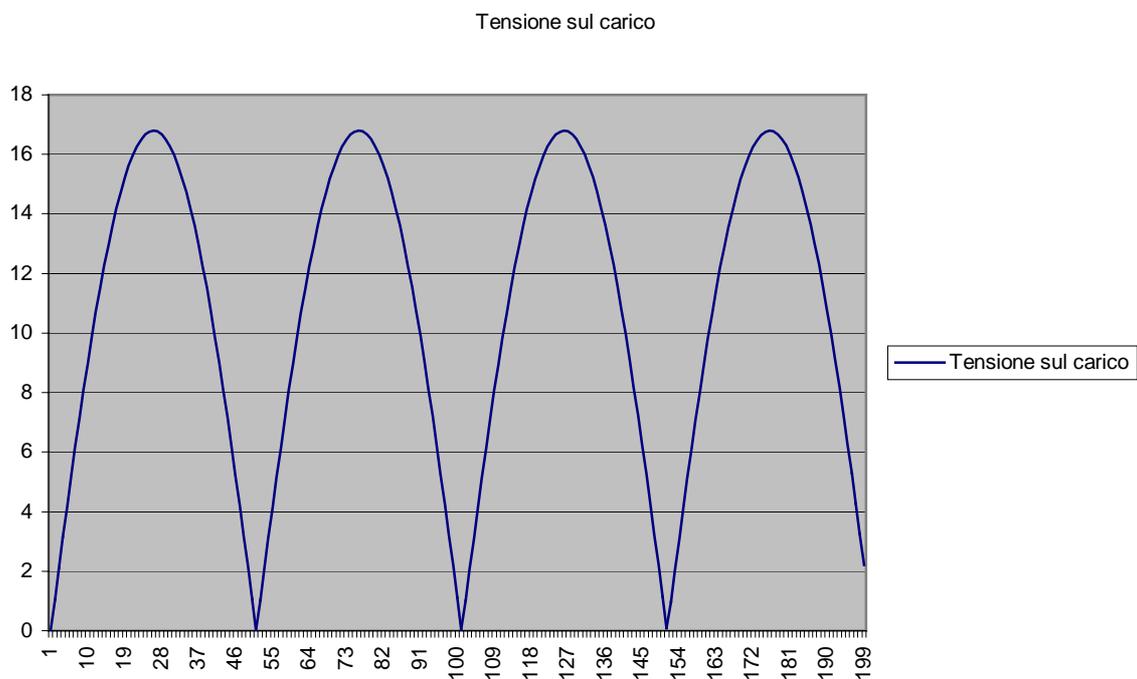
Nella stesura della tesina abbiamo rimandato la trattazione di alcuni argomenti in questa sessione.

Gli argomenti da trattare sono:

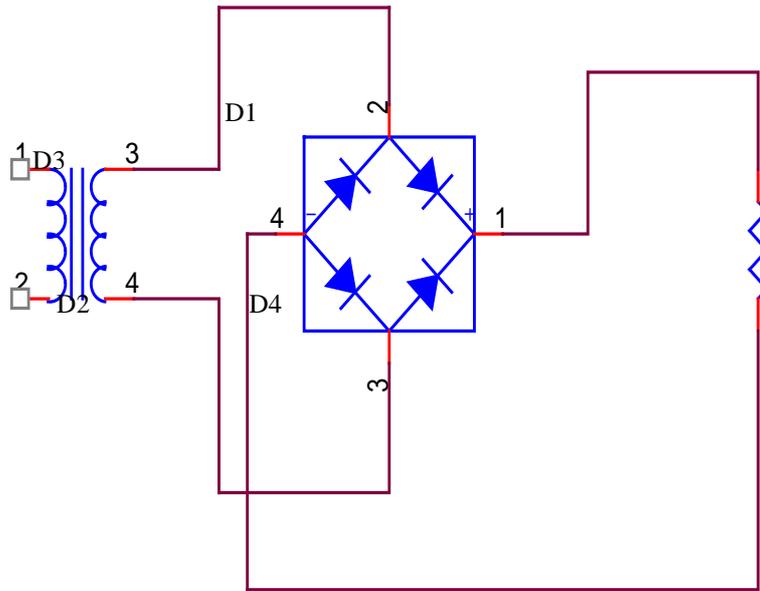
◆ PONTE DI GRAETZ.....	1
◆ DIODI ZENER.....	6
◆ ALIMENTATORE STABILIZZATO.....	14
◆ DIODI LED.....	19
◆ RELE'	23
◆ OPERAZIONALI.....	33
◆ ALIMENTAZIONE SINGOLA.....	53
◆ BJT.....	59

SPIEGAZIONE DEL PONTE DI GRAETZ

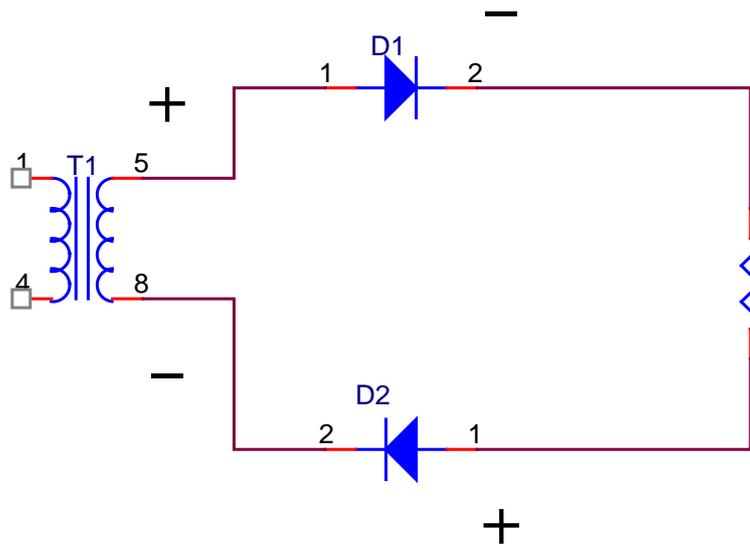
Un significativo miglioramento alle prestazioni di un alimentatore stabilizzato è portato dai circuiti raddrizzatori a doppia semionda. Questi sono circuiti che, in luogo di eliminare le parti negative dell'onda sinusoidale di tensione, le ribaltano, facendole diventare positive come nella figura seguente.

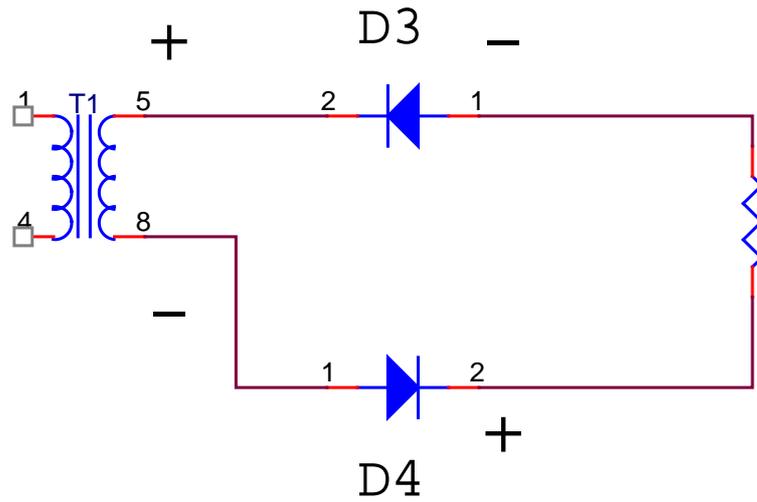


Il circuito è il seguente

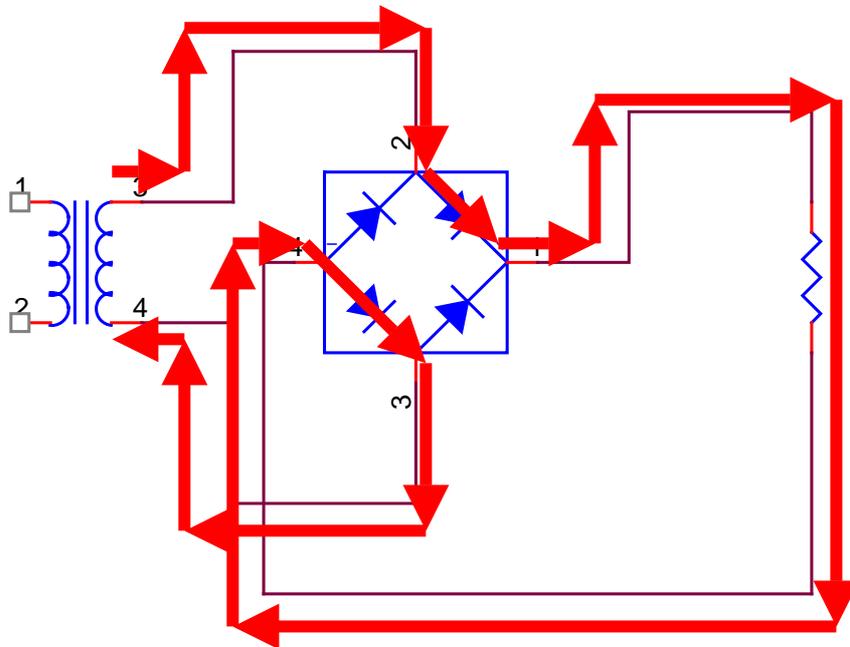


In questo circuito, quando la tensione sul secondario del trasformatore è positiva, il morsetto 3 si trova a potenziale superiore al morsetto 4. Accade allora che i diodi D1 e D2 hanno entrambi l'anodo a tensione superiore rispetto al catodo, sono polarizzati direttamente e conducono, mentre i diodi D3 e D4 hanno il catodo a potenziale superiore rispetto all'anodo per cui non conducono.

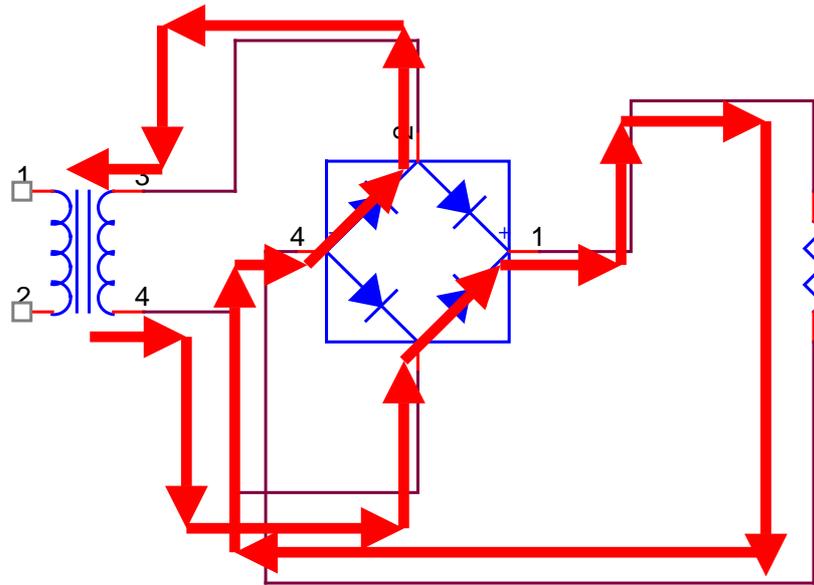




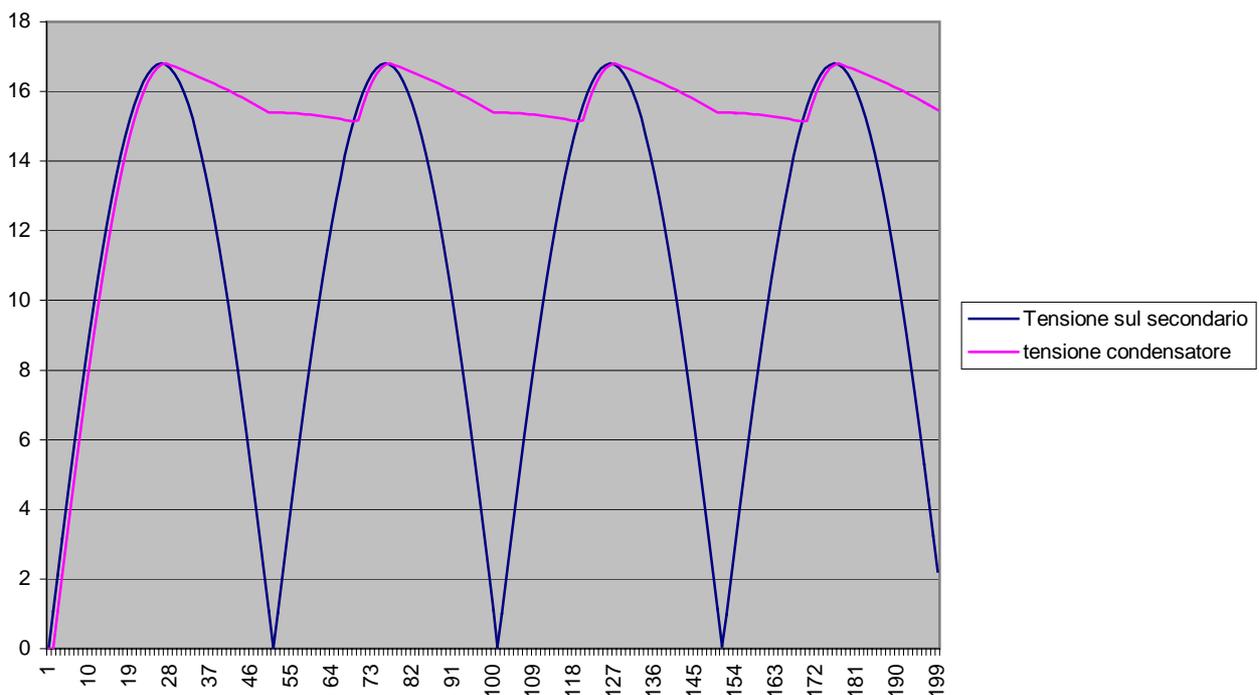
In tal caso, la corrente segue il seguente percorso nel circuito



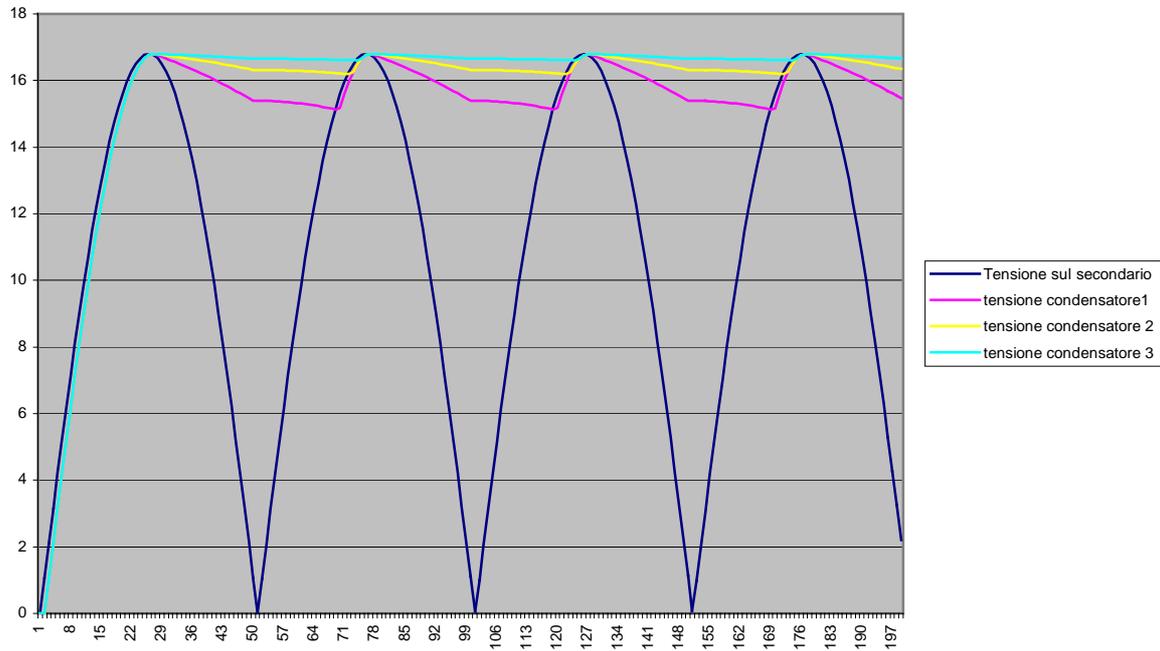
Quando l'onda di tensione assume, invece, valori negativi, i diodi D1 e D2 vengono polarizzati inversamente, mentre i diodi D3 e D4 conducono. Stavolta la corrente segue il seguente percorso nel circuito



Quindi, a differenza del circuito a singola semionda, in un circuito con ponte di Graetz il carico è sempre alimentato. Inoltre per il gioco delle coppie di diodi che conducono alternativamente, la corrente attraversa la resistenza sempre nello stesso verso, per cui la caduta di tensione sul diodo è sempre positiva. Anche in questo caso possiamo migliorare le prestazioni del circuito introducendo un condensatore in parallelo al carico.



Anche in questo caso possiamo migliorare ulteriormente la forma dell'onda aumentando il valore della capacità



DIODI

Un componente elettronico dal comportamento molto particolare è il diodo. Abbiamo visto che applicando una certa tensione ad una resistenza, la corrente che la attraversa corrisponde al rapporto fra la tensione applicata ed il valore della resistenza stessa; questa legge non vale per il diodo.

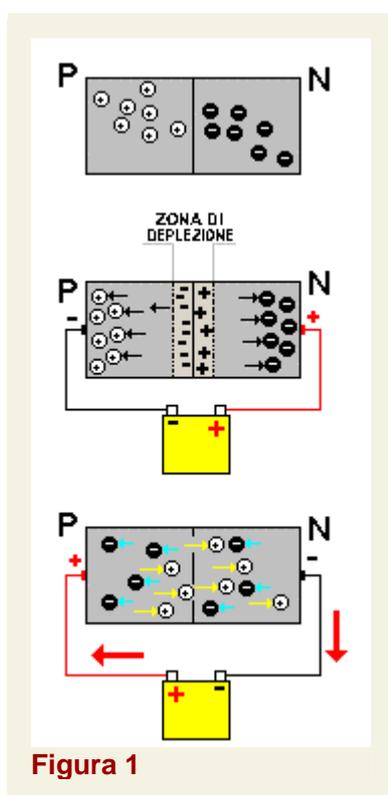


Figura 1

Dal punto di vista fisico-strutturale, il diodo (figura 1, in alto) è costituito da una giunzione "p-n", ovvero da un semiconduttore contenente, adiacenti l'una all'altra, due regioni, drogate una con impurità di tipo "p" ed una con impurità di tipo "n". La regione P, essendo drogata con atomi in difetto di elettroni, tende a catturare elettroni: come si dice, presenta delle buche o lacune. La regione N, essendo drogata con atomi in eccesso di elettroni, tende a perdere gli elettroni in eccesso. Quando la giunzione PN è polarizzata inversamente (figura 1, al centro), ovvero al lato P risulta applicata una tensione negativa ed al lato N una positiva, sia le

lacune della zona P che gli elettroni liberi della zona N vengono attirati dal campo elettrico applicato, per cui la zona centrale si svuota; in tale zona, che viene detta "zona di deplezione", si crea una barriera di potenziale che impedisce il passaggio della corrente; circola soltanto una debolissima corrente dovuta a cariche minoritarie, detta "corrente di drift. Tale corrente è dell'ordine di qualche μA per i diodi al germanio, e di qualche nA per i diodi al silicio. Quando la giunzione PN è polarizzata direttamente (figura 1, in basso), le lacune della zona P vengono sospinte verso la zona centrale

della giunzione dalla polarità positiva applicata; analogamente, gli elettroni liberi della zona N vengono sospinti verso la zona centrale della giunzione dalla polarità negativa; se la tensione è sufficiente a vincere la barriera di potenziale esistente, le buche e gli elettroni si combinano fra loro, dando origine ad una corrente, detta corrente di diffusione, che può anche diventare molto intensa. La tensione necessaria per innescare il flusso di tale corrente è di 0,2 - 0,3 V nel caso di giunzioni al Germanio e di 0,5 V nel caso di giunzioni al Silicio.

Il diodo realizzato con una giunzione PN come appena descritto, viene rappresentato col simbolo che si vede in figura 2 al centro: il lato corrispondente alla zona P viene chiamato "anodo"; il lato corrispondente alla zona N viene chiamato "catodo". Sotto al simbolo è

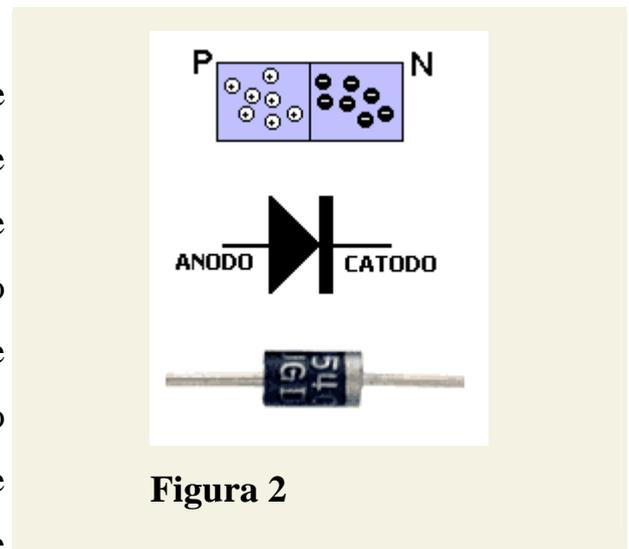


Figura 2

riportata l'immagine di un diodo reale: la fascia argentea indica il catodo; nell'uso normale del diodo, la corrente nel diodo fluisce dall'anodo verso il catodo

Nel suo impiego pratico, il comportamento del diodo è rappresentato nel grafico della figura 3.

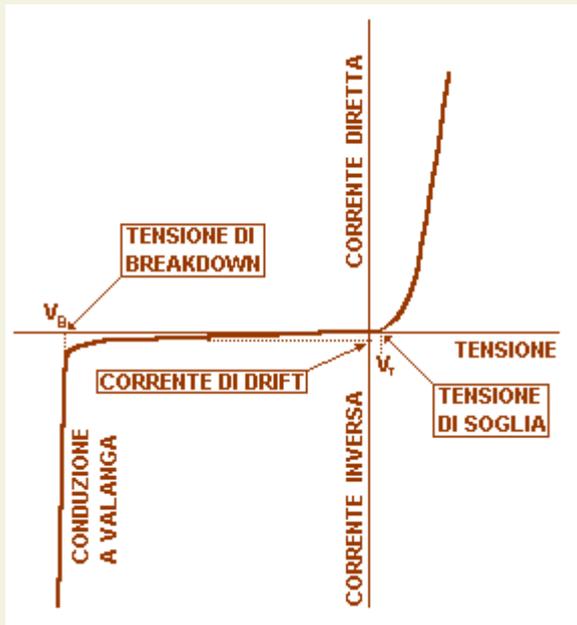


Figura 3

La tensione applicata al diodo si legge sull'asse X (quello orizzontale), mentre sull'asse Y (quello verticale) si legge la corrente che lo attraversa.

Con polarizzazione diretta, ovvero quando all'anodo è applicata una tensione

positiva rispetto al catodo, si osserva che non passa corrente fino al valore di tensione V_T , detto valore di soglia; se la tensione applicata al diodo viene aumentata oltre tale valore, si verifica il passaggio di una corrente tanto più alta quanto maggiore è la tensione applicata. Se il diodo viene polarizzato inversamente, e cioè si applica all'anodo una tensione negativa rispetto al catodo, in pratica non passa corrente, se si esclude una debolissima corrente detta di "drift"; se però si supera un determinato valore di tensione, detto valore di "breakdown", la resistenza del diodo cede improvvisamente, ed ha luogo una conduzione senza limiti, detto "effetto valanga". Poichè normalmente un diodo non viene costruito per funzionare nella regione di breakdown, occorre evitare che questo accada, pena la distruzione irreversibile del diodo, dovuta al brusco aumento della potenza dissipata.

Grazie alle caratteristiche fin qui descritte, il diodo risulta utilissimo nel funzionamento come "raddrizzatore"; inserendo per esempio un

diodo in un circuito percorso da corrente alternata sinusoidale, si verifica che la corrente passa nel circuito solo quando ha la giusta polarità, mentre viene bloccata ogni volta che la polarità si inverte. In pratica, tutte le semionde negative della corrente alternata vengono eliminate, per cui, a valle del diodo, si ottiene una tensione costituita dalle sole semionde positive (tale tensione viene detta "pulsante"). I diodi raddrizzatori vengono prodotti per una vasta gamma di applicazioni; variando le tecniche di costruzione, la percentuale di drogaggio del chip e le sue dimensioni, si possono ottenere diodi in grado di sopportare una corrente massima che varia da 1 A a decine e centinaia di ampere, adatti a tensioni di lavoro da qualche decina a varie centinaia di volt.

Le principali grandezze che caratterizzano un diodo sono:

- **Maximum reverse voltage**: la massima tensione inversa che il diodo può sopportare, senza che si verifichi l'effetto valanga
- **Rated forward current**: la massima corrente (valore medio) che può attraversare il diodo senza distruggerlo; dipende dalla grandezza del chip, e dalla sua capacità di trasmettere all'esterno il calore prodotto
- **Maximum forward voltage drop**: è la massima caduta di tensione ai capi del diodo e dipende dalla corrente che lo attraversa (in senso diretto)
- **Maximum leakage current**: è la corrente di dispersione che fluisce nel diodo quando viene collegato (polarizzato) in senso inverso (purchè la tensione applicata non sia abbastanza elevata da causare l'effetto valanga)
- **Maximum reverse recovery time**: è il tempo che occorre al diodo per passare dallo stato ON allo stato OFF, e cioè dalla conduzione alla non conduzione; è in pratica la "switching speed", cioè la velocità di

commutazione, e dipende dalle dimensioni e dalle caratteristiche del chip.

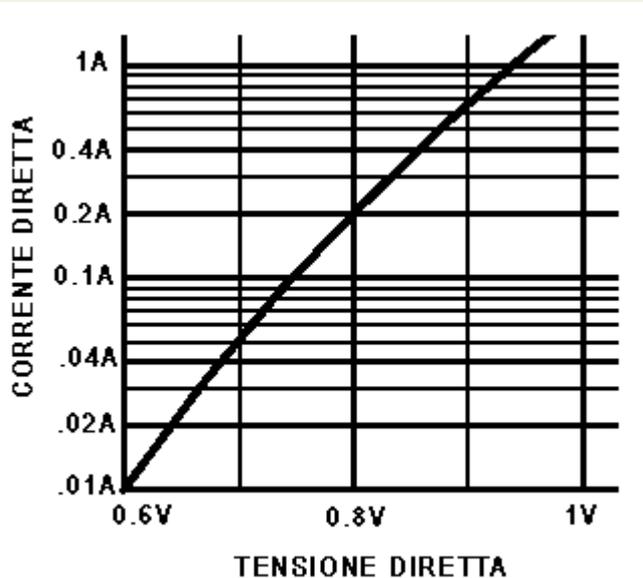


Figura 4

La tensione che cade ai capi del diodo quando questo conduce in senso diretto (maximum forward voltage drop), dipende dal valore della corrente che fluisce nel diodo: come si vede nel grafico a lato, tale caduta di tensione vale circa 0,6V nel momento in cui il diodo comincia a condurre ($I=0,01A$) e diventa, per esempio, di 0,9V quando la corrente che passa nel diodo è $I=0,75A$

DIODI ZENER

Nel precedente paragrafo abbiamo discusso del diodo polarizzato inversamente; si è visto che, applicando al catodo una tensione positiva rispetto all'anodo, scorre soltanto una debolissima corrente, detta "corrente di drift", fino a quando la tensione applicata non raggiunge un valore tale da innescare "l'effetto valanga". Funzionando in tali condizioni, un diodo normale arriva presto alla distruzione per surriscaldamento.

E' tuttavia possibile, drogando fortemente il semiconduttore, ottenere un effetto simile all'effetto valanga, ma diverso per due aspetti fondamentali:

- 1- il fenomeno può ripetersi indefinitamente senza che il diodo si distrugga
- 2- il fenomeno si produce anche a tensioni basse, dell'ordine di

qualche volt.
Tale fenomeno, per cui, a tensione praticamente costante, si verifica un brusco aumento della corrente inversa, viene denominato “effetto Zener”; poichè il processo dipende dall'intensità del campo elettrico applicato, è possibile, modificando lo spessore dello strato a cui viene applicata la tensione, ottenere diodi zener che manifestano l'effetto valanga a tensioni diverse, in un campo che va da circa 4 volt a diverse centinaia di volt.
Grazie alle sue caratteristiche, il diodo zener viene ampiamente sfruttato per realizzare circuiti distabilizzazione della tensione.

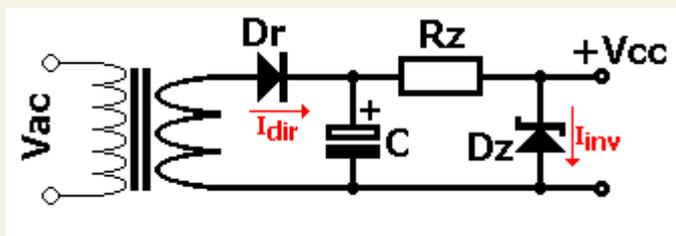


Figura 1

Osserviamo come prima particolarità che, nell'uso normale, mentre un diodo raddrizzatore viene attraversato dalla corrente nel senso anodo-catodo, un diodo zener viene inserito in circuito col catodo rivolto verso il positivo, così da essere attraversato da una corrente inversa nel senso catodo-anodo.
In figura 1 è mostrata l'applicazione di entrambi i diodi:
- D_r è un diodo raddrizzatore, che permette il passaggio della corrente diretta I_{dir} , solo quando la tensione presente sul suo anodo è positiva; vengono così eliminate tutte le semionde negative contenute nella tensione alternata che arriva dal trasformatore
- D_z è un diodo zener, che ha lo scopo di stabilizzare la tensione V_{cc} ; quando la tensione in arrivo tende a salire, la corrente che passa nel diodo zener aumenta in proporzione: poichè la stessa corrente passa

anche nella resistenza R_z , ai capi di quest'ultima si determina una maggiore caduta di tensione, che compensa così l'aumento della tensione in ingresso.

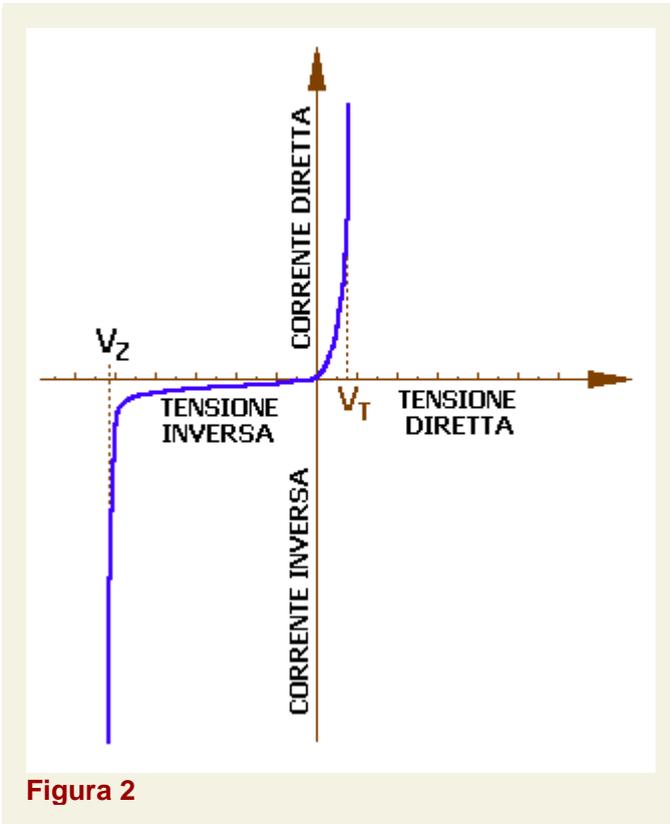


Figura 2

In figura 2 viene evidenziato il funzionamento caratteristico del diodo zener: quando è sottoposto a tensione diretta, il suo funzionamento non si discosta da quello del diodo raddrizzatore; nel funzionamento con tensione inversa vediamo, invece, che l'effetto valanga si manifesta ad una tensione V_Z molto bassa (nel caso specifico a 5,1 V). Questa tensione viene definita "tensione di zener" ed è caratteristica per

quel tipo di diodo.

Il circuito di figura 1 costituisce il più semplice degli alimentatori stabilizzati; il suo impiego è limitato a carichi dall'assorbimento modesto, fino a qualche decina di mA. Il valore della resistenza R_z può essere determinato approssimativamente con la formula:

$$\left(V_i - V_Z \right) : \left(I_c + I_z \right)$$

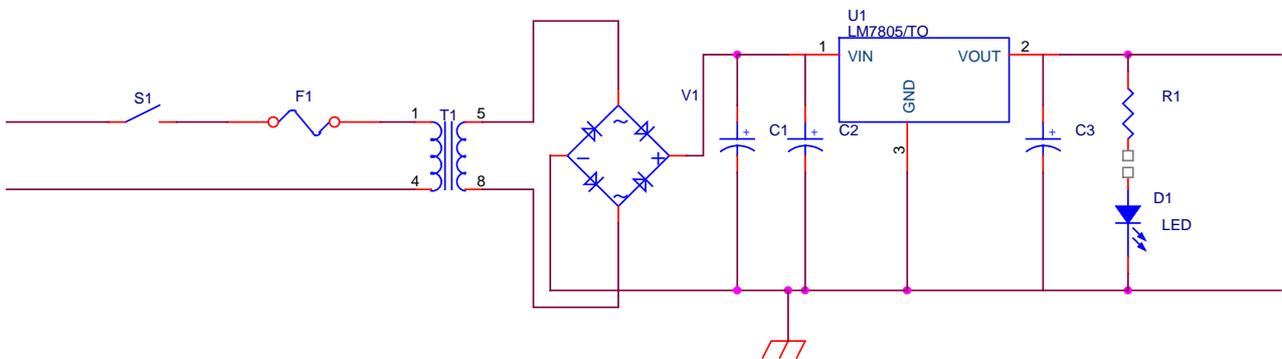
dove V_i è la tensione d'ingresso, V_Z è la tensione del diodo zener (e quindi la tensione di uscita), I_c è la massima corrente che si richiede in uscita.

I_z è la corrente minima che deve passare nel diodo zener perchè questo possa svolgere la sua azione stabilizzatrice: il suo valore cambia da un tipo di diodo all'altro, ma si aggira intorno ai 5÷10 mA.

Un diodo zener è quindi caratterizzato in primo luogo dalla tensione a cui si verifica l'effetto valanga (tensione di zener); importante è poi la massima potenza che il diodo può dissipare senza distruggersi: i diodi di uso più comune sono adatti a potenze comprese fra 0,35 e 1 o 2 W.

PROGETTO DI UN ALIMENTATORE CON VO = +5 V E

$$\underline{I_O = 1 A}$$



IL diodo LED D1 ha la funzione di indicare, quando illuminato, che il circuito è alimentato. La resistenza R1 ha la funzione di limitare la corrente che circola nel diodo evitando che questo venga danneggiato. La resistenza limitatrice R1 viene determinata, applicando la legge di Ohm generalizzata, con la formula

$$R_1 = \frac{5 - 1.7}{15 * 10^{-3}} = 220\Omega$$

avendo posto ad 1,7 V la caduta di tensione sul diodo (se a luce rossa). La corrente imposta è di 15 mA (media fra i valori di 10 e 20 mA, limiti consigliati per il diodo LED).

La tensione minima in ingresso al regolatore, a causa della tensione di dropout sarà

$$V_{\min} = 5 + 2 = 7 V$$

Il ΔV sarà sempre inferiore al 40 % di tale tensione per evitare che il trasformatore alimenti il carico con picchi di corrente di ampiezza troppo elevata

$$\Delta V \leq 40\%V_{\min} = 0.4 * 7 = 2.8V \Rightarrow \Delta V = 2V$$

Per ottenere questo delta si deve scegliere un condensatore di filtro opportuno. Si parte dalla formula approssimata nota dall'elettrotecnica

$$I = C \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

si effettua un'ulteriore approssimazione grafica supponendo che la variazione di tensione avvenga in un intervallo di tempo pari proprio a mezzo periodo per cui

$$C = \frac{I\Delta t}{\Delta V} = \frac{I}{\Delta V} \frac{T}{2} = \frac{I}{\Delta V 2f}$$

la corrente I è la corrente che abbiamo in uscita per cui

$$C = \frac{I}{\Delta V 2f} = \frac{1}{200} = 5mF$$

per cui la tensione massima è

$$V_{\max} = V_{\min} + \Delta V = 7 + 2 = 9 V$$

Per calcolare la tensione sul secondario del trasformatore occorre aggiungere alla tensione massima precedentemente calcolata, anche la caduta di tensione su due diodo. Infatti, ricordando il funzionamento del ponte di Graetz, sappiamo che il percorso fra secondario e regolatore di tensione comprende sempre due diodi alla volta

$$V_{\max \text{ secondario}} = 9 + 2V_D = 9 - 2 = 11V$$

Essendo elevate le correnti che interessano i diodi, abbiamo approssimato le cadute di tensione ad 1 Volt invece dei classici 0,7 V. Tale tensione va incrementata del 10% per tener conto delle perdite sul secondario del trasformatore

$$V_{\max \text{ secondario}} = 11 * 1.1 = 12. V$$
$$V_{\text{eff}} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{12}{1.41} = 8.5 \approx 9 V$$

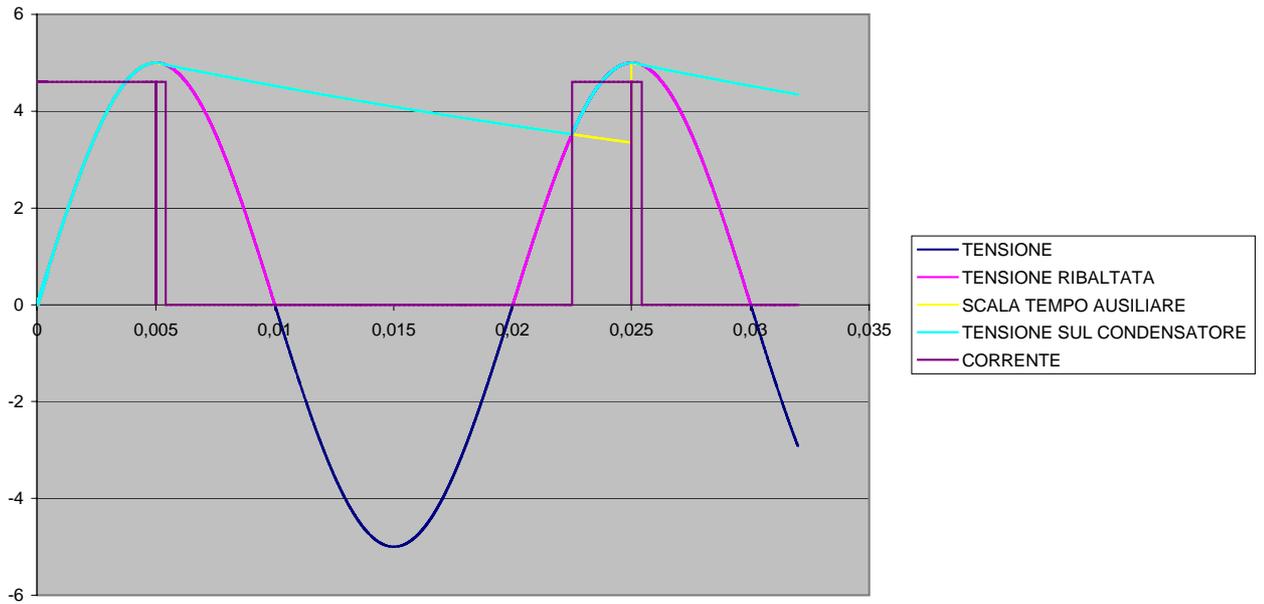
Utilizzeremo dunque un trasformatore 220:9+9.

Per determinare il trasformatore da inserire nel circuito non basta conoscere la tensione efficace che deve fornire sul secondario ma anche la potenza che deve essere in grado di erogare.

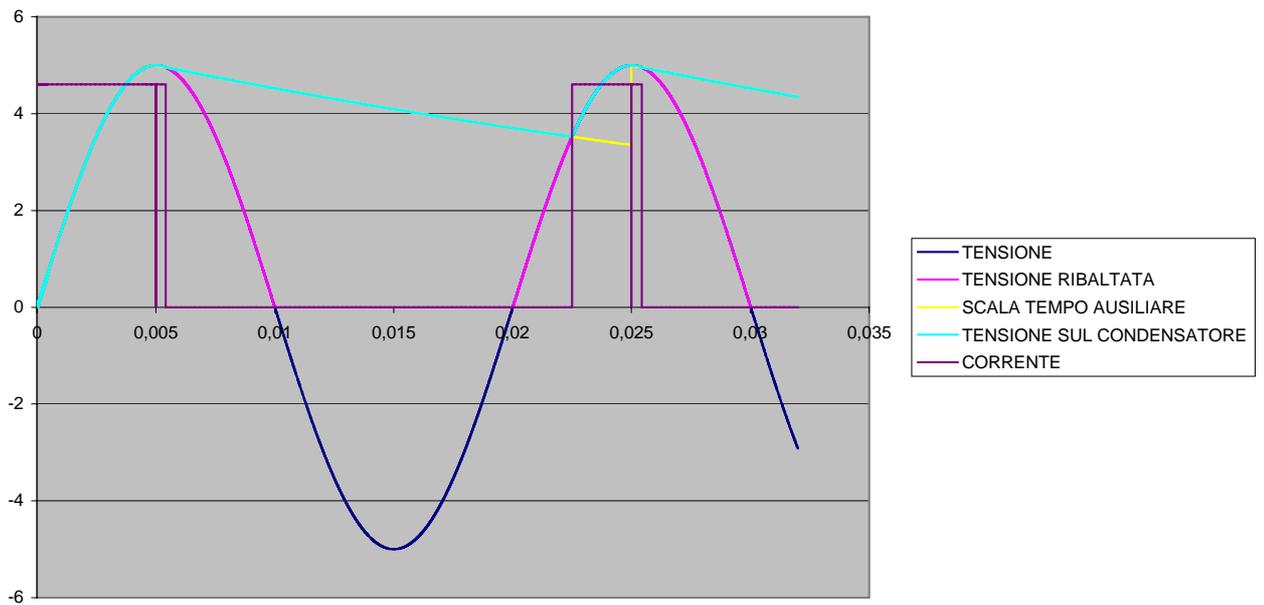
Per calcolare la potenza occorre la corrente efficace. Poiché non siamo di fronte a correnti sinusoidali, la corrente efficace non si può ricavare dalla corrente massima con la formula nota dall'elettrotecnica

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$$

In realtà la corrente ha una forma molto strana. Occorre ricordare che il trasformatore alimenta il circuito soltanto in brevi intervalli di tempo corrispondenti agli istanti in cui il condensatore di filtro si carica. Questa è una simulazione del fenomeno dove le correnti sono approssimate con impulsi rettangolari per un raddrizzatore a singola semionda



Osserviamo la seguente figura:



Se si mantiene il ΔV intorno al 30-40%, si nota che la corrente efficace si può esprimere come

$$I_{\text{eff}} = 1.8I_0$$

per il ponte di Graetz e

$$I_{eff} = 2.2I_0$$

per il circuito raddrizzatore a singola semionda.

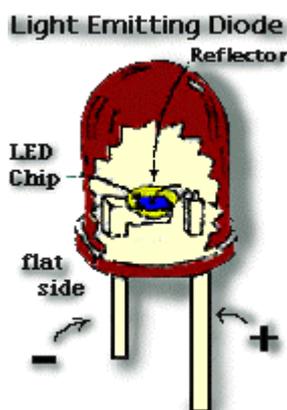
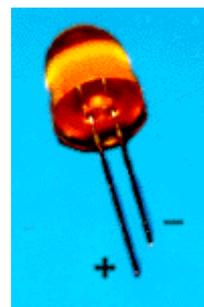
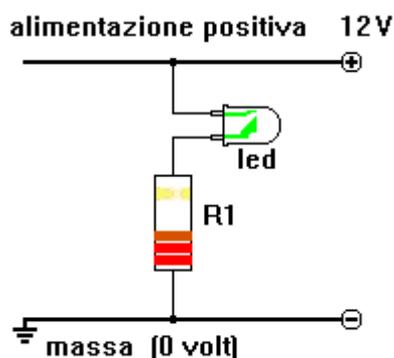
Quindi

$$I_{eff} = KI_0 = 1.8 * 1 = 1.8A$$

$$S = V_{eff} * I_{eff} = 9 * 1.8 = 16VA$$

DIODI LED

I LED o Light Emitting Diode sono particolari diodi a semiconduttori.

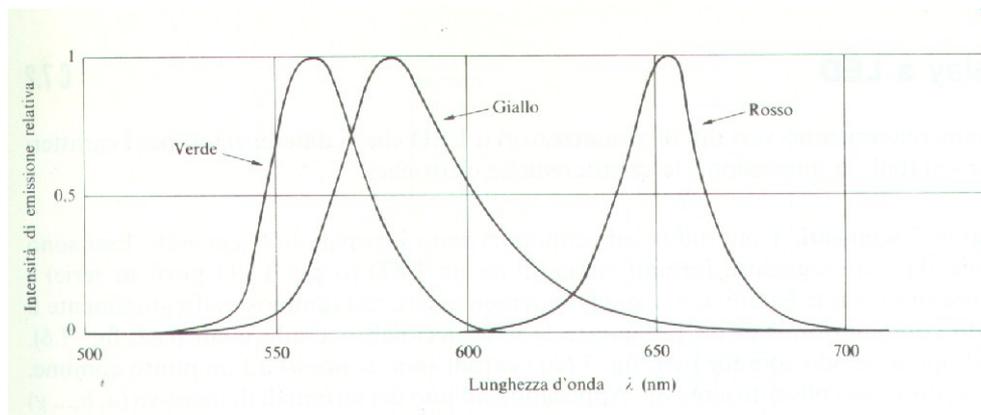
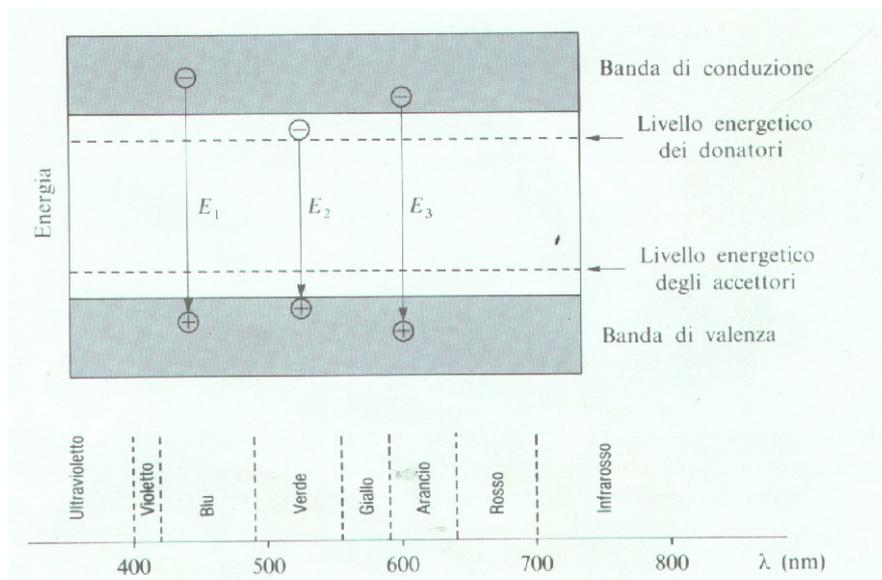


Il semiconduttore utilizzato può essere fosforo di gallio o arseniuro di gallio drogati con zinco o selenio. La struttura di principio di diodo led è identica a quella di un diodo normale. Quando il diodo è polarizzato direttamente elettroni e lacune si incontrano a cavallo della giunzione e avviene la ricombinazione. Occorre ora ricordare che un elettrone libero possiede più energia di un elettrone vincolato in un orbitale. Quando l'elettrone si ricombina con una lacuna deve dunque cedere l'energia in più che possiede. Ciò avviene attraverso l'emissione di un fotone. Dimostriamo con la formula seguente dimostra che ciò equivale all'emissione di una radiazione di lunghezza d'onda λ , tale che detta E l'energia del fotone vale la relazione

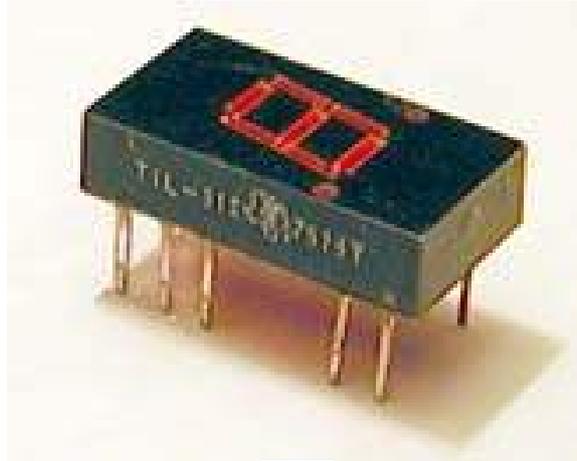
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

dove c è la velocità della luce pari a $2,998 \cdot 10^8$ metri al secondo e h rappresenta la cosiddetta costante di Planck pari a $6,626 \cdot 10^{-34}$ Joule*secondo.

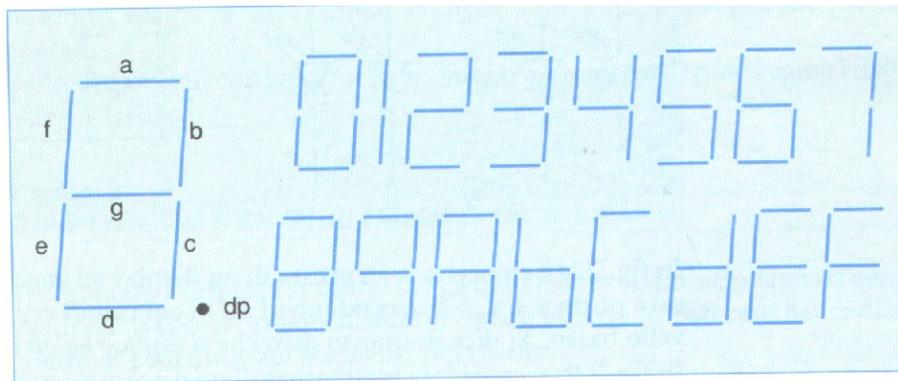
Questo fenomeno avviene in ogni diodo. Nei diodi LED, però, la frequenza delle radiazioni emesse è tale che esse sono visibili all'occhio umano (cioè la lunghezza d'onda è compresa fra 400 e 700 nanometri o miliardesimi di metro)



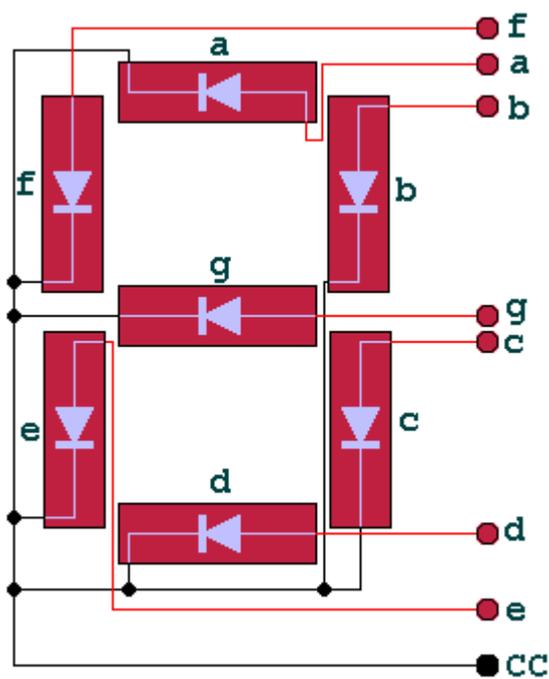
I display sono dispositivi per visualizzare informazioni valori numerici che originano dalle elaborazioni dei vari circuiti digitali



I più diffusi sono i display a sette segmenti

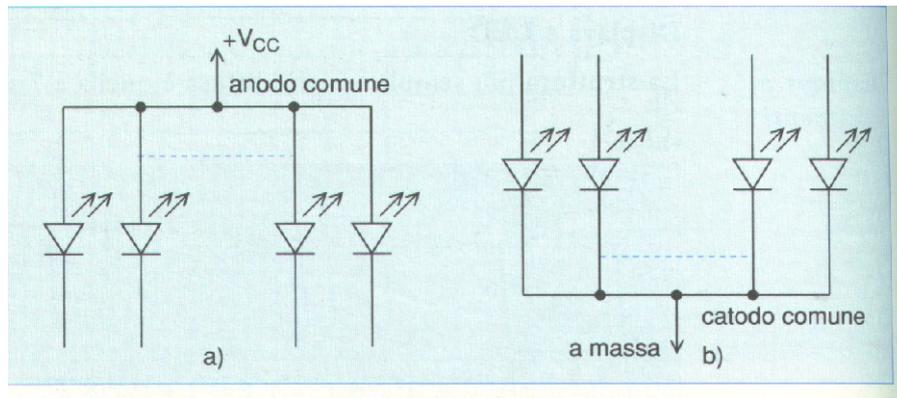


essi sono costituiti da sette led.



L'accensione dei led giusti consente di comporre tutte le cifre da 0 a 9 e le lettere dell'alfabeto da A ad F, consentendo la visualizzazione di cifre esadecimali.

I led possono essere collegati in una configurazione detta ad anodo comune oppure a catodo comune.



Nel primo caso illustrato dalla figura di sinistra, i led hanno tutti l'anodo collegato alla Vcc. Per accendere un segmento allora dobbiamo polarizzarlo direttamente, portando a zero il segnale collegato al suo catodo, altrimenti esso rimarrà spento. Nell'altra configurazione, i led hanno tutti il catodo in comune. Per accendere un led dobbiamo portare a livello logico alto il segnale corrispondente. Ad esempio, se vogliamo visualizzare il numero 1, dobbiamo far illuminare i segmenti b e c. se il display è a catodo comune, i segnali collegati ai segmenti a, d, e, f, g devono essere a livello basso e i segnali b e c devono essere a livello alto. Nel caso del display ad anodo comune, i segnali collegati ai segmenti a, d, e, f, g devono essere a livello alto e i segnali b e c devono essere a livello basso.

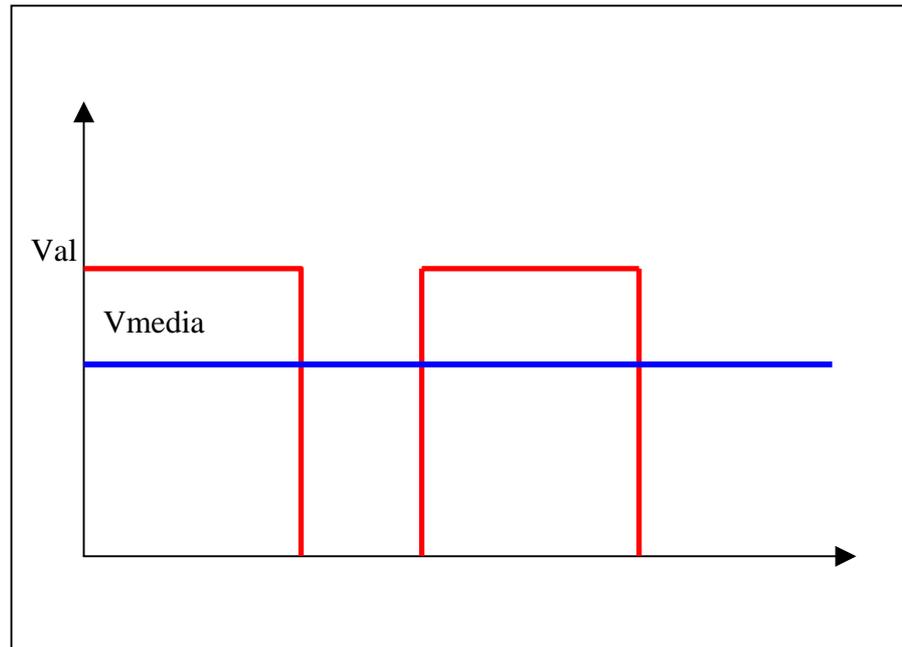
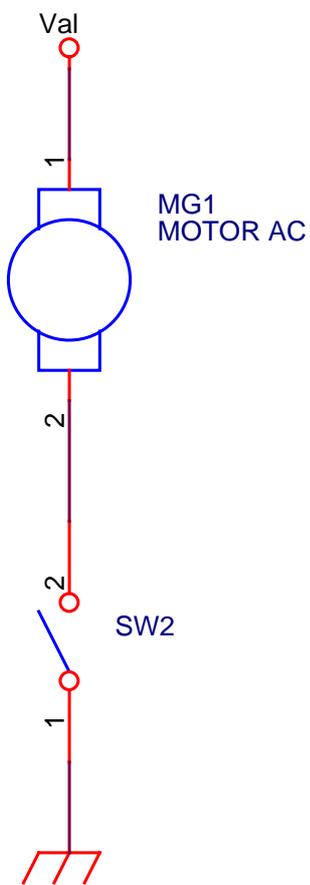
SPIEGAZIONE DEL RELE'



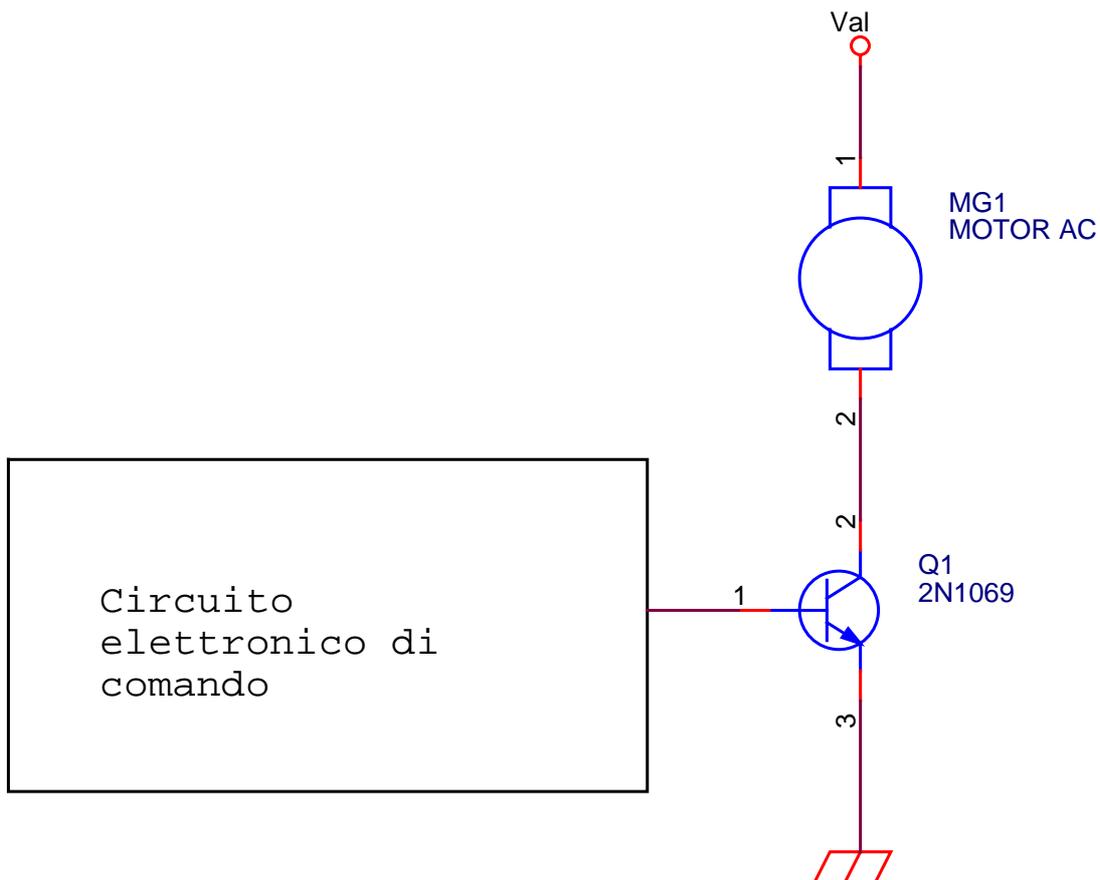
I relè sono dispositivi che consentono l'interfacciamento di dispositivi di potenza, interessati da correnti elevate, e circuiti elettronici. Facciamo un esempio per capire il concetto. Supponiamo di avere un motore in corrente continua di cui vogliamo controllare la velocità. La velocità del motore si potrebbe variare variando la tensione di alimentazione del motore. E' però problematico controllare la tensione di alimentazione. Una possibile tecnica alternativa è il cosiddetto controllo PWM (Pulse Width Modulation). Questa tecnica di controllo prevede che la tensione di alimentazione sia costante, ma che mediante un interruttore si provveda a togliere periodicamente l'alimentazione al motore. Se si aziona l'interruttore

con sufficiente frequenza il motore non si fermerà ma subirà un rallentamento.

L'effetto complessivo che si ha è equivalente ad alimentare il motore con una tensione media inferiore a quella di alimentazione.



Questo pulsante deve però essere controllato in qualche modo da un circuito elettronico, potrebbe essere ad esempio, un BJT che funzioni fra saturazione (corto circuito – interruttore chiuso) e interdizione (circuito aperto – interruttore aperto).



ma questo significa che il circuito elettronico deve essere attraversato dalla stessa corrente che interessa il circuito di potenza, il che è improponibile poiché danneggerebbe sicuramente il circuito elettronico. Occorrerebbe un dispositivo capace di permettere la comunicazione fra i due tipi di circuiti garantendo però la loro separazione galvanica (impedendo in sostanza alle correnti che attraversano il circuito di potenza di passare nel circuito elettronico). Questo dispositivo è il relè. Nella figura seguente vediamo la sua struttura di principio.

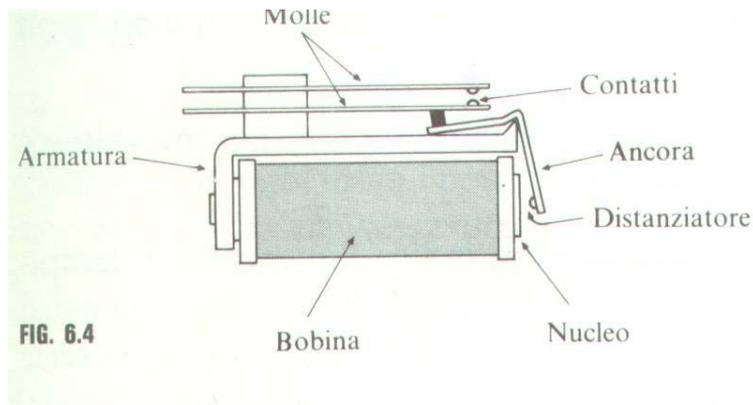
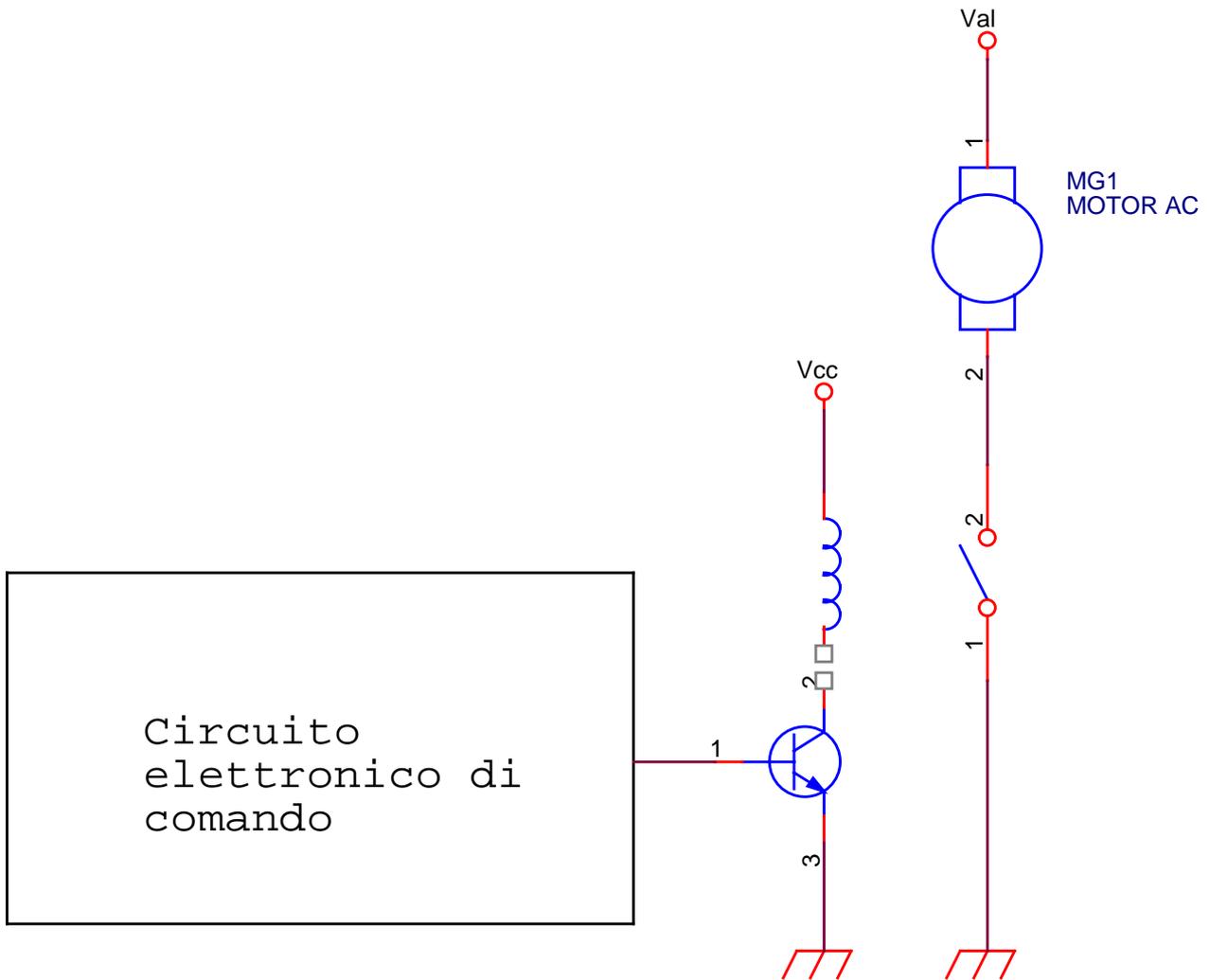


FIG. 6.4

abbiamo una bobina avvolta su un nucleo di ferro dolce. Quando essa è attraversata da una corrente di eccitazione, genera un campo magnetico che attrae un'ancora che può ruotare intorno ad un fulcro. L'ancora, ruotando, spinge verso l'alto una lamella di materiale conduttore elastica, che va a chiudere un contatto con un'altra lamella, chiudendo il circuito elettrico. Naturalmente la bobina è collegata al circuito elettronico di bassa potenza e le lamelle chiudono il circuito di potenza. Il distanziatore è un blocchetto di materiale non ferromagnetico (ad esempio rame) che mantiene sempre una certa distanza o traferro fra bobina e ancora in modo da assicurare che quando la bobina non è più eccitata, il magnetismo residuo nel nucleo continui ad attrarre l'ancora tenendo chiuso il circuito di potenza. Il motore potrebbe allora essere controllato dal circuito seguente

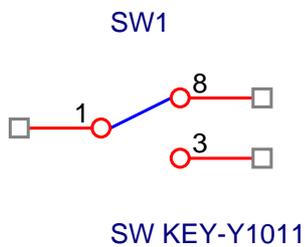


Tipi di contatto

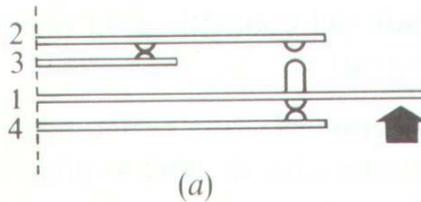
Abbiamo tre tipi di contatto sostanzialmente

1. Contatto normalmente aperto (NA oppure Normally Open o NO): in questo caso il contatto si chiude soltanto se viene eccitata la bobina
2. Contatto normalmente chiuso (NC o Normally Closed) che si apre quando viene eccitata la bobina

3. Contatto di scambio (SPDT Single Pole Double Throw): in questo caso in luogo di un interruttore abbiamo più propriamente a che fare con un deviatore



All'eccitazione della bobina il contatto si sposta aprendo il circuito che prima era chiuso e chiudendo l'altro circuito. In un relè possono coesistere più contatti contemporaneamente tutti comandati dalla stessa bobina. Se guardiamo, ad esempio, alla figura seguente



notiamo che l'eccitazione della bobina e il conseguente movimento dell'ancora, provoca contemporaneamente l'apertura del contatto 2-3, la chiusura del contatto 2-1 e l'apertura del contatto 1-4

Parametri di un relè

➤ Tensione di alimentazione

La tensione di alimentazione della bobina del relè può essere continua o alternata. Valori tipici della tensione di alimentazione continua sono 3, 5, 6, 12, 24, 48 volt.

➤ Resistenza di avvolgimento

Valore della resistenza offerta dalla bobina

Configurazione dei contatti

Indica il tipo e la quantità dei contatti presenti nel relè. In genere la lettera A indica un contatto normalmente aperto, la B un contatto normalmente chiuso, le lettere U o C il contatto di scambio. Il relè della figura in esempio precedente, con due contatti normalmente chiusi ed un contatto normalmente aperto verrebbe allora denotato come $1xA+2xB$

➤ Portata in corrente e in tensione dei contatti

Massimi valori di tensione e corrente sopportabili dai contatti mobili del relè

➤ Resistenza iniziale dei contatti

E' la resistenza offerta dai contatti chiusi, quando sono nuovi e non ancora deteriorati dall'usura

➤ Resistenza di isolamento

Resistenza offerta dai contatti aperti (dell'ordine delle centinaia di megaohm)

➤ Frequenza massima di commutazione

Numero massimo di commutazione di contatti in un secondo

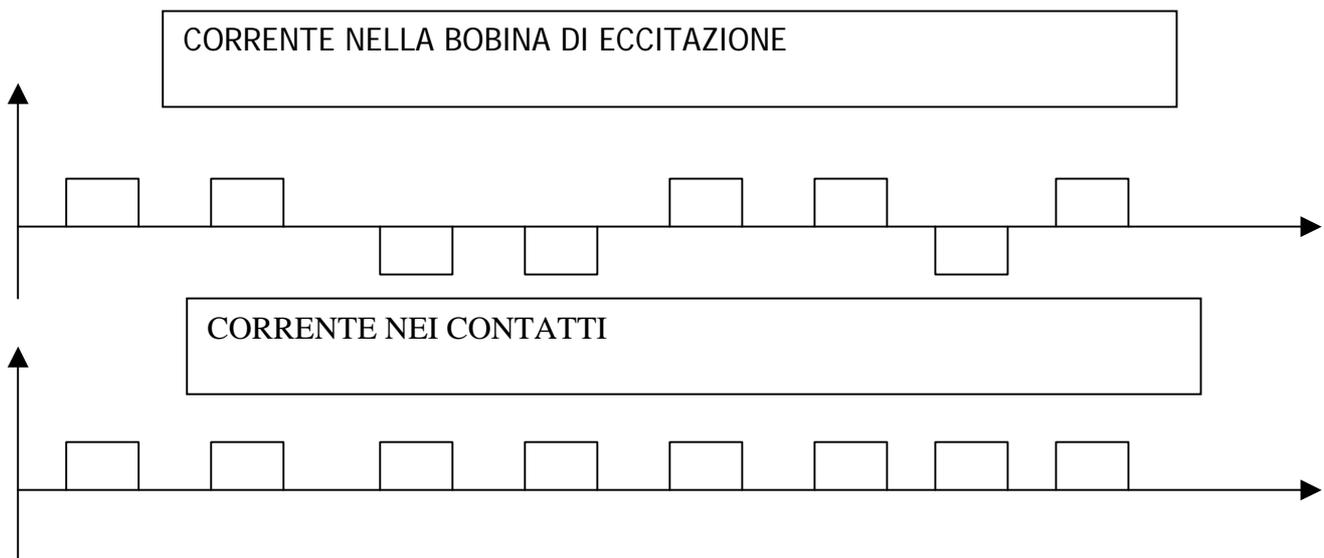
Classificazione dei relè

Relè neutri

Il relè di principio descritto è neutro cioè i contatti vengono attivati qualunque sia il verso della corrente di eccitazione nella bobina. Se

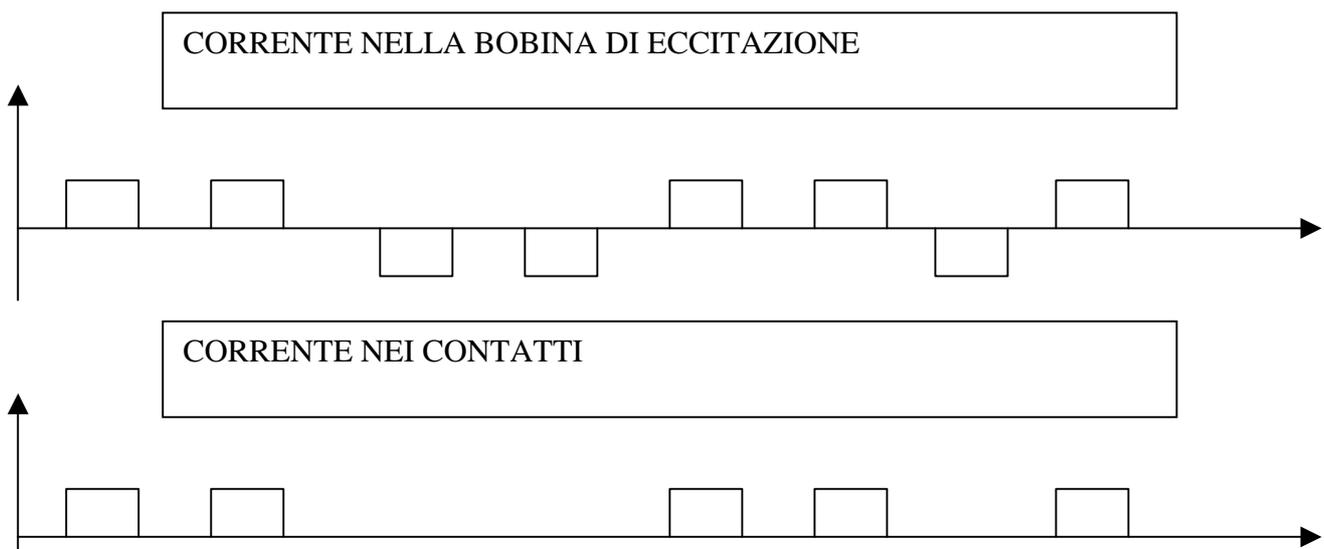
consideriamo, ad esempio il seguente grafico, in cui diagrammiamo la corrente che attraversa la bobina di eccitazione

Otteniamo il seguente diagramma per la corrente che attraversa un contatto normalmente aperto.



Relè polarizzati

Complicando la struttura di principio del relè si possono ottenere relè polarizzati, in cui cioè l'attivazione del contatto si ha soltanto se la corrente di eccitazione della bobina ha il verso giusto. Ritornando all'esempio di prima avremmo che il contatto normalmente aperto si chiuderebbe soltanto di fronte, ad esempio, soltanto ad impulsi positivi della corrente di eccitazione

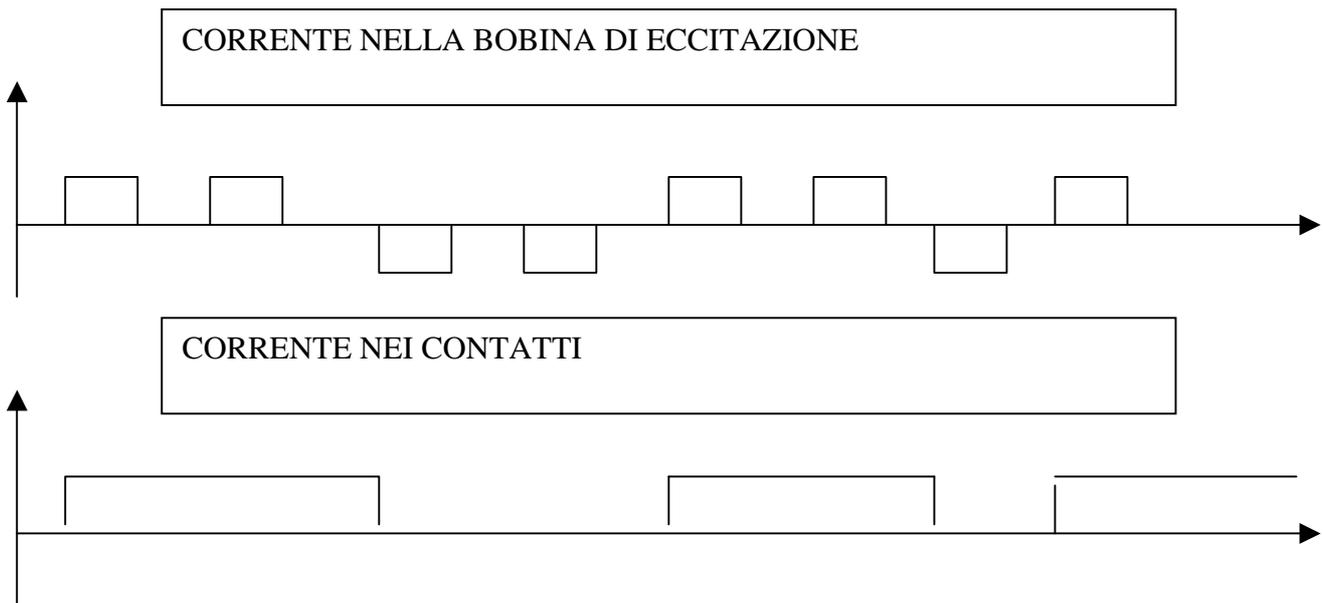


Relè monostabili

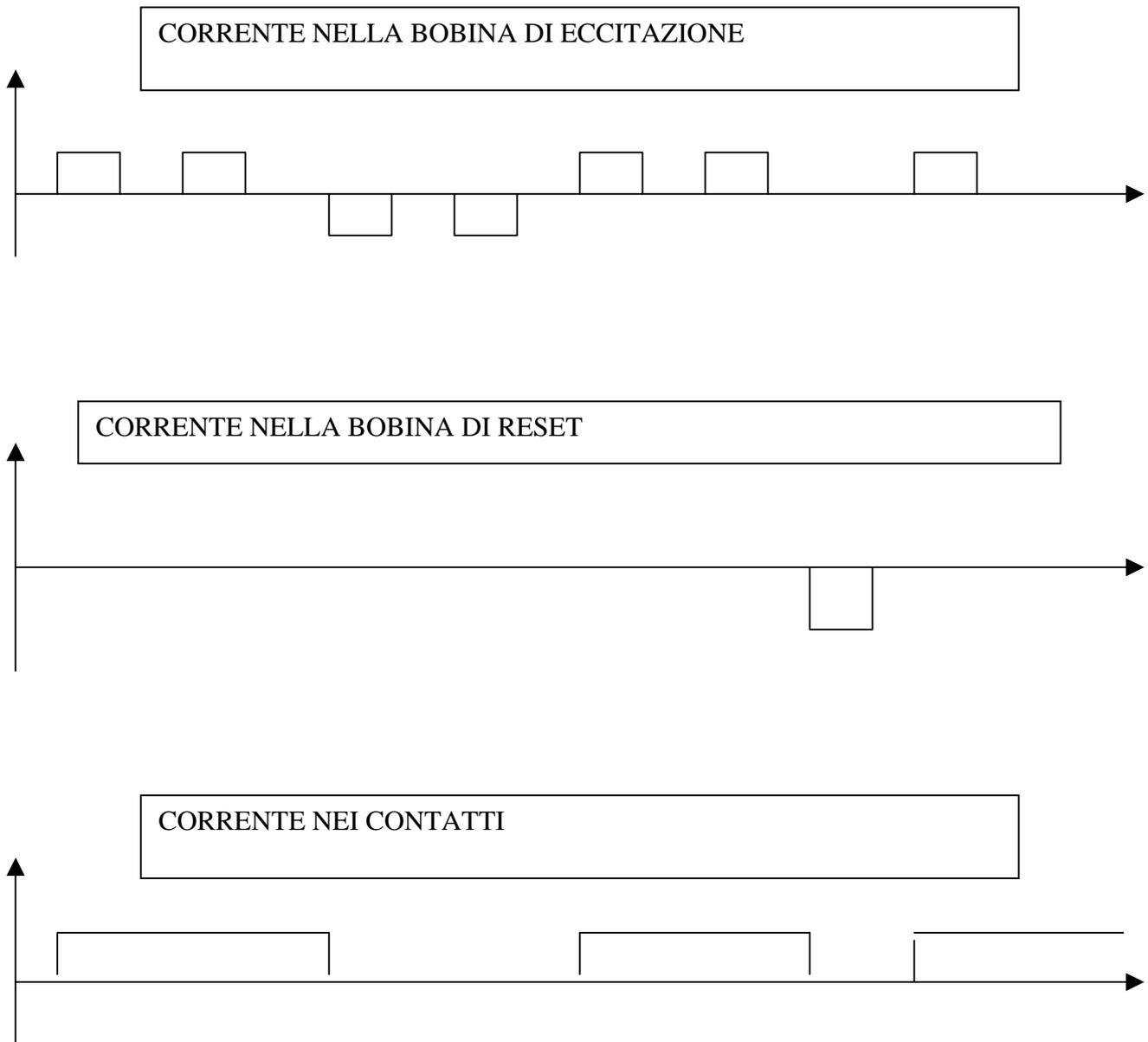
Un relè monostabile è un relè in cui i contatti hanno un solo stato normale di stabilità, ad esempio normalmente aperto, stato da cui escono quando si eccita la bobina. Appena cessa la corrente di eccitazione il contatto torna alla sua posizione di partenza.

Relè bistabili

I relè bistabili, invece, hanno due condizioni di stabilità. Se ad esempio, il contatto è aperto, all'eccitazione della bobina esso si chiude. Anche se si diseccita la bobina esso continua a rimanere chiuso e si apre soltanto se si eccita di nuovo la bobina.

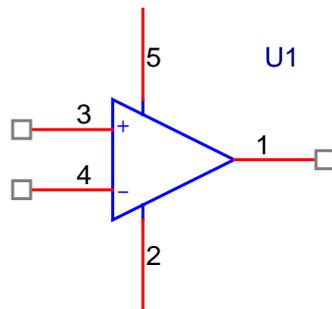


Esistono anche relè bistabili a due bobine. In questo caso si varia la posizione dei contatti anche con impulsi sulla seconda bobina.



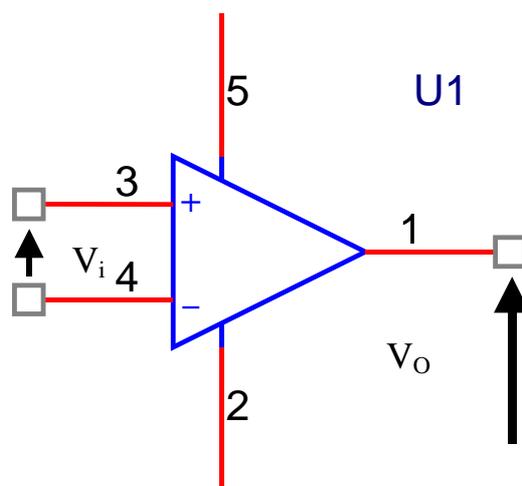
AMPLIFICATORI OPERAZIONALI

Un amplificatore operazionale è un dispositivo integrato il cui simbolo circuitale è il seguente



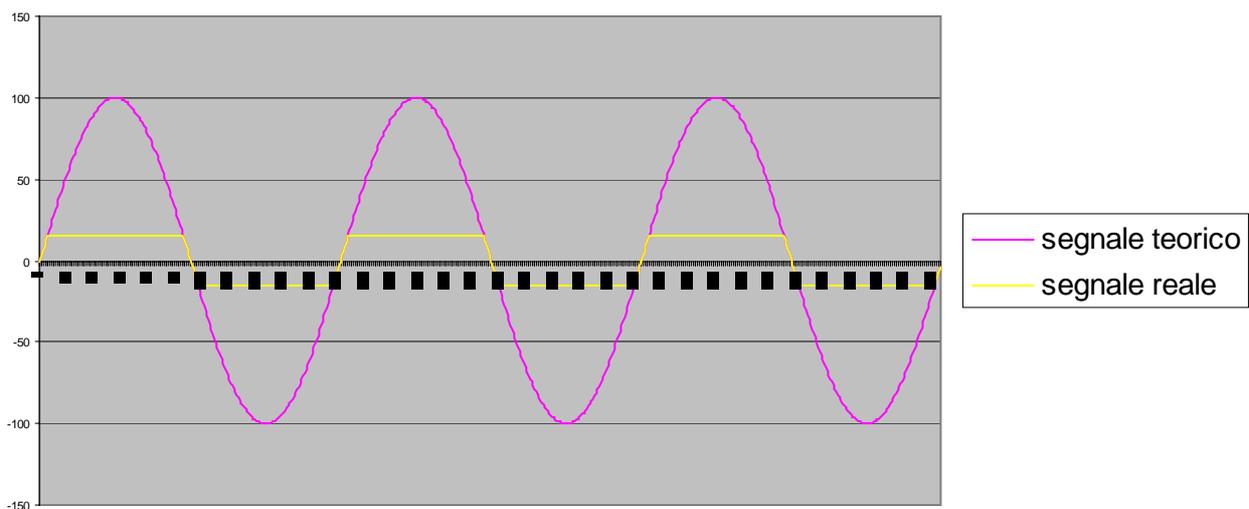
il morsetto 1 è il morsetto di uscita. La tensione di uscita andrà prelevata fra questo morsetto e la massa del circuito in cui esso è inserito. Abbiamo poi i due morsetti di ingresso 3 e 4. il morsetto indicato con il segno + è detto morsetto non invertente, l'altro è detto morsetto invertente. I morsetti 5 e 2 sono morsetti di alimentazione, l'operazionale, infatti, nella generalità dei casi necessita di un'alimentazione simmetrica duale.

Teoricamente tale dispositivo dovrebbe amplificare il segnale presente fra i due morsetti di ingresso



il guadagno $A_{VO} = V_o/V_i$ detto guadagno ad anello aperto, è però, un valore elevatissimo, dell'ordine di 10^5 . Ciò comporta che

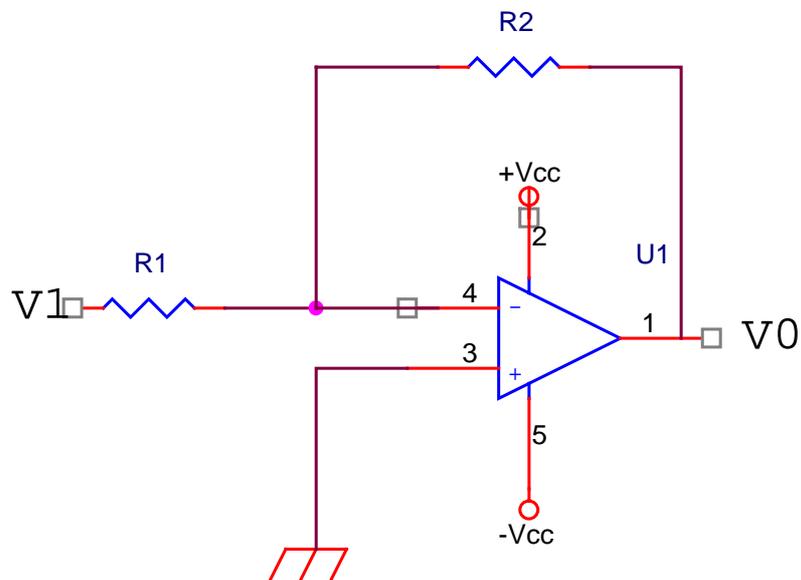
l'operazionale non si può utilizzare in questo modo per amplificare segnali. Supponiamo, ad esempio, di voler amplificare un segnale sinusoidale la cui ampiezza massima sia 1 mV. Dovremmo avere in uscita un segnale di ampiezza pari a 100 V, ma questo è improponibile. Nella realtà il segnale di uscita non può superare il range di valori imposto dalla tensione di alimentazione. Se, ad esempio, l'operazionale è alimentato con tensioni di +15 e -15 volt il segnale di uscita sarà compreso fra questi valori. Per essere più precisi il valore minimo della V_O supererà di 1-2 volt il valore della tensione di alimentazione negativa mentre il valore massimo sarà inferiore di 1-2 volt rispetto al valore della tensione di alimentazione positiva. Ciò che otterremo in uscita è rappresentato nella figura seguente



Abbiamo, in pratica, una forte distorsione del segnale di ingresso con la conseguente perdita di informazioni ad esso associate.

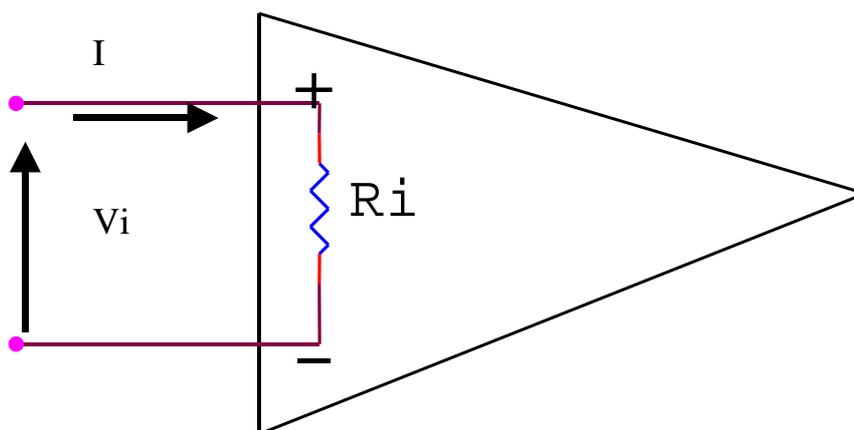
Per usare l'operazionale come amplificatore dovremo allora inserirlo una configurazione circuitale tale da limitare il guadagno di tensione.

CONFIGURAZIONE INVERTENTE



Per analizzare questo circuito dobbiamo introdurre delle ipotesi semplificative sull'operazionale:

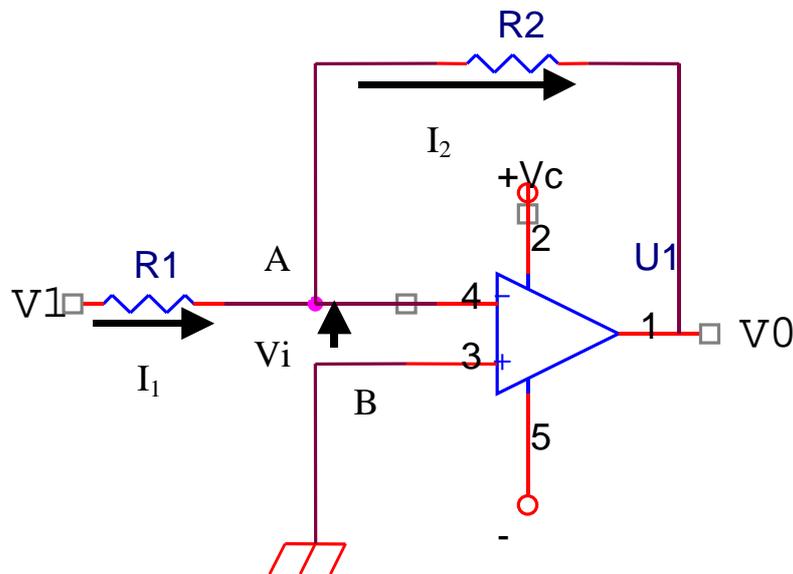
- la prima ipotesi semplificativa è di supporre A_{VO} infinito. Nella realtà come già accennato, abbiamo un guadagno elevatissimo (valori tipici 200.000).
- la seconda ipotesi semplificativa è che la resistenza d'ingresso



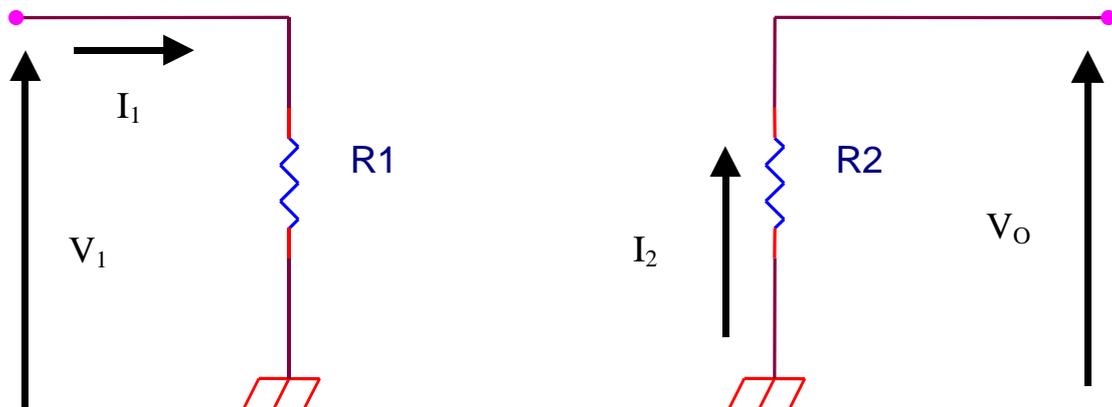
intesa come il rapporto fra la tensione d'ingresso e corrente assorbita dai morsetti d'ingresso, sia infinita. Nella realtà la R_i ha un valore elevatissimo dell'ordine del megaohm o addirittura del gigaohm.

Applichiamo ora tali ipotesi al nostro circuito. Se applichiamo la prima ipotesi osserviamo che, poiché $A_{vo} = \frac{V_o}{V_i}$, possiamo scrivere

$$\text{anche che } V_i = \frac{V_o}{A_{vo}} = \frac{V_o}{\infty} = 0$$



Il fatto che V_i sia nulla comporta che i nodi A e B siano allo stesso potenziale. Poiché il nodo B è collegato a massa si trova a potenziale zero, ma allora anche A si trova a potenziale zero pur non essendo fisicamente collegata a massa. Si dice che A è a *massa virtuale*.



si avrà

$$i_1 = v_1/R_1$$

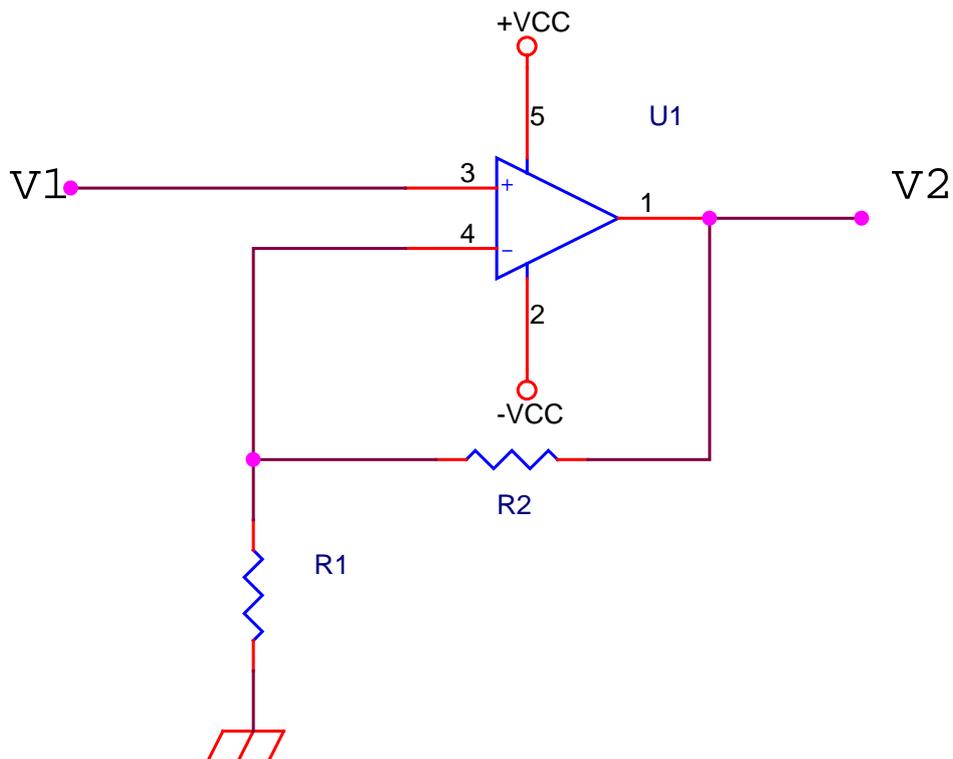
$$i_2 = -v_2/R_2.$$

Nel secondo caso il segno – è dovuto al fatto che corrente e tensione non rispettano la convenzione dell'utilizzatore. Applicando la seconda ipotesi si ha che l'operazionale non assorbe corrente per cui $i_1=i_2$. In definitiva

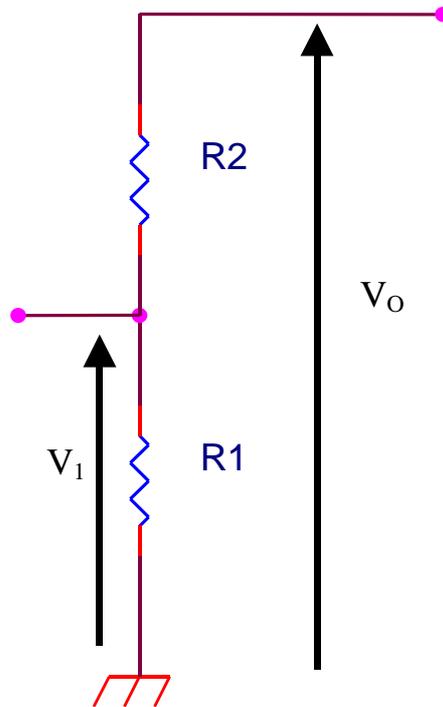
$$\frac{V_1}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2} \Rightarrow \frac{V_o}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Scegliendo opportunamente i valori delle resistenze possiamo realizzare il guadagno che vogliamo. Se, ad esempio $R_2 = 10 \text{ Kohm}$ e $R_1 = 1 \text{ Kohm}$ otteniamo un guadagno $A_V = 10$.

CONFIGURAZIONE NON INVERTENTE



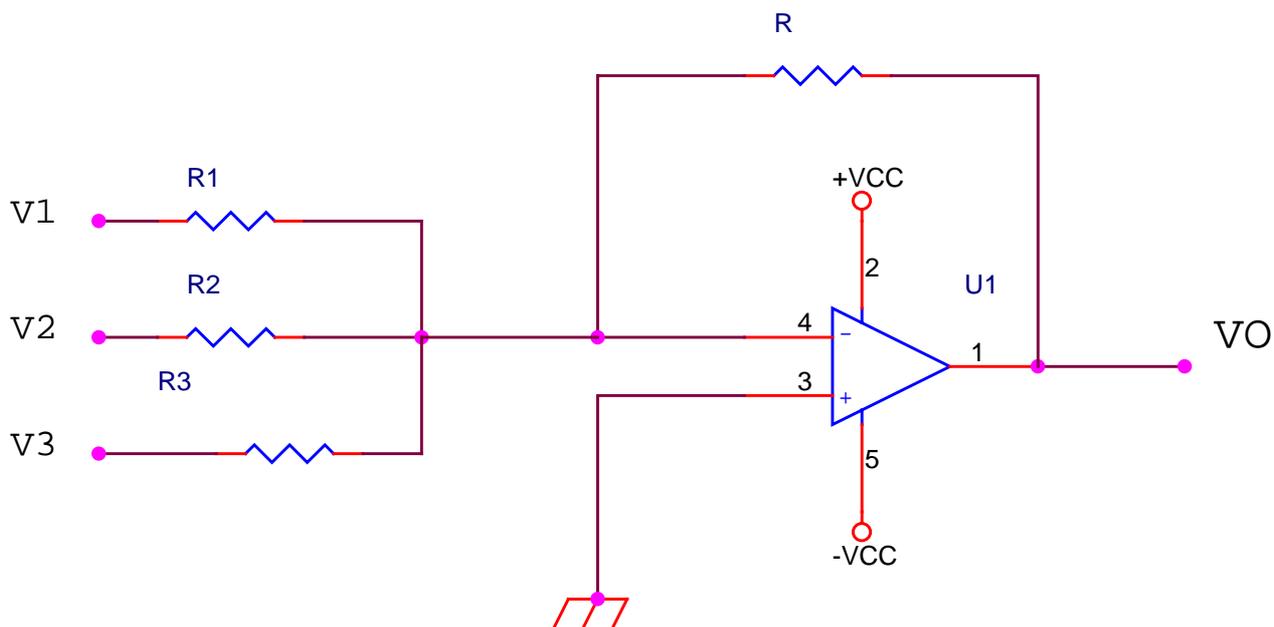
In questo circuito applicando 'ipotesi di considerare A_{VO} infinita abbiamo che i morsetti 3 e 4 si trovano allo stesso potenziale. Ora il morsetto 4 è collegato ad uno dei morsetti della resistenza R_1 mentre il morsetto 3 è collegato alla tensione d'ingresso V_1 . Ne deriva che la tensione ai capi di R_1 e la tensione d'ingresso coincidono. Se applichiamo la seconda ipotesi semplificativa circa la resistenza d'ingresso dell'operazionale si ha che non si ha assorbimento di corrente ai morsetti dell'operazionale, per cui nelle resistenze R_1 ed R_2 circola la stessa corrente. Le due resistenze sono dunque in serie. Possiamo riassumere la situazione nel modo seguente



Applicando la formula del partitore di tensione si ha

$$V_1 = V_O \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow V_O = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1 \Rightarrow V_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_1$$

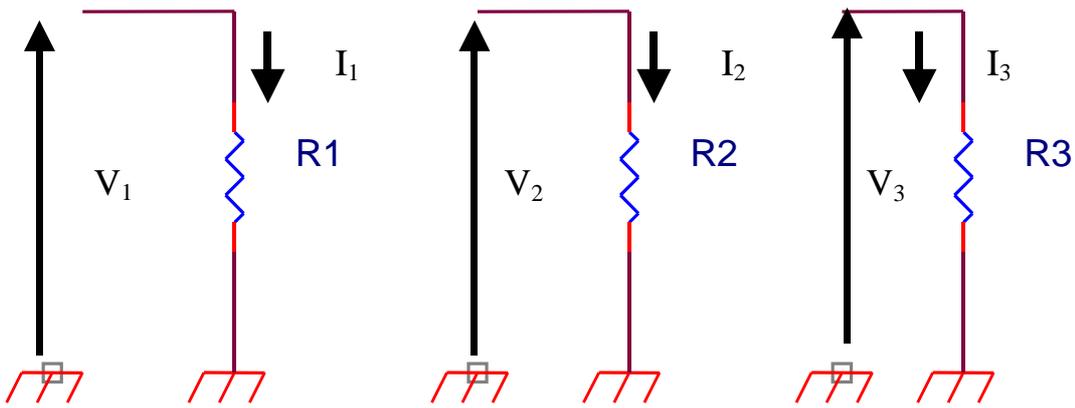
SOMMATORE INVERTENTE



Con questo circuito possiamo ottenere in uscita un segnale che sia la combinazione lineare dei segnali d'ingresso. Con una opportuna scelta dei valori dei resistori avremmo in uscita, a meno del segno, la somma dei segnali di ingresso da cui il nome di tale configurazione.

Nell'esempio di figura abbiamo un sommatore con tre ingressi.

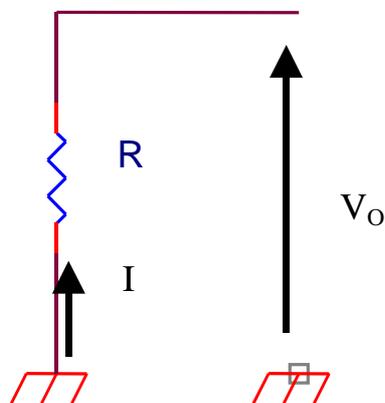
Analizziamo il circuito usando le due ipotesi semplificative dell'operazionale ideale. L'ipotesi dell' A_{VO} infinita porta come al solito a dedurre che il morsetto 4 si trova a massa virtuale. Dal punto di vista delle tensioni posso allora disegnare tutte le resistenze d'ingresso in questo modo



Abbiamo dunque tre correnti:

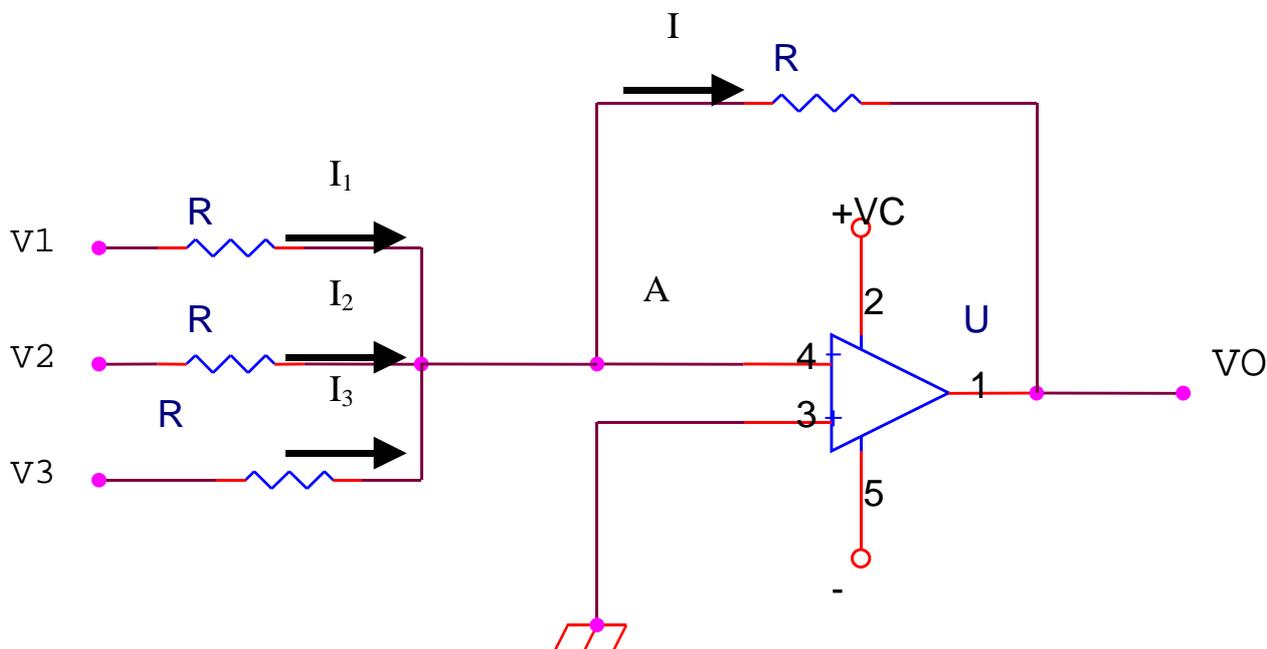
$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2} \quad I_3 = \frac{V_3}{R_3}$$

Lo stesso discorso si può fare per la resistenza di retroazione, collegata con un morsetto a massa e l'altro alla tensione di uscita



Ora ricordiamo che, in questo disegno abbiamo che i versi convenzionali di corrente e tensione da noi scelti, sono uguali, per cui abbiamo violato la convenzione dell'utilizzatore. Per tale motivo dobbiamo scrivere

$$I = -\frac{V_o}{R}$$



Applicando il primo principio di Kirchhoff al nodo A si ha

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \Rightarrow -\frac{V_o}{R} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \Rightarrow V_o = -\left(\frac{R}{R_1}V_1 + \frac{R}{R_2}V_2 + \frac{R}{R_3}V_3\right)$$

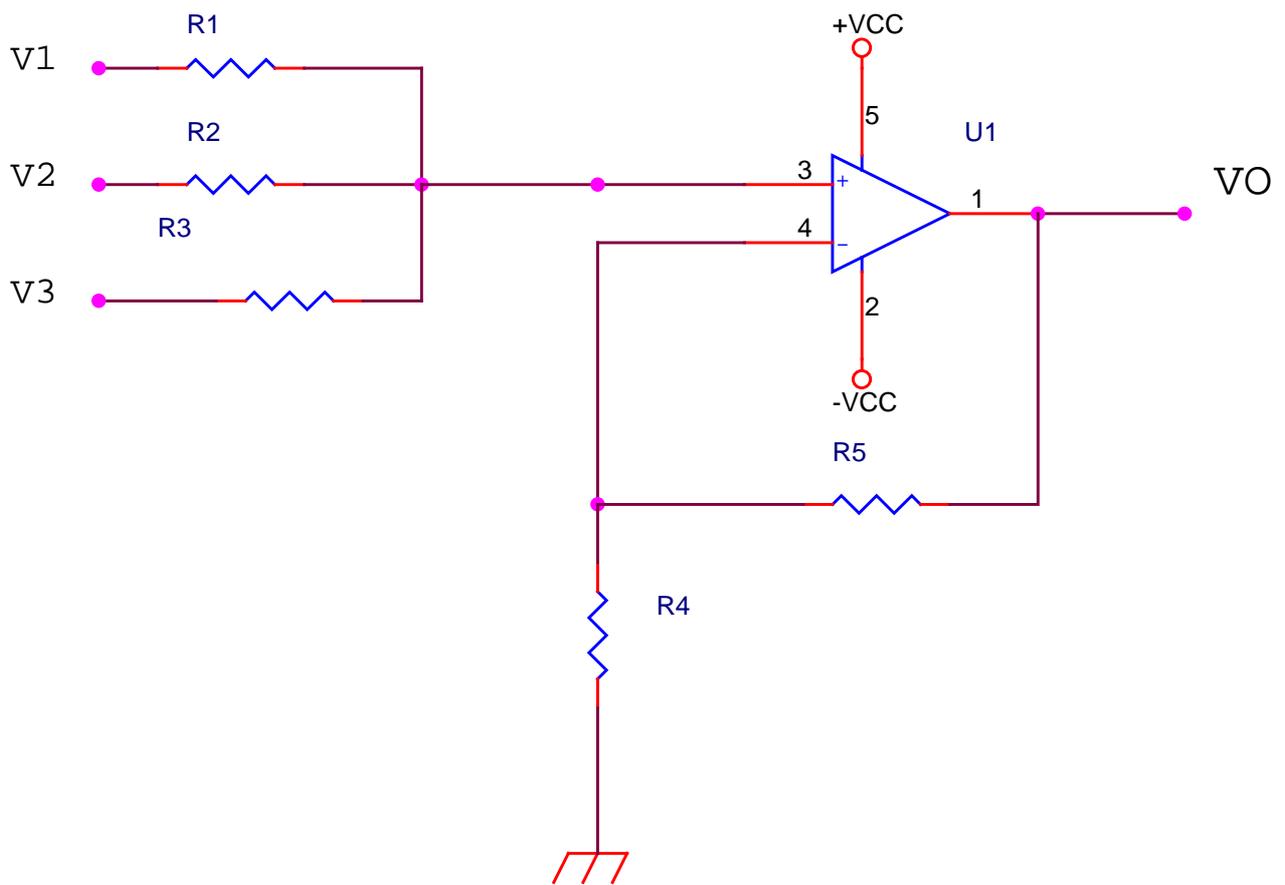
se le resistenze sono tutte uguali

$$V_o = -(V_1 + V_2 + V_3)$$

il segnale di uscita, a meno del segno, è la somma dei segnali d'ingresso.

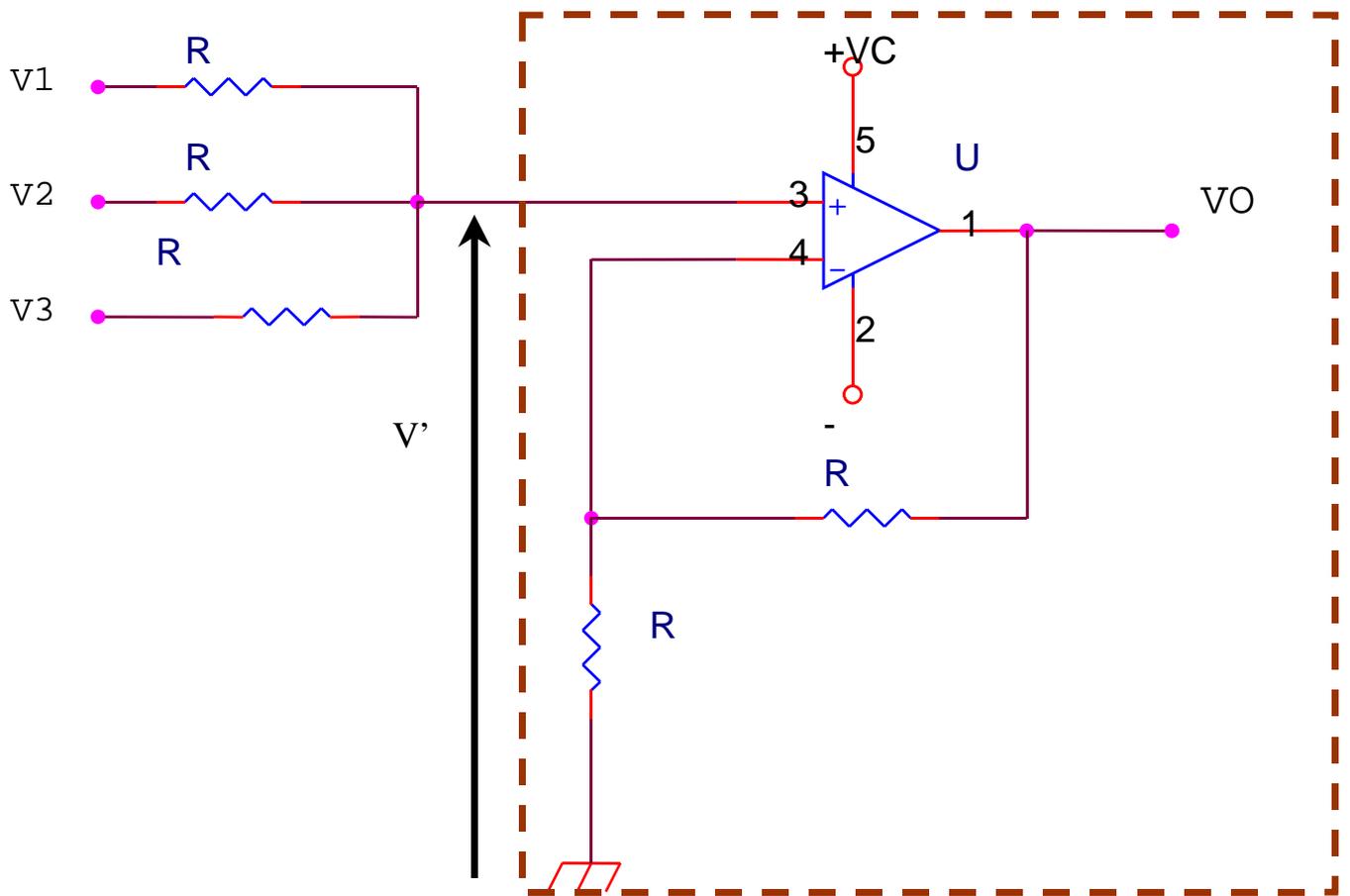
SOMMATORE NON INVERTENTE

Vediamo ora un circuito analogo a quello precedente negli effetti, ma che non introduce lo sfasamento di 180° , non inverte il segnale



Anche in questo caso abbiamo tre segnali di ingresso solo come esempio.

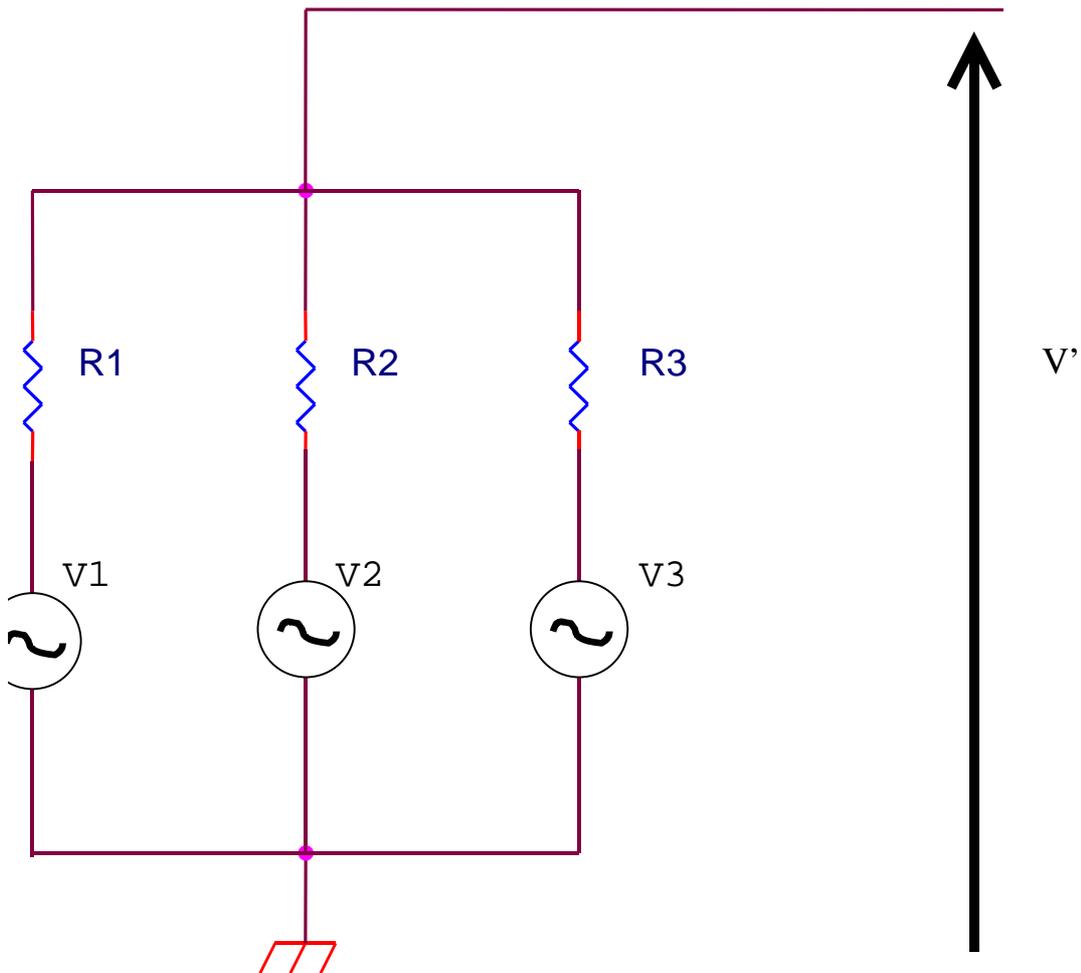
Per ricavare il legame fra ingresso e uscita dobbiamo notare che



la parte di circuito racchiusa nel riquadro costituisce un normale amplificatore in configurazione non invertente che amplifica la tensione V' . Dunque si ha

$$V_o = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) V'$$

Dobbiamo solo ricavare il legame fra V' e le tensioni d'ingresso. La situazione è la seguente



Abbiamo tre rami in parallelo ciascuno dei quali è costituito dalla serie di una resistenza e un generatore di tensione. Appliciamo dunque il teorema di Millmann

$$V' = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

In definitiva abbiamo

$$V_o = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

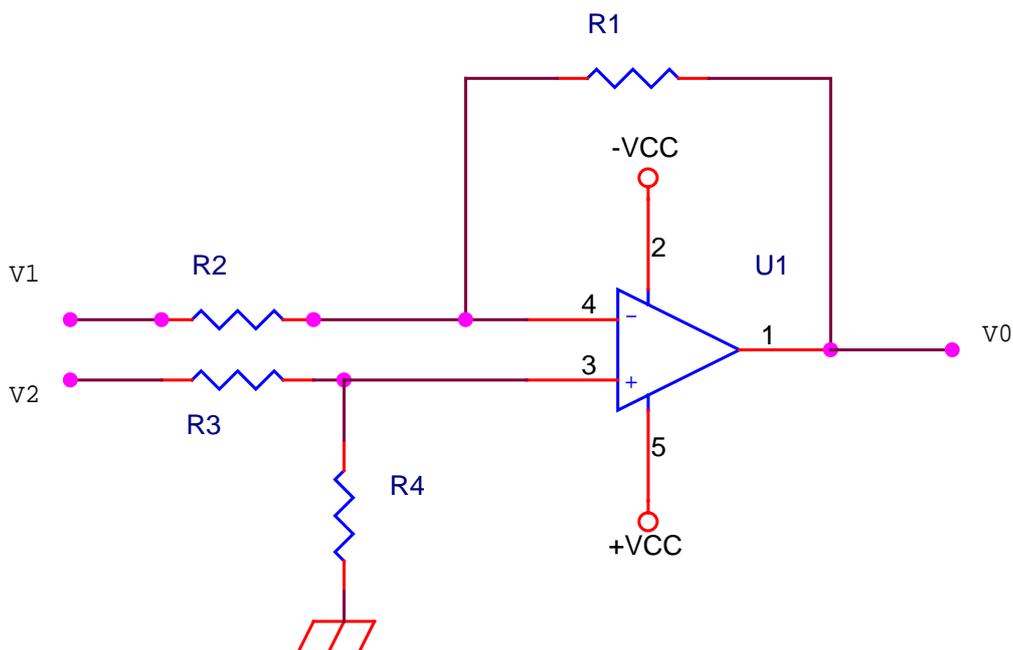
Per fare in modo che la tensione di uscita sia esattamente pari alla somma delle tensioni di ingresso cominciamo col porre $R_1=R_2=R_3=R$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) \frac{\frac{V_1}{R} + \frac{V_2}{R} + \frac{V_3}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) \frac{\frac{1}{R}(V_1 + V_2 + V_3)}{\frac{3}{R}} = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) \frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{3}$$

in questo particolare circuito dobbiamo porre ora $R_5=2R_4$ in modo che il loro rapporto sia uguale a due e si abbia

$$V_o = (1+2) \frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{3} = (3) \frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{3} = V_1 + V_2 + V_3$$

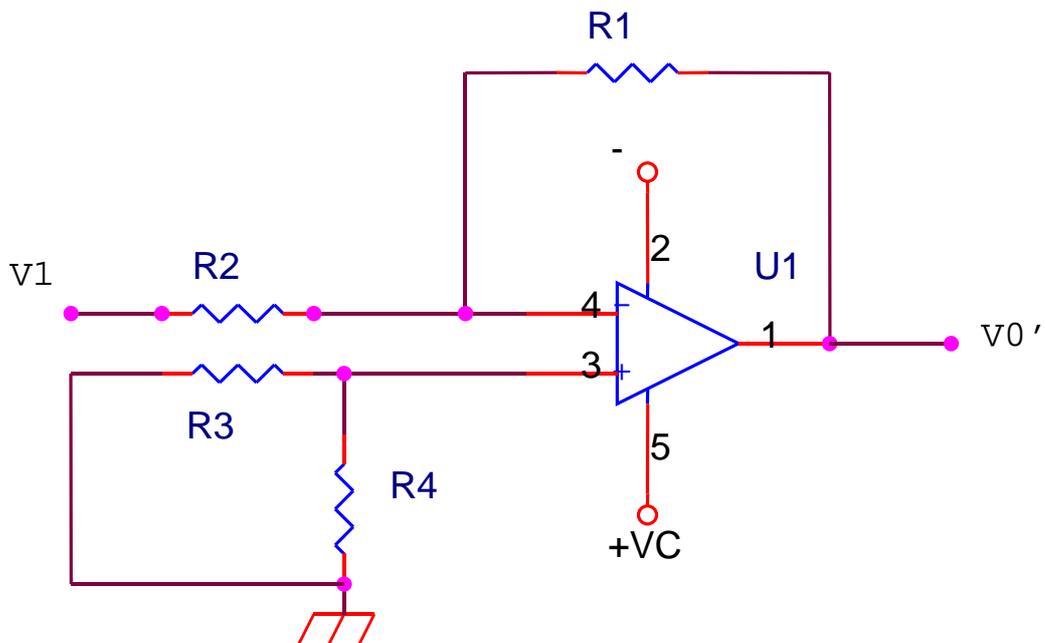
AMPLIFICATORE DIFFERENZIALE



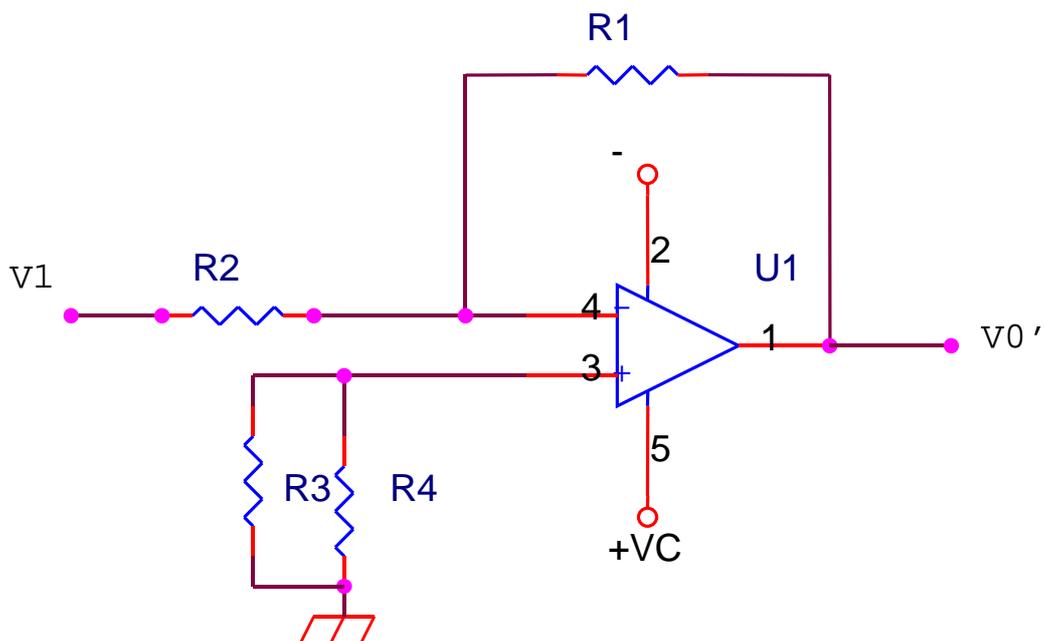
Questo circuito fa in modo che la tensione di uscita sia proporzionale alla differenza fra le due tensioni di ingresso. Per studiare il legame ingresso-uscita, tenendo presente che ci troviamo di fronte ad un

circuito lineare possiamo applicare il principio di sovrapposizione degli effetti.

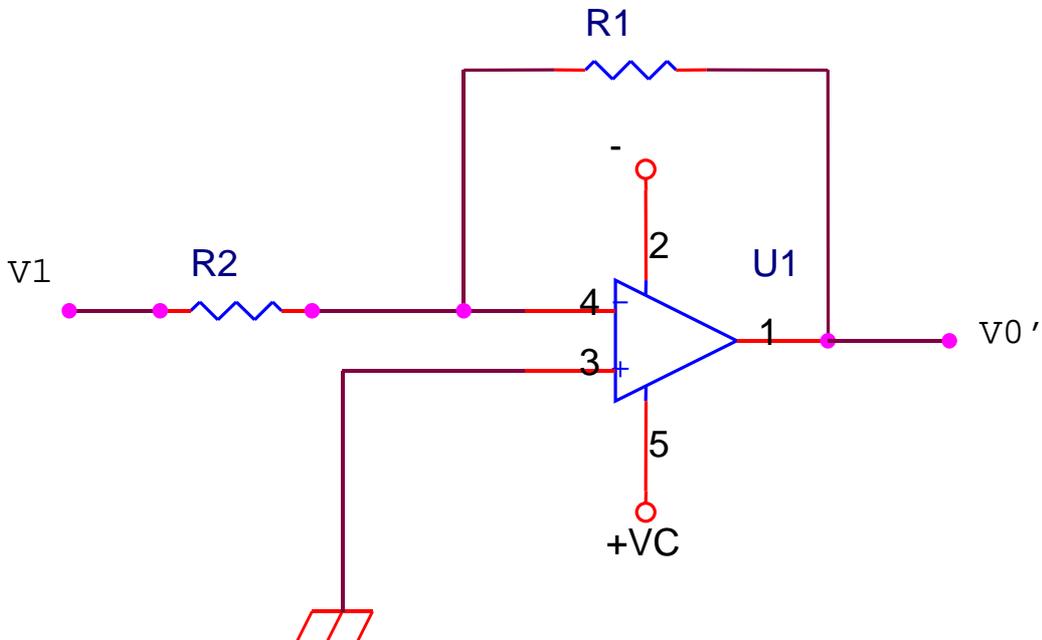
Poniamo inizialmente V_1 diverso da zero e V_2 uguale a zero e calcoliamo la $V_{O'}$ in questo caso. Il morsetto di ingresso di V_2 va posto a massa



per cui il disegno diventa anche



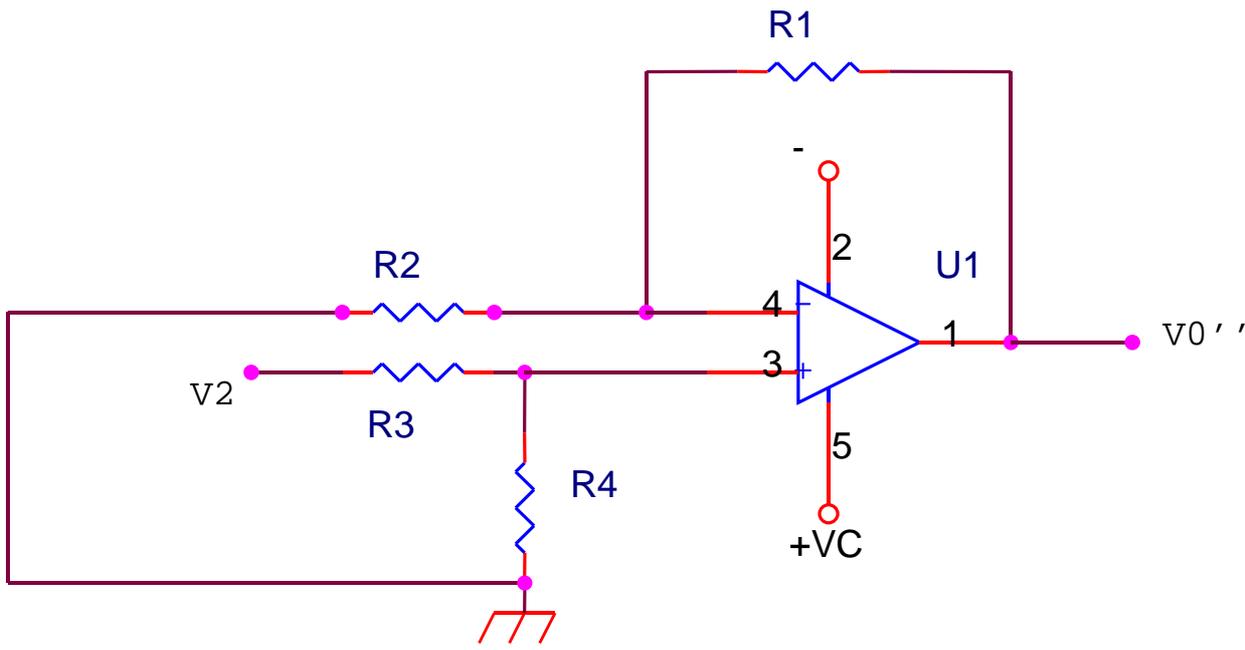
ma il parallelo fra R_3 ed R_4 si trova in serie con la resistenza d'ingresso dell'operazionale che è infinita per cui possiamo considerare nulla la sua influenza e abbiamo il seguente circuito



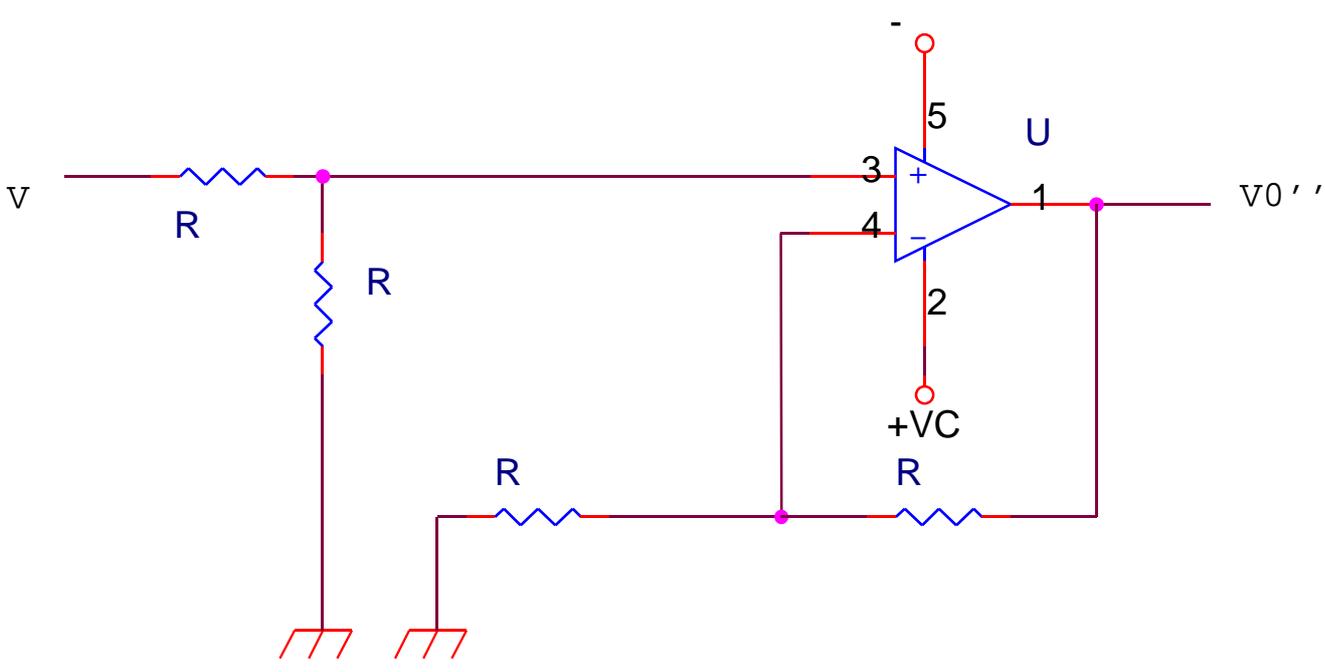
che costituisce un amplificatore in configurazione invertente. In definitiva

$$V_{o'} = -\frac{R_1}{R_2} V_1$$

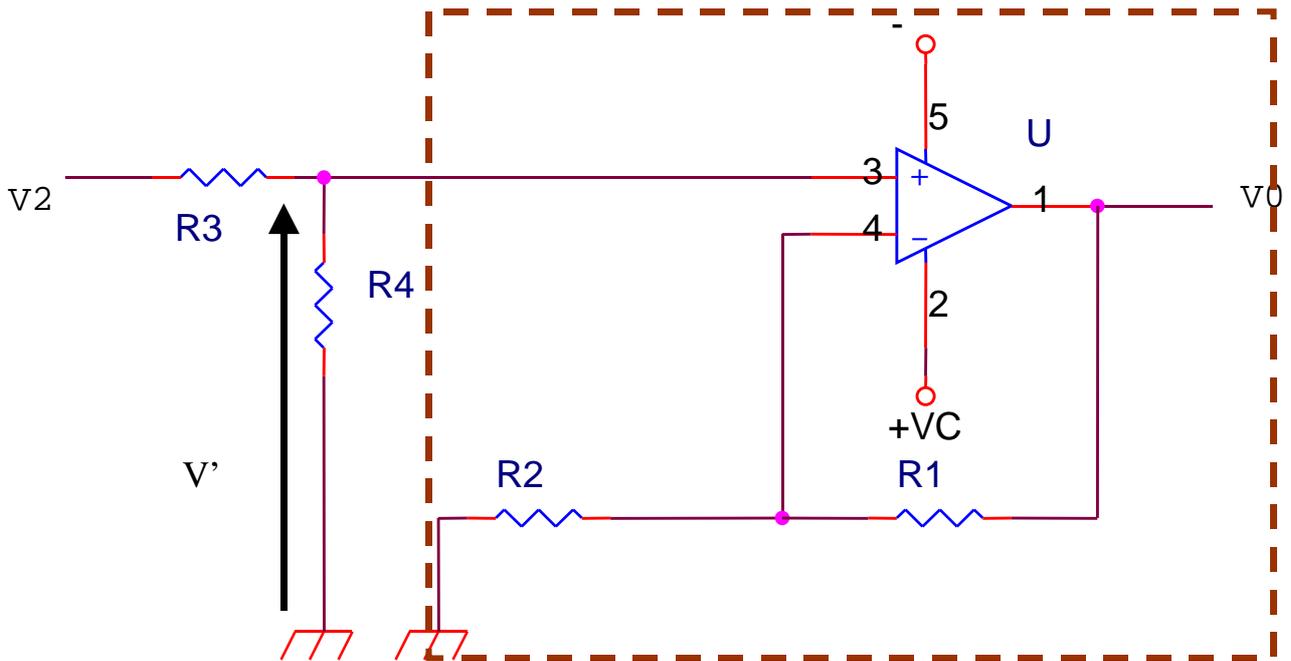
Poniamo ora V_1 uguale a zero e V_2 diverso da zero.



capovolgiamo il circuito



Notiamo che ora siamo di fronte ad un circuito amplificatore non invertente che amplifica non la V_2 ma la tensione ai capi di R_4



abbiamo allora

$$V_o'' = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V' = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2$$

Applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, abbiamo:

$$V_o = V_o' + V_o'' = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_1}{R_2} V_1$$

se poniamo $R_1 = R_2$ abbiamo

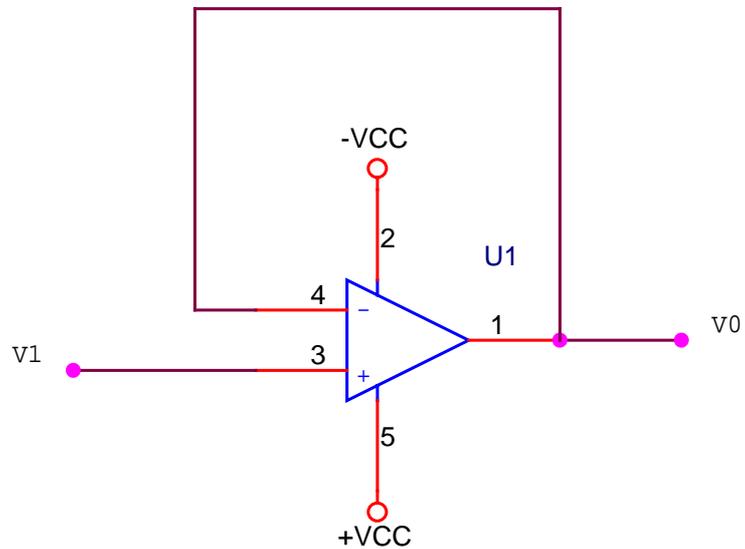
$$V_o = V_o' + V_o'' = (1+1) \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - V_1 = 2 \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - V_1$$

Ponendo $R_3 = R_4$, otteniamo

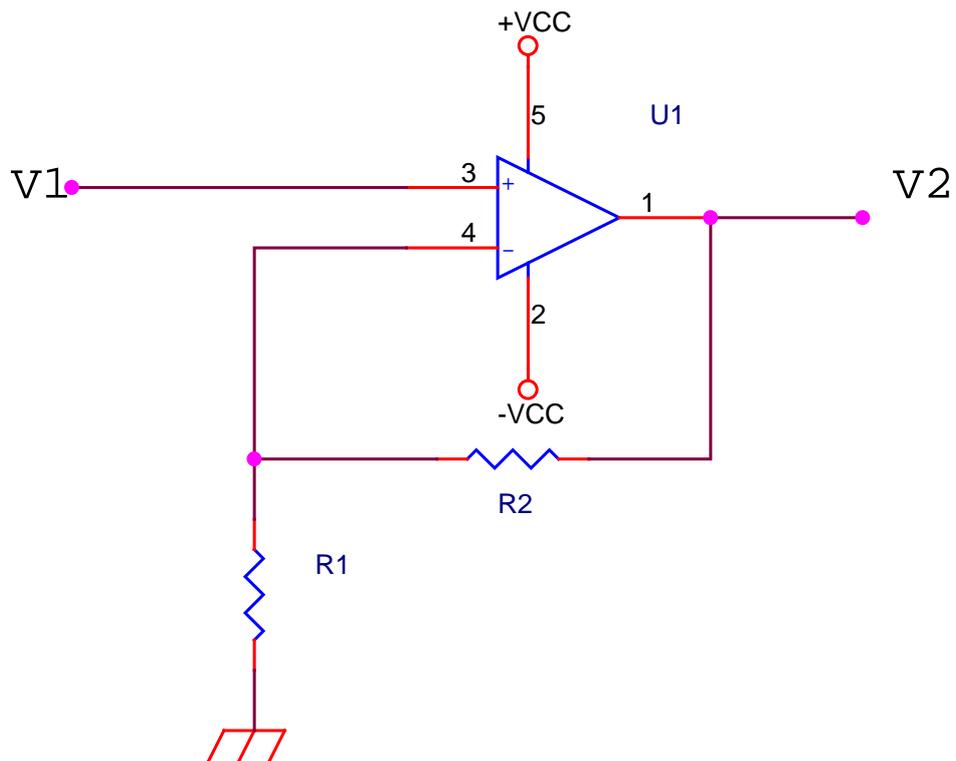
$$V_o = 2 \frac{1}{2} V_2 - V_1 = V_2 - V_1$$

Vediamo, dunque, che la tensione di uscita è pari alla differenza fra le tensioni di ingresso.

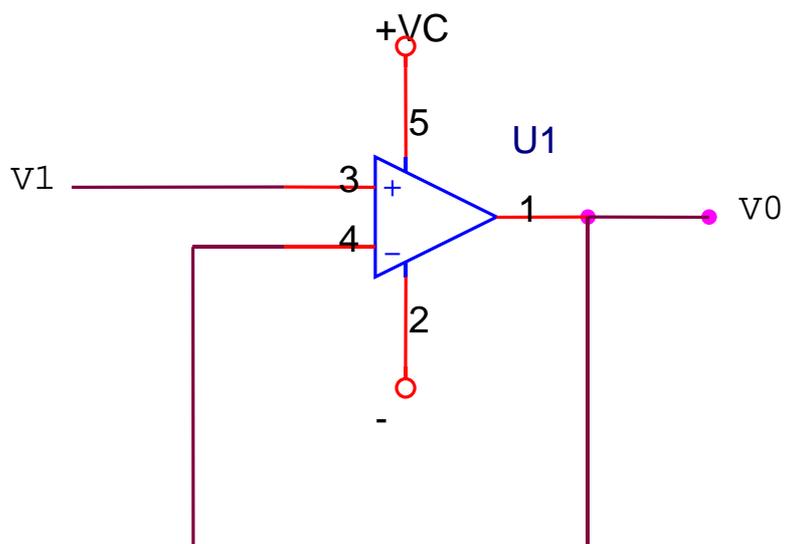
BUFFER



questo circuito è detto anche inseguitore di tensione poiché la tensione di uscita è esattamente pari alla tensione di ingresso: $V_O=V_I$. Basta osservare che ci troviamo di fronte ad una configurazione non invertente



in cui $R_2=0$ e R_1 non c'è, il che equivale a dire che abbiamo messo una resistenza di valore infinito.

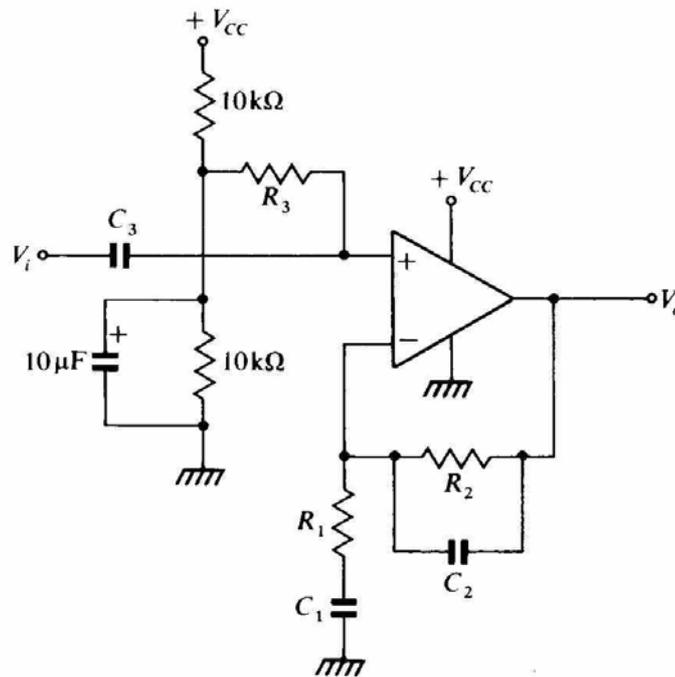


APPLICANDO LA FORMULA

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_1 = \left(1 + \frac{0}{\infty}\right)V_1 = (1 + 0)V_1 = V_1$$

Questo dispositivo, funziona da adattatore di impedenza.

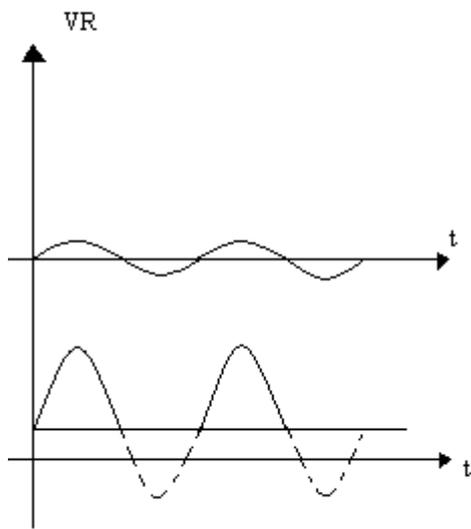
ALIMENTAZIONE SINGOLA DI UN OPERAZIONALE



(b)

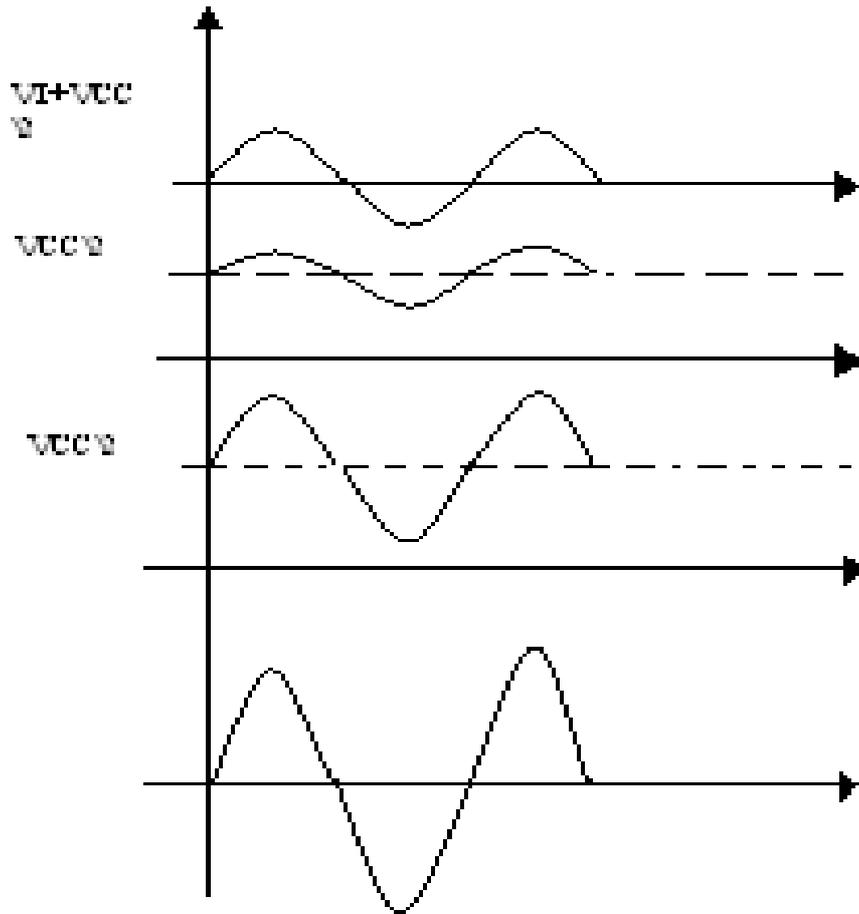
Abbiamo un operazionale in configurazione non invertente con alimentazione singola. Normalmente un operazionale ha due punti di alimentazione, uno collegato ad una tensione di alimentazione $+V_{CC}$ ed un altro collegato ad una tensione di alimentazione $-V_{CC}$. La dinamica del segnale di uscita V_o è limitata dalla tensione di alimentazione. Il suo valore massimo positivo non può superare la $+V_{CC}$, in pratica è inferiore al valore di alimentazione di 1, 2 volt in dipendenza del valore della resistenza offerta dal carico. Analogamente il uso più piccolo valore negativo non può risultare inferiore alla $-V_{CC}$. in pratica sarà superiore a questa di 1, 2 volt. Se un operazionale è alimentato a ± 18 volt, ad esempio, il segnale di uscita V_o sarà limitato fra $-17/16$ volt e $+16/17$ volt. Nel caso di

operazionale con alimentazione singola , il morsetto che solitamente è collegato alla $-V_{CC}$ risulta posto a massa. In questo caso il valore minimo della tensione di uscita può arrivare al massimo a 1/2 volt. Quindi il segnale di uscita non può assumere valori negativi. Se tentassimo di amplificare un segnale d'ingresso che assume valori negativi, questi non potrebbero essere amplificati in uscita per cui si avrebbe una grave ritorsione del segnale.



LE PARTI NEGATIVE DEL
SEGNALE SONO SOPPRESSE

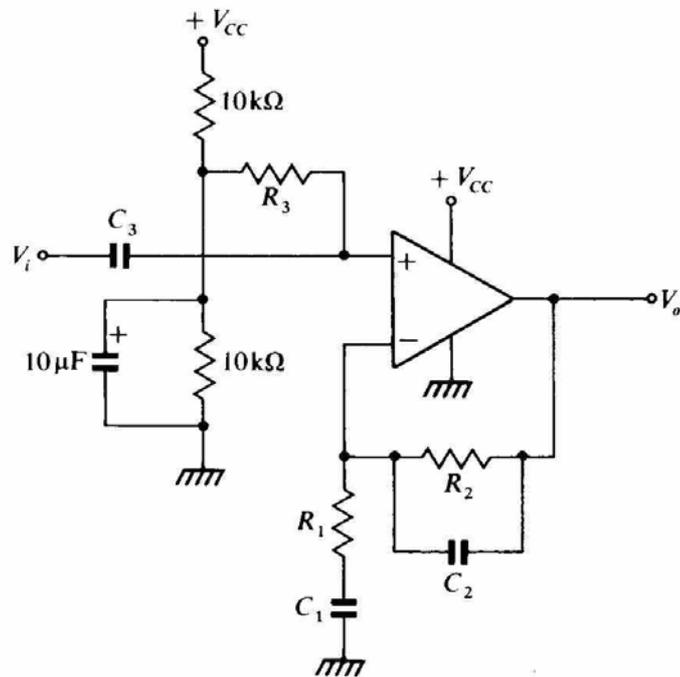
una possibilità alternativa è rappresentata dalla figura seguente



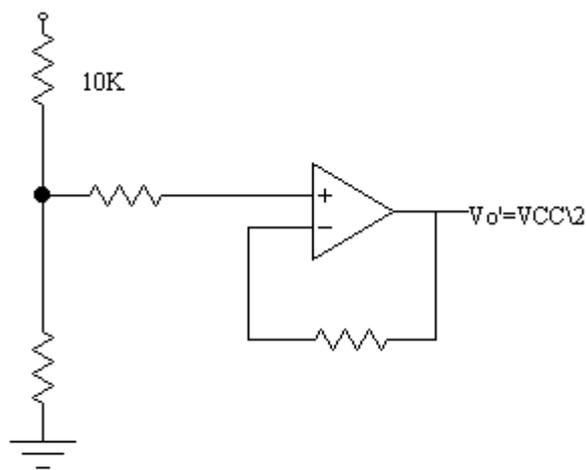
dovremmo trovare il modo di traslare il segnale d'ingresso verso l'alto in modo che non abbia più componenti negative , in tal modo lo possiamo amplificare senza problemi ed infine, dovremmo trovare il modo di traslare nuovamente il segnale verso il basso.

La soluzione è data dal circuito che abbiamo presentato all'inizio. In ingresso all'operazionale si trova sia il segnale v_i da amplificare, sia una tensione continua pari a $V_{CC}/2$ dovuta al partitore resistivo composto da due resistenze uguali. Consideriamo anzitutto il circuito dal punto di vista delle componenti continue. Per la $V_{CC}/2$ tutti i condensatori presenti nel circuito sono circuiti aperti. La resistenza R_1 risulta non collegata a terra per cui possiamo eliminarla dal circuito.

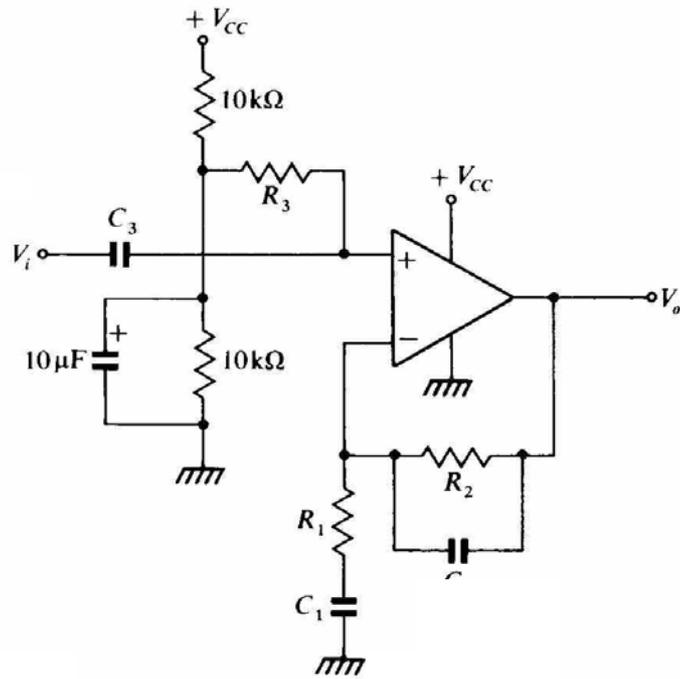
Ciò che rimane è un operazionale in configurazione buffer o inseguitore di tensione per cui l'uscita è identica all'ingresso e pari a $V_{CC}/2$.



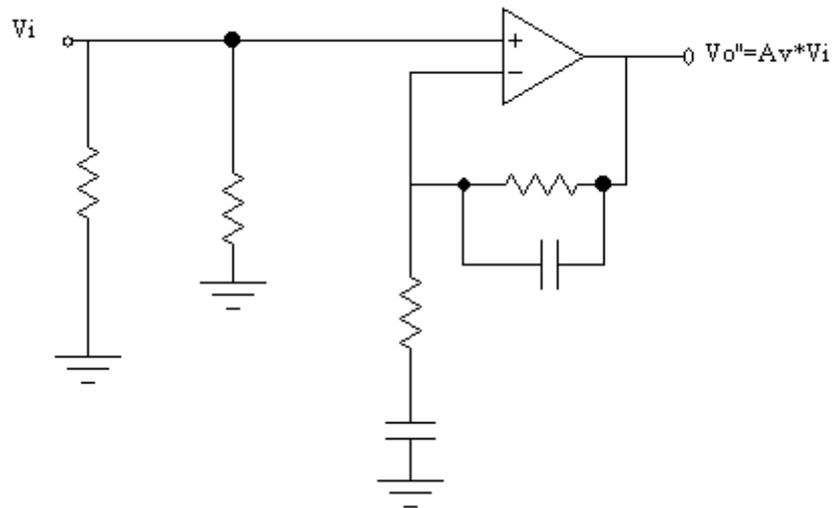
(b)



per le componenti alternate, invece, i condensatori in ingresso sono cortocircuiti per cui il circuito diventa quello di un normale amplificatore e l'uscita è pari al segnale d'ingresso amplificato



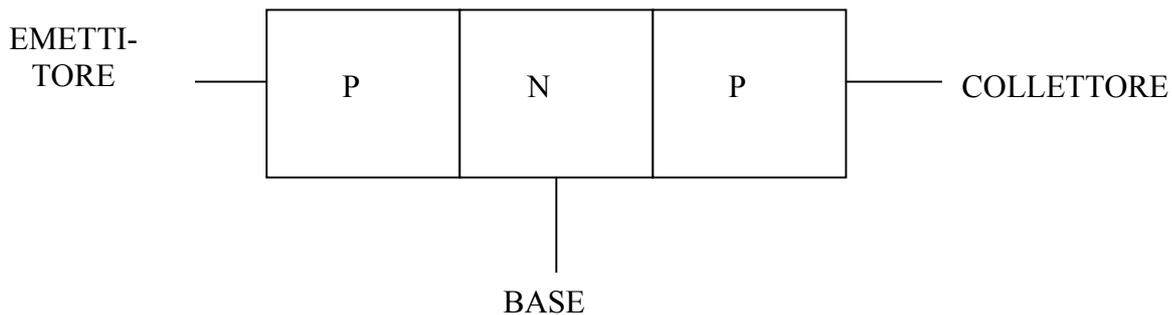
(b)



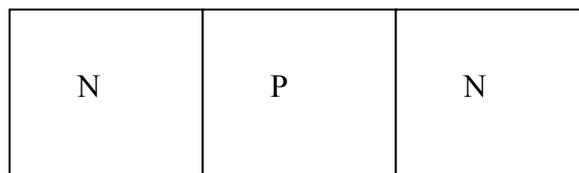
complessivamente abbiamo in uscita il segnale d'ingresso amplificato ma sommato alla $V_{CC}/2$ che è l'effetto che cercavamo di traslare il nostro segnale verso l'alto. Per riavere il segnale di partenza basterà porre in serie all'uscita dell'operazionale un condensatore che filtrerà la componente continua. Con l'eliminazione della $V_{CC}/2$ il segnale d'ingresso amplificato sarà di nuovo traslato verso il basso.

TRANSISTOR BJT

Un transistor BJT (Bipolar Junction Transistor) è concettualmente costituito da una barretta di silicio suddivisa in tre zone drogate in maniera diversa. Possiamo avere un transistor di tipo PNP



oppure un transistor di tipo NPN

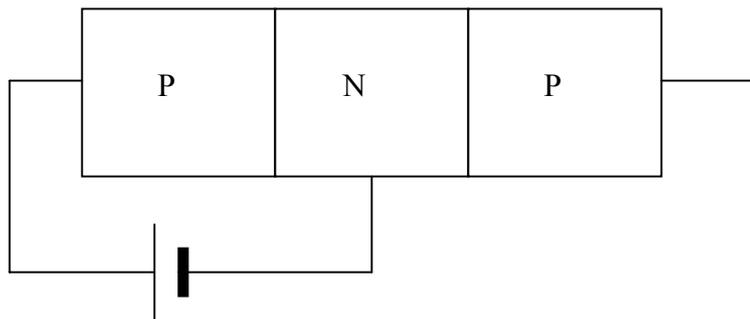


PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

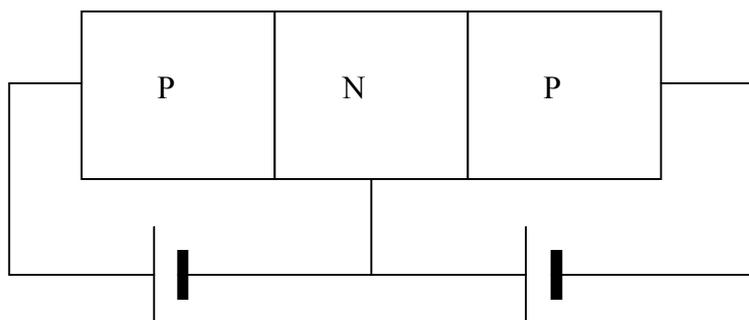
Per studiare il principio di funzionamento del BJT prendiamo in considerazione il transistor PNP. Per il transistor NPN il discorso sarà del tutto analogo.

Nel transistor, a differenza del diodo, vi sono due giunzioni, anziché una. La prima è la giunzione emettitore-base e la seconda è la giunzione base-collettore. Senza l'inserzione di forze elettromotrici esterne, si hanno gli stessi fenomeni visti per il diodo. Si creano correnti di diffusione dovute al gradiente di concentrazione esistente

fra le varie zone del bjt, che portano a fenomeni di ricombinazione a cavallo delle due giunzioni, la conseguente creazione di zone di svuotamento, e la generazione di barriere di potenziale che fanno arrestare la diffusione delle cariche. Per consentire l'ulteriore passaggio di lacune dall'emettitore alla base occorre polarizzare direttamente la giunzione base-emettitore

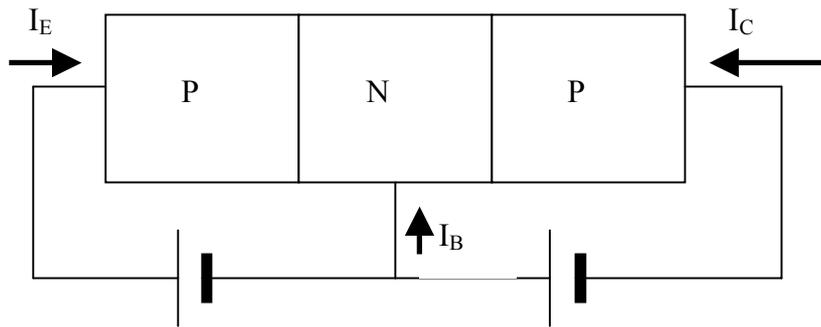


Per permettere alle lacune di passare nel collettore occorre creare un campo elettrico diretto dalla base al collettore per cui va inserita una nuova batteria



Sintetizzando, nel normale funzionamento del bjt, la prima giunzione va polarizzata direttamente mentre la seconda va polarizzata inversamente.

Possiamo individuare nel dispositivo tre correnti, corrente di emettitore I_E , corrente di base I_B , corrente di collettore I_C , che, per convenzione vengono disegnate sempre entranti nel dispositivo.



Le lacune che dall'emettitore passano nella base costituiscono una corrente di emettitore I_E positiva, poiché si tratta di cariche positive che viaggiano nello stesso verso convenzionale della corrente. Queste cariche, attraversando la base, sono soggette al fenomeno della ricombinazione. Ora occorre sapere che la base è realizzata in modo da essere molto stretta e poco drogata rispetto alle altre due zone, in modo che il fenomeno della ricombinazione sia limitato. Le lacune sopravvissute costituiscono la corrente di collettore. In tal caso, poiché si tratta di cariche positive che vanno in direzione opposta al verso convenzionale della corrente, essa è negativa, $I_C < 0$. Dunque la corrente di collettore e la corrente di emettitore hanno segno opposto. Inoltre la corrente di collettore, in modulo deve essere inferiore alla corrente di emettitore, poiché solo una parte delle lacune provenienti dall'emettitore è sopravvissuta raggiungendo il collettore. Per esprimere questi due concetti si può affermare che $I_C = -\alpha I_E$ dove α è un numero positivo minore di 1. questo numero, più precisamente vale circa 0,98-0,99, cioè il 98%-99% delle lacune sopravvive al viaggio nella base. La corrente I_B , infine, è costituita da elettroni che vanno nella base a rimpiazzare quelli che si perdono per ricombinazione per cui sono cariche elettriche negative che vanno nello stesso verso convenzionale della corrente che è dunque negativa.

Il bjt si può vedere come un nodo di Kichhoff per cui possiamo scrivere che

$$I_E + I_B + I_C = 0$$

da cui

$$I_E = - I_B - I_C$$

Sostituendo questo risultato in

$$I_C = - \alpha I_E$$

si ha

$$I_C = - \alpha (- I_B - I_C) = \alpha I_B + \alpha I_C$$

$$I_C - \alpha I_C = \alpha I_B$$

$$I_C(1 - \alpha) = \alpha I_B$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B$$

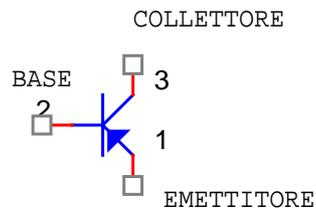
se $\alpha = 0.99$ si ha $I_C = 99I_B$.

Da questi dati si può già intuire la funzione di un BJT, consistente nel funzionare da amplificatore di segnali. Se I_B è legato al segnale da amplificare e I_C è il segnale di uscita come nel seguente circuito ideale, otteniamo in uscita il segnale amplificato.

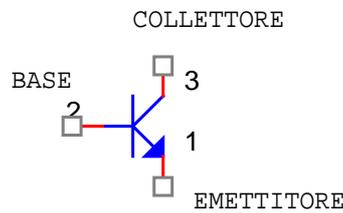
Il fattore di amplificazione che lega la corrente di collettore e la corrente di base è definito dal costruttore del transistor come fattore di *guadagno statico* h_{FE} .

SIMBOLI CIRCUITALI

Il simbolo circuitale dei transistor BJT si differenzia fra pnp e npn. Nel caso del pnp il simbolo è il seguente



la freccia sull'emettitore indica che la corrente di emettitore è realmente positiva entrando nel dispositivo. Il simbolo del npn è invece il seguente



la freccia indica che la corrente di emettitore è in realtà positiva se è rivolta in uscita al dispositivo (infatti nel npn entrano elettroni).

Le caratteristiche del BJT

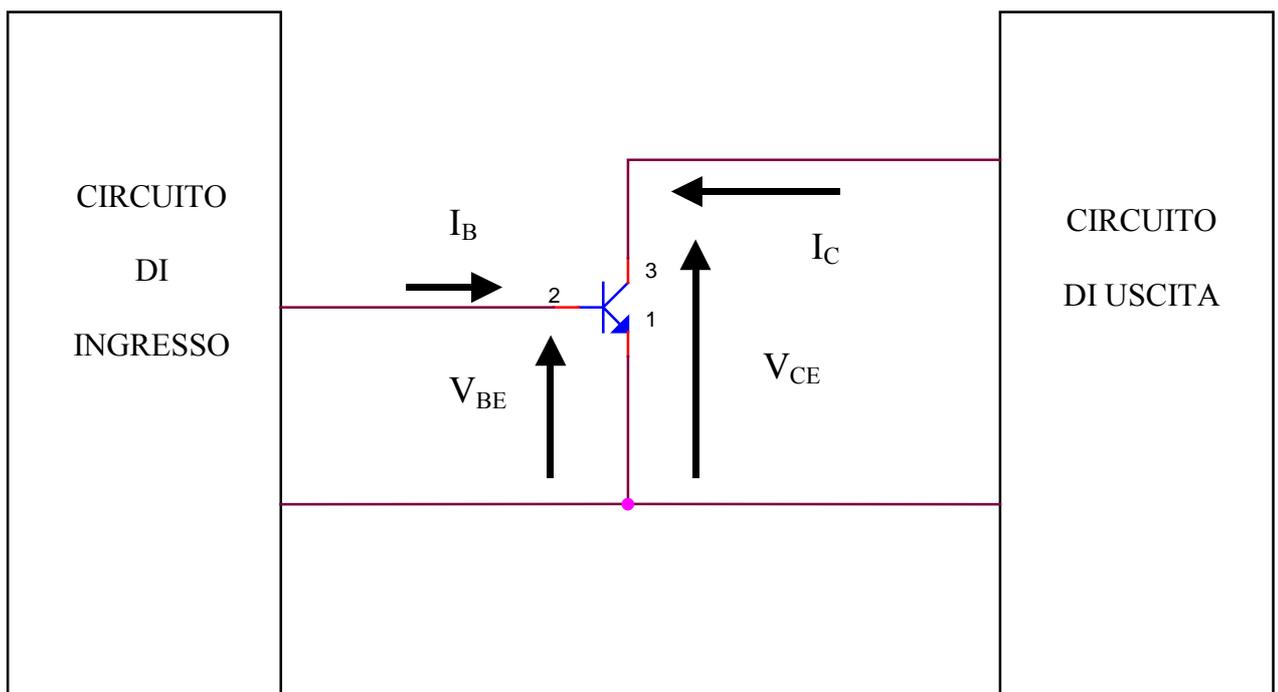
Anche il BJT, così come il diodo, è un dispositivo non lineare, per cui le relazioni fra tensioni e correnti che si instaurano nel transistor hanno un'espressione complessa che è conveniente esprimere in maniera grafica.

Montaggi fondamentali

Preliminarmente dobbiamo dire che un BJT si può collegare in diversi modi in un circuito

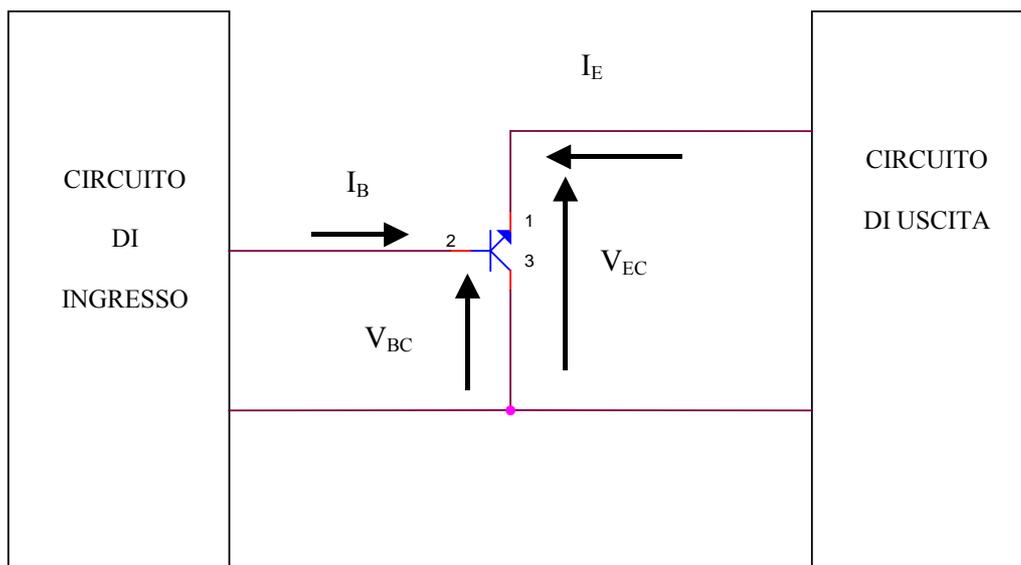
➤ Montaggio ad emettitore comune

Il primo tipo di montaggio è quello ad emettitore comune



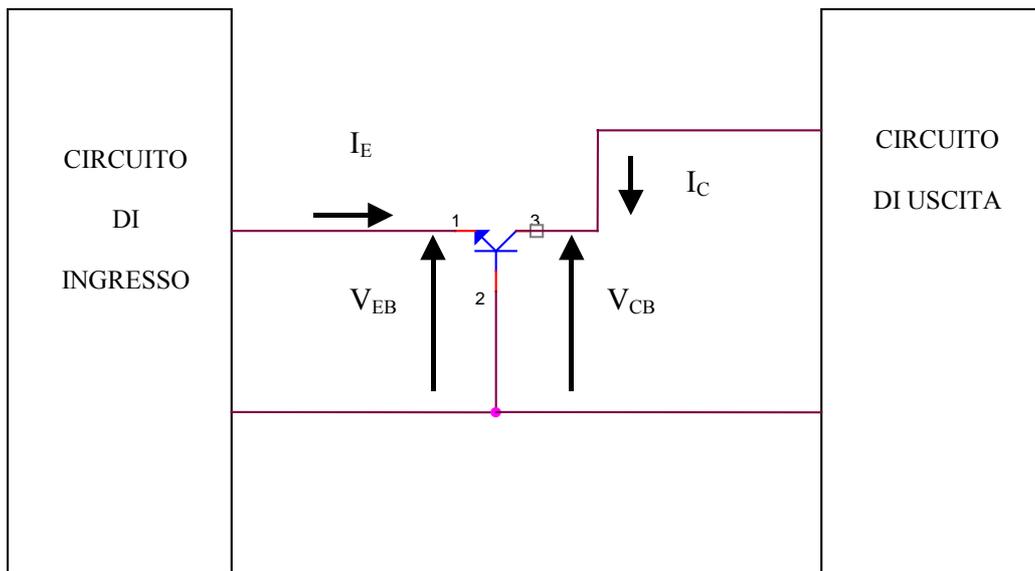
In questo caso l'emettitore è collegato sia al circuito di ingresso che a quello di uscita, cioè è comune alla maglia di ingresso e alla maglia di uscita. In tal caso le grandezze elettriche che vanno considerate come ingressi del dispositivo sono la corrente di base I_B e la tensione V_{BE} . Le grandezze che vanno considerate come uscite sono la I_C e la V_{CE} .

➤ Montaggio a collettore comune



In tal caso è il collettore che viene collegato sia all'ingresso che all'uscita. Le grandezze di ingresso sono la corrente di base e la tensione fra base e collettore, mentre le grandezze di uscita sono corrente di emettitore e tensione fra emettitore e collettore.

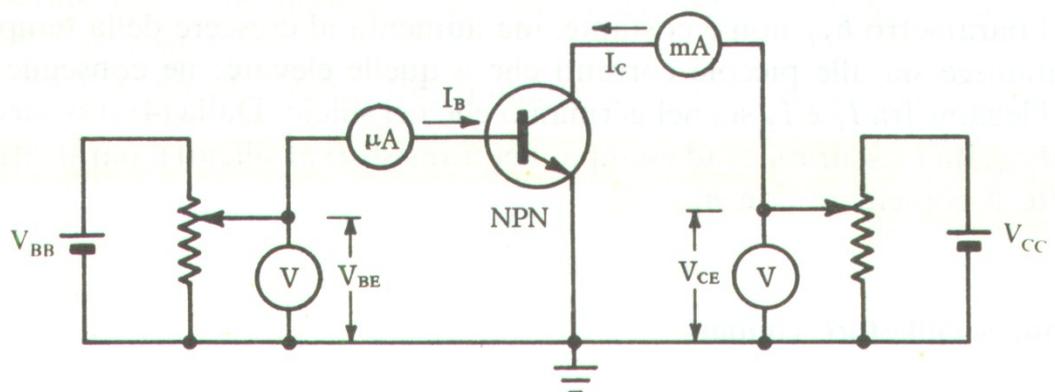
➤ Montaggio a base comune



Caratteristiche ad emettitore comune

In questa sede ci occuperemo solo delle caratteristiche del montaggio ad emettitore comune che costituisce il nucleo di principio di un sistema amplificatore.

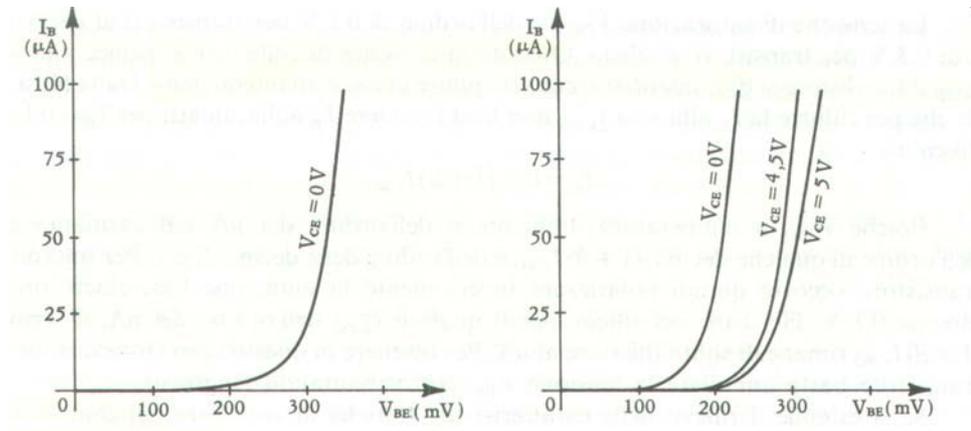
Il rilievo delle curve caratteristiche si può ottenere con il circuito seguente



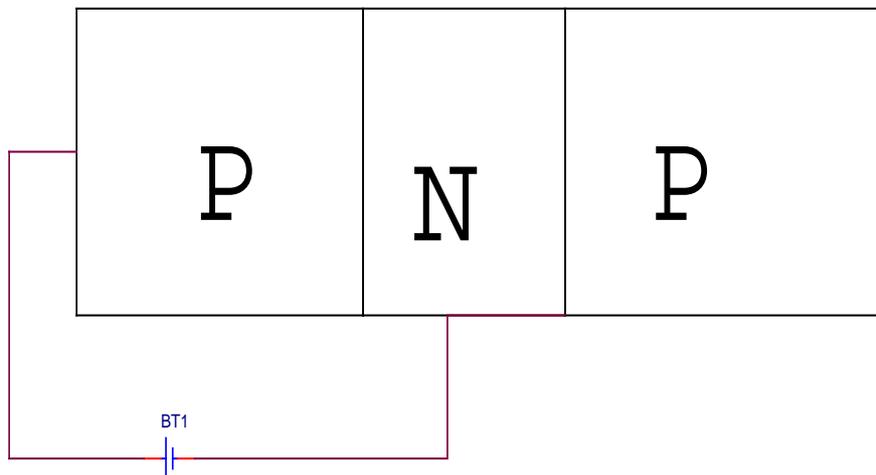
Poiché abbiamo grandezze di ingresso e di uscita abbiamo due caratteristiche: una di ingresso che esprime il legame fra I_B e V_{BE} , ed una di uscita che lega I_C e V_{CE} .

Caratteristiche di ingresso

La caratteristica d'ingresso è la seguente per un npn



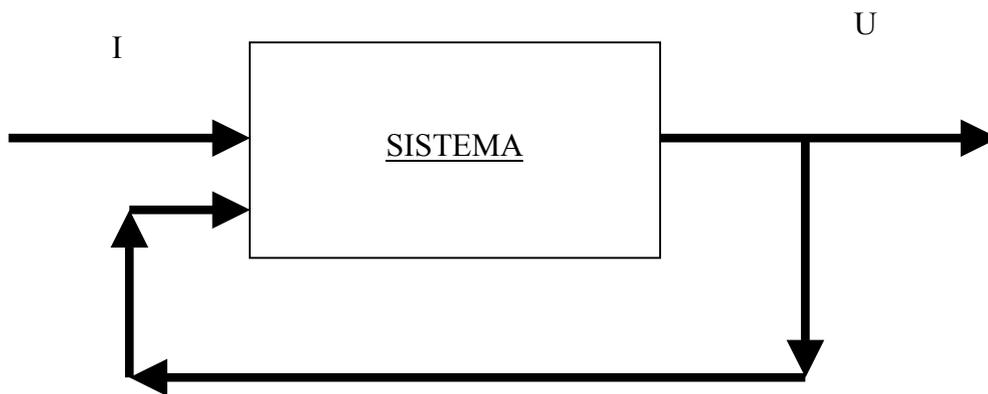
Come potete notare, essa è identica alla caratteristica di polarizzazione diretta del diodo. Ciò non ci deve sorprendere, perché, se polarizziamo soltanto la giunzione base-emettitore, con una batteria



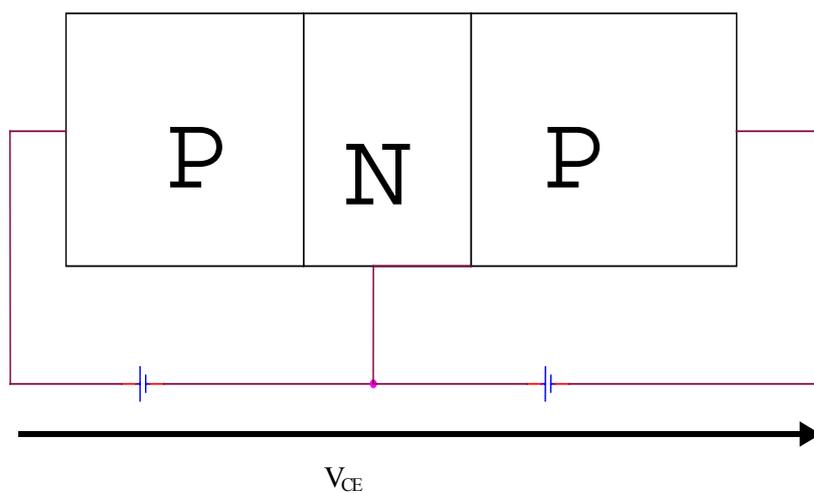
ci troviamo, in fondo, di fronte alla struttura di un diodo.

Notiamo, però, una cosa strana nella seconda figura: invece di avere una sola caratteristica ne abbiamo diverse che dipendono dal valore della V_{CE} . Il legame fra I_B e V_{BE} dunque, non è sempre identico ma

dipende da quale valore assume la V_{CE} . Potrebbe sembrare strano che una grandezza di uscita influenzi a sua volta l'ingresso. Si tratta di un fenomeno detto retroazione: in ogni tipo di sistema (bomba atomica, mercati mondiali, apparati meccanici, sviluppo di batteri, dispositivi elettronici) la grandezza che abbiamo individuato come uscita del sistema influenza il sistema come se fosse un ulteriore ingresso



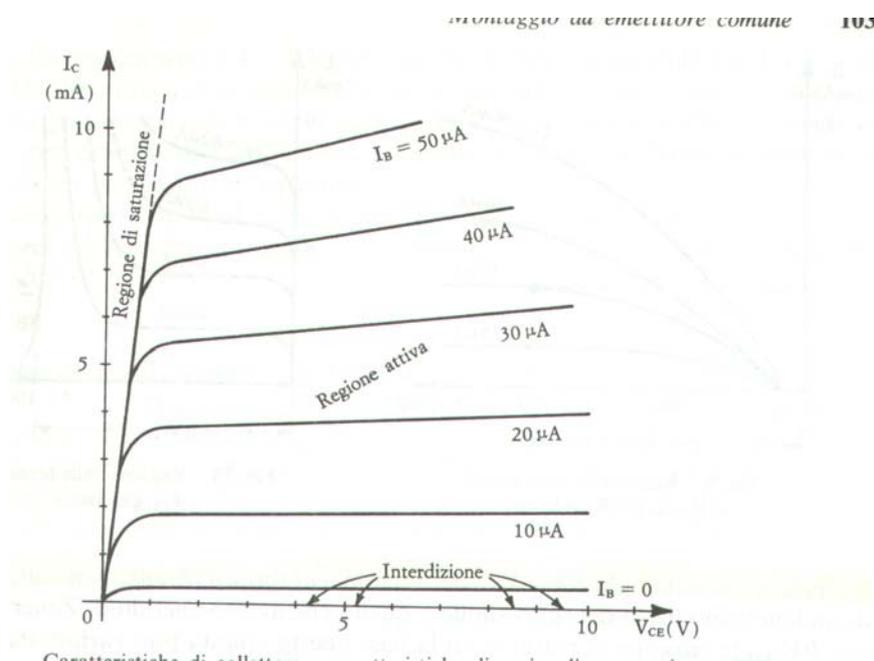
Nel nostro caso la retroazione è causata dall'effetto Early. Spieghiamola facendo riferimento, ad esempio ad un pnp.



Se aumentiamo il valore assoluto della tensione V_{CE} , tenendo costante la V_{BE} , aumenta il valore della tensione che polarizza la giunzione base-collettore. Tale giunzione è però polarizzata inversamente, il che vuol dire che presenta una zona di svuotamento. Quindi al crescere della V_{CE} cresce la zona di svuotamento nella base. Se cresce la zona di svuotamento diminuisce la ricombinazione nella base perché diminuisce la zona con elettroni che deve essere attraversata dalle lacune provenienti dall'emettitore. Ciò comporta che il numero di elettroni che devono accorrere nella base a sostituire quelli che si perdono per ricombinazione, diminuiscono per cui, in corrispondenza di uno stesso valore della V_{BE} , la I_B diminuisce in valore assoluto.

Caratteristica di uscita

Le caratteristiche di uscita hanno il seguente andamento



come si può vedere, anche in questo caso abbiamo tante caratteristiche diverse, quindi il legame fra la I_C e la V_{CE} non è sempre lo stesso ma dipende dalla corrente I_B . Notiamo che, per valori della V_{CE} di pochi millivolt, la corrente I_C cresce molto rapidamente. Questa zona è detta zona di saturazione ed è caratterizzata, dunque, da aumenti molto grandi di corrente per piccole variazioni di tensione. Ciò vuol dire che, in questa zona, il BJT presenta una resistenza molto bassa. Abbiamo poi una zona in cui le caratteristiche diventano quasi orizzontali: ciò sta a significare che la corrente di collettore diventa indipendente dalla tensione ed il suo valore dipende solo dal valore della I_B . Questa zona è detta zona lineare poiché qui vale il legame lineare fra I_C e I_B

$$I_C = h_{FE}I_B$$

Se facciamo diminuire la corrente di base a zero, anche la corrente di collettore si riduce a valori praticamente nulli. Questa zona è detta zona di interdizione e in questo caso si può dire che il BJT offre una resistenza molto elevata tanto da poter essere assimilato ad un circuito aperto.