

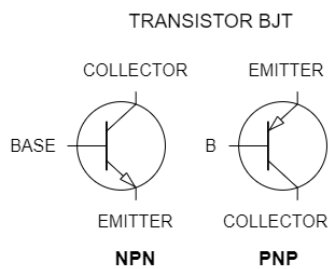
1.2 Elettronica di base - Transistor

Continuiamo ad introdurre i vari componenti usati nei circuiti elettronici. Finora abbiamo visto componenti relativamente semplici con solo due terminali e passivi, ovvero che assorbono energia durante il funzionamento.

I transistor sono i più importanti dispositivi attivi, ovvero dispositivi che possono essere usati come amplificatori di potenza. La potenza addizionale viene erogata da una sorgente esterna (l'alimentazione del circuito). Il transistor è il componente essenziale di qualsiasi circuito elettronico anche se spesso non viene usato direttamente, soppiantato da circuiti integrati (IC) che non sono altro che insiemi di transistor ed altri componenti formati in un singolo chip di materiale semiconduttore. Transistor discreti sono utilizzati spesso per interfacciare circuiti tra loro o in applicazioni di potenza elevata. Ci sono due grandi classi di transistor: i transistor bipolari BJT (Bipolar Junction Transistor) e quelli ad effetto di campo FET (Field Effect Transistor).

I transistor BJT sono stati sostituiti in molte applicazioni dai transistor FET, soprattutto nell'elettronica digitale. Sono dispositivi complessi per cui introdurremo un modello molto semplificato del loro comportamento.

Transistor bipolari (BJT)



Simbolo dei transistor BJT NPN e PNP

Un transistor bipolare è un dispositivo a tre terminali chiamati Base, Collector ed Emitter in cui una piccola corrente applicata alla Base (I_B) controlla una corrente molto più larga tra Collector ed Emitter (I_C). È disponibile in due varianti NPN e PNP con comportamento simile ma polarità opposta.

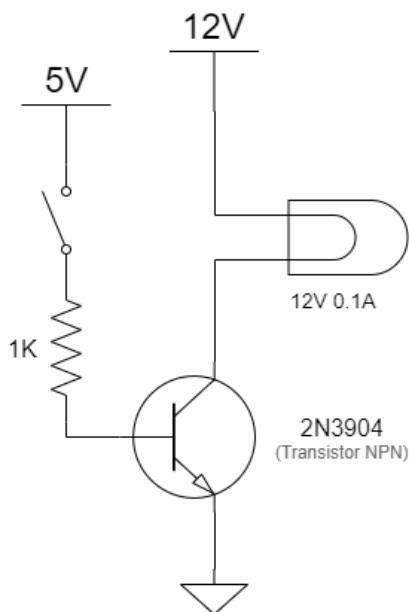
Per un transistor NPN valgono le seguenti regole (per un PNP basta invertire tutte le polarità):

1. La tensione sul Collector deve essere maggiore della tensione sull'Emitter ($V_C > V_E$)
2. La *giunzione* Base-Emitter ha lo stesso comportamento di un diodo. Questo significa che non si può applicare una tensione arbitraria su terminali Base-Emitter perché una corrente molto elevata scorrerà se $V_{BE} > 0.7$ ovvero la tensione V_F di un diodo. Quindi un transistor in funzionamento avrà sempre $V_B = V_E + 0.7$
3. Ogni transistor ha dei valori massimi di I_C , I_B e V_{CE} oltre i quali si danneggiano, questi valori sono riportati nel *datasheet* del componente. Ci sono anche altri limiti relativi alla dissipazione di potenza ($P = I_C V_{CE}$), alla temperatura e a V_{BE} che devono essere rispettati
4. Quando le regole sopra sono rispettate I_C è circa proporzionale a I_B e possiamo scrivere $I_C = \beta I_B$ dove con β indichiamo il guadagno di corrente (a volte chiamato h_{FE}) che di solito ha valori attorno a 100.

Vediamo ora uno dei limiti di questo semplice modello. Il parametro β non è un buon parametro per caratterizzare un transistor, ad esempio il suo valore può variare tra 50 e 250 tra differenti transistor dello stesso tipo. Esso dipende anche dalla corrente applicata al Collector, dalla tensione V_{CE} e dalla temperatura. Quindi un circuito che dipende da un particolare valore di β per funzionare non è un buon circuito.

Illustriamo meglio il comportamento dei transistor analizzando le applicazioni più comuni:

Transistor come interruttore

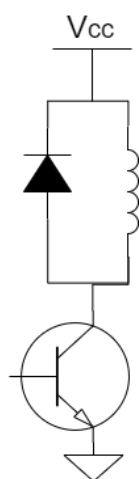


In questa applicazione una corrente piccola consente il passaggio di una corrente più grande in un altro circuito. Questa configurazione viene anche chiamata *transistor switch*.

Vediamo di illustrarne il comportamento: quando l'interruttore è aperto non c'è corrente di base ($I_B = 0$) e quindi per via della regola 4 non c'è corrente di collettore ($I_C = 0$). Di conseguenza la lampadina è spenta. Quando l'interruttore viene chiuso la tensione di base sale a $V_B = 0.7V$ (per via del diodo Base-Emitter): la caduta di tensione sulla resistenza di base è $4.3V$ e quindi la corrente di base vale $I_B = 4.3mA$. Applicando direttamente la regola 4 otterremo $I_C = 430mA$ (per $\beta = 100$) ma questo valore è sbagliato. Ciò perché la regola 4 vale solo se viene rispettata la regola 1: per una corrente di collettore di $100mA$ la lampadina ha $12V$ tra i suoi terminali e quindi per ottenere una corrente maggiore dovremmo collegare il collettore ad un punto più negativo del Ground ($0V$). Un transistor non può fare questo ed il risultato è la **saturazione** del transistor: il Collector si porta quanto più

vicino al Ground possibile, ad una tensione chiamata tensione di saturazione $V_{CE(sat)} = 0.05 \sim 0.2V$. In questo caso la lampadina si accende con la tensione di $12V$ ai suoi terminali.

Imporre una corrente di Base maggiore di quanto strettamente necessario (abbiamo usato $4.3mA$ quando in teoria sarebbero bastati $1.2mA$) rende il circuito più conservativo; in questo caso è una buona idea siccome una lampadina fredda consuma più corrente di una lampadina accesa (fino a 5-10 volte), inoltre a causa delle variazioni di β potrebbe essere necessaria una corrente maggiore per portare il transistor in saturazione.



Protezione del transistor con un diodo in antiparallelo

Quando si progettano questi circuiti bisogna: scegliere la resistenza di base in modo da avere un eccesso di corrente di base in modo da tenere sempre il transistor in saturazione e proteggere con un diodo in antiparallelo il transistor se si opera con carichi induttivi (motori, altoparlanti ecc.).

Ci si potrebbe chiedere perché usare un transistor con tutta la sua complessità quando la suo posto si potrebbe usare un interruttore meccanico. Ci sono vari vantaggi:

1. Un transistor può essere pilotato elettricamente da un altro circuito (ad esempio un computer), anche se questo ha tensione differente
2. I transistor permettono di commutare molto rapidamente, tipicamente con tempi nell'ordine dei nanosecondi
3. Sono più affidabili a lungo termine di interruttori meccanici e non soffrono del fenomeno del *contact bounce*¹ tipico degli interruttori meccanici.

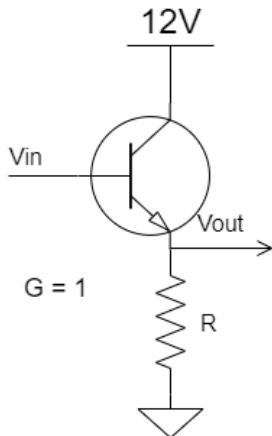
Secondo quanto detto sopra un transistor può operare in tre regioni: **interdizione** (nessuna corrente di Collector), **regione attiva** (una certa I_C e tensione di Collector maggiore di quella di Emitter di più di qualche decimo di Volt) e **saturazione** (e tensione di Collector entro qualche decimo di Volt da quella di

¹ Un interruttore meccanico quando viene attivato non è subito completamente stabile: spesso il contatto si interrompe fino a decine di volte nei primi millisecondi dopo la chiusura

Emitter). Il *transistor switch* è un esempio di circuito *non lineare*: l'uscita non è proporzionale all'entrata; ma varia tra due stati possibili (interdizione o saturazione). Circuiti di questo tipo sono molto comuni e formano la base dell'elettronica digitale anche se per questi circuiti i BJT sono stati quasi completamente soppiantati dai FET.

Esiste un'altra classe di circuiti, lineari questa volta, che usano il transistor nella regione attiva dove i BJT rimangono molto usati. L'analisi di questi circuiti è più complicata ed il modello del transistor che abbiamo illustrato non è sempre sufficiente. Vediamo ora la configurazione più semplice per i circuiti lineari, l'*emitter follower*.

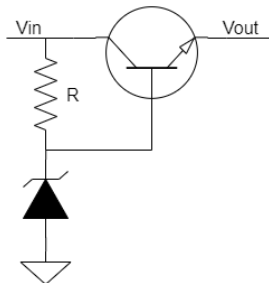
Emitter follower



Vediamo la configurazione di *emitter follower*: in questo circuito la tensione di uscita segue la tensione di ingresso a meno di una caduta di tensione dovuta al diodo B-E $V_E = V_B - 0.7V$. A prima vista non sembra un circuito molto utile ma questo circuito è caratterizzato dall'aver una impedenza di ingresso molto più alta dell'impedenza di uscita. In altre parole, il circuito richiede meno corrente dalla sorgente di segnale V_{in} di quanto sarebbe necessario per pilotare V_{out} direttamente: il circuito agisce come un amplificatore di corrente (e quindi di potenza). In formule possiamo scrivere $Z_{in} = (\beta + 1)Z_{out}$.

Si noti che in questa configurazione un transistor NPN può solo fornire corrente (agire come *source*) e non assorbire corrente (agire come *sink*), quindi se il circuito collegato a V_{out} può fornire corrente la tensione in uscita può essere più alta di

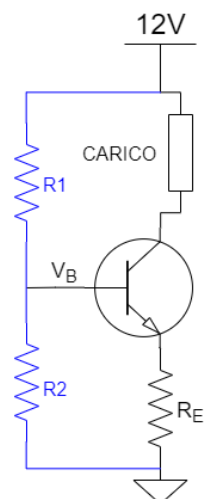
quella in ingresso. Una soluzione a questo problema è quella di usare una coppia di transistor PNP e NPN in una configurazione chiamata *push-pull*.



Questa configurazione è spesso sfruttata per costruire regolatori di tensione in combinazione con un riferimento di tensione (come un diodo zener). Qui il transistor permette, a parità di corrente di uscita, di ridurre la corrente che passa nel diodo e nella resistenza e quindi di ridurre le perdite. La struttura tipica di un regolatore lineare è questa anche se regolatori moderni apportano parecchie migliorie (ad esempio l'uso riferimento di tensione più stabile e protezione del transistor) e a volte usano FET.

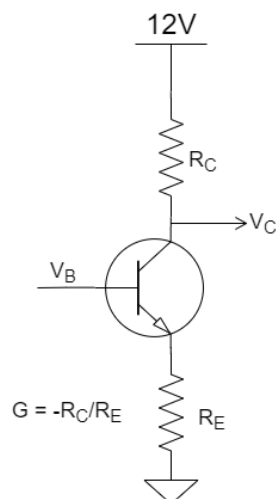
Altri circuiti lineari

SORGENTE DI CORRENTE



$$I_C = (V_B - 0.7V)/R_E$$

AMPLIFICATORE
COMMON EMITTER



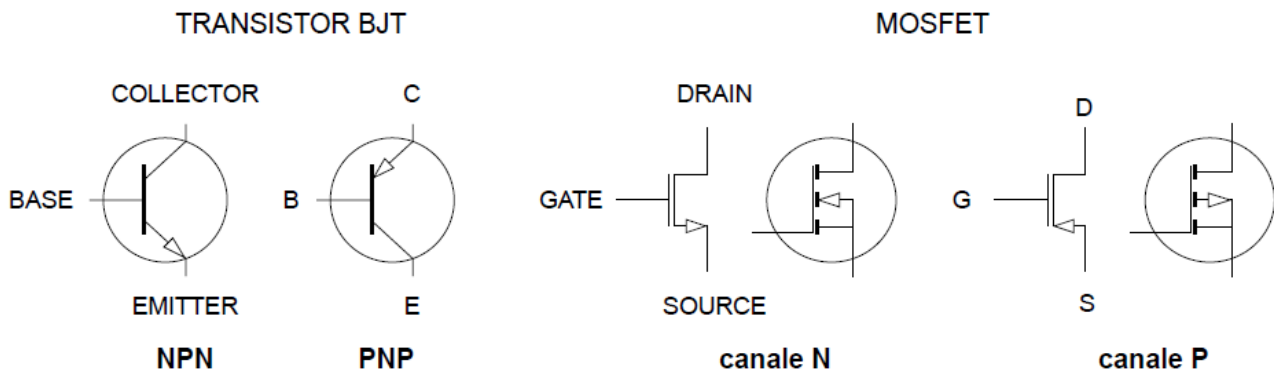
$$V_C = -I_C R_C = -V_B (R_C/R_E)$$

A partire da questa configurazione si possono costruire sorgenti di corrente ed amplificatori di segnale aggiungendo resistenze in maniera appropriata.

L'analisi di questi circuiti è al di fuori dello scopo di questo corso.

Transistor ad effetto di campo (FET)

Introduciamo brevemente i transistor ad effetto di campo, in particolare i MOSFET *enhancement-mode* a canale N e P che sono i più utilizzati e gli equivalenti diretti dei transistor BJT NPN e PNP. I nomi dei terminali sono differenti (Gate, Drain e Source).



La principale differenza con i BJT sta nel fatto che i MOSFET non presentano corrente di base e sono controllati in base alla tensione applicata al terminale di Gate quindi rispetto ai BJT permettono di ridurre il consumo di corrente. Possiamo riassumerne il comportamento in questo modo (per un MOSFET a canale n): quando la tensione V_{GS} supera un certo valore (chiamato $V_{GS(th)}$) il MOSFET inizia a condurre una quantità di corrente I_D proporzionale a V_{GS} . Si ha un fenomeno analogo alla saturazione dei BJT per valori di V_{GS} elevati che permette il passaggio di correnti ampie con bassissime perdite.

I valori di $V_{GS(th)}$ possono essere anche abbastanza alti (fino ai 5V) e la tensione V_{GS} di saturazione è normalmente attorno ai 10V quindi i MOSFET standard non sono adatti ai circuiti a bassa tensione in cui bisogna impiegare MOSFET particolari chiamati *MOSFET a livello logico* che hanno tensioni di saturazione attorno ai 2-3V.