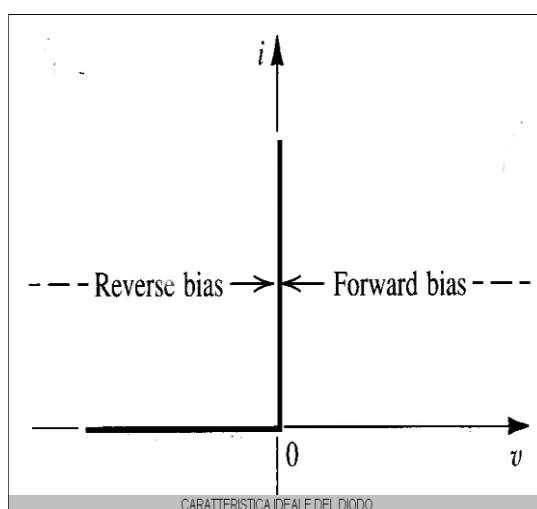


Corso di Elettronica

IL DIODO E IL BJT

1) IL DIODO

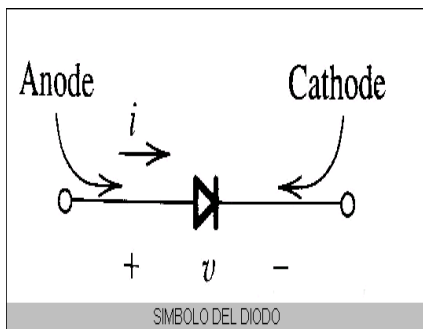
Il più semplice e fondamentale elemento circuitale di tipo non lineare è il **DIODO**; esso, infatti, mostra una caratteristica (corrente-tensione) rappresentata non da una retta, come per il resistore, ma da una linea curva. Il diodo è un elemento a due terminali e il suo uso più comune è nella realizzazione dei raddrizzatori, che convertono un segnale alternato in continuo. In base al tipo di approssimazione che si intende utilizzare, è possibile considerare diversi tipi di relazione corrente-tensione, passando da un diodo reale a un diodo ideale. Il comportamento del diodo ideale è il seguente: se ai suoi capi viene applicata una tensione negativa (relativamente alla direzione permessa), non fluisce corrente e il diodo appare come un circuito aperto. In questo caso si dice che il diodo opera in



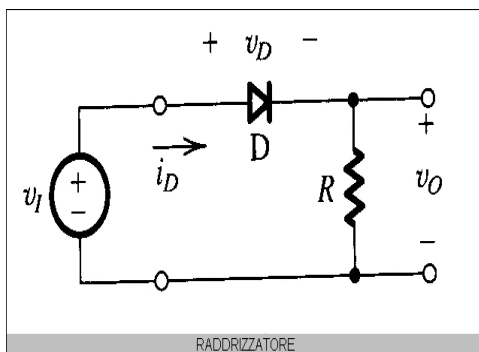
Polarizzazione inversa;

in questa modalità la corrente è nulla, la tensione è quella attribuita dall'esterno e il diodo si dice in regione di **cut off**. Se invece è applicata una corrente positiva

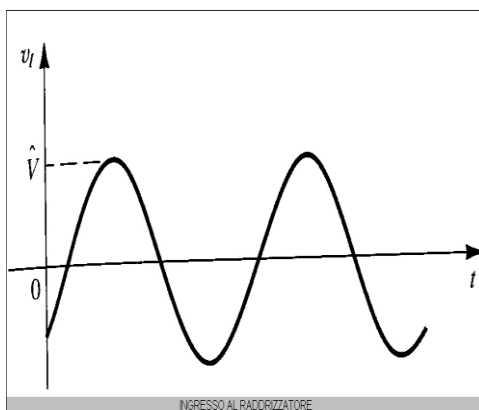
(rispetto alla direzione ammessa), allora ai capi del



diodo la tensione è nulla; il diodo, in polarizzazione diretta, si comporta come un corto circuito e si dice in regione di **turned on**. Il terminale positivo del diodo è detto **ANODO**, quello negativo è detto **CATODO**. Se un segnale attraversa circuiti in cui sono presenti diodi, allora non è più possibile effettuare una analisi di tipo lineare. Ci sono, però, circuiti che sfruttano



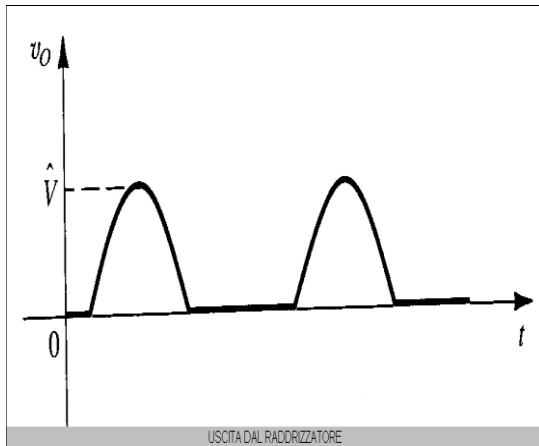
utilmente la non linearità del diodo per particolari applicazioni; un esempio è rappresentato dal circuito raddrizzatore, costituito dalla serie di un diodo con un resistore: dato un



ingresso di tipo sinusoidale e un diodo ideale, durante la fase positiva del segnale, il diodo conduce e la corrente fluisce in

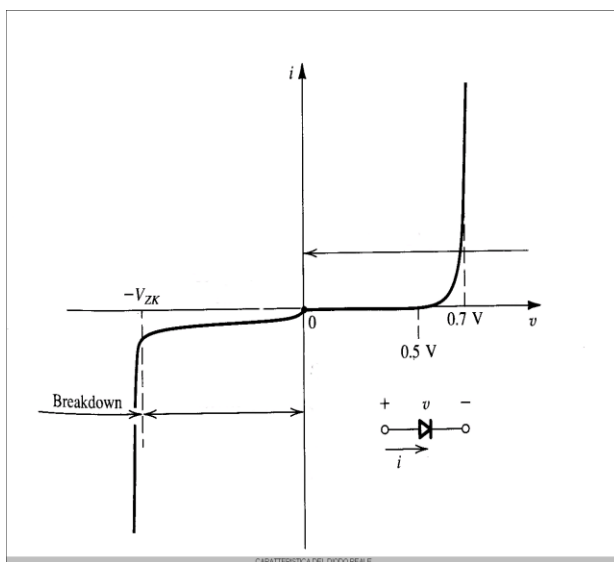
direzione diretta, con una caduta di tensione, ai capi del diodo, molto piccola, idealmente nulla. Durante la fase negativa del segnale d'ingresso il diodo opera in

direzione inversa, non conduce e quindi l'uscita è nulla. In definitiva, l'uscita è unidirezionale e il suo valor medio è finito o, come si dice, si ha una



componente continua **dc**. Quindi un circuito raddrizzatore può essere usato per generare un segnale in continua a partire da uno in alternata. Nello studio

della caratteristica di un diodo reale è possibile distinguere tre regioni operative: 1) la regione polarizzata direttamente con $v > 0$; 2) la regione polarizzata inversamente con $v < 0$; 3) la regione di

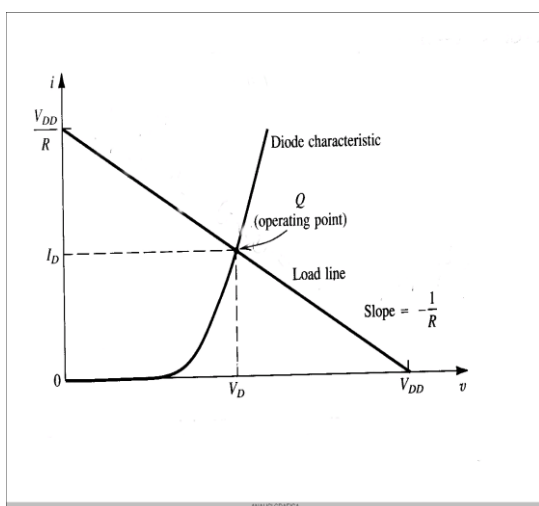


breakdown (rottura) con $v < -V_{zk}$ (tensione di breakdown). In polarizzazione diretta la relazione corrente-tensione è espressa

dall'equazione $i = I_s(e^{v/nV_T} - 1)$, dove

$I_s = 10^{-15} \text{ A}$ è la **corrente di saturazione** proporzionale alla sezione del diodo, $V_T = KT/q = 25.2 \text{ mV}$ (a 20° C) è la **tensione termica**. In tale regione la corrente

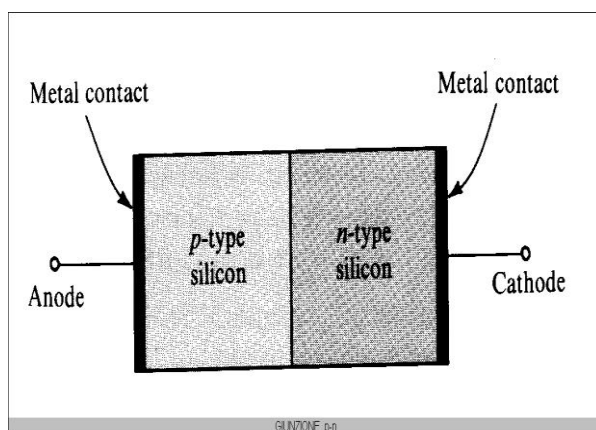
risulta trascurabile per tensioni inferiori a 0,5V, tensione detta di **cut-in** (ingresso). Per un diodo in piena conduzione la tensione può essere approssimata ad un valore di 0,7V. In polarizzazione inversa la corrente è pari a $i = -I_s$. In regione di breakdown, con $v < -V_{zk}$, la corrente cresce rapidamente per piccole variazioni di tensione. Questo particolare andamento della corrente permette di utilizzare tale regione per la regolazione di tensione. Da un punto di vista circuitale, un diodo reale può essere rappresentato da un diodo ideale con in serie un generatore di tensione in continua e eventualmente (in base al tipo di approssimazione fatta) un resistore. Per quanto riguarda lo studio circuitale, esso può essere condotto in due modi: per successive approssimazioni mediante una analisi di tipo iterativo, oppure (ed è la soluzione



più ampiamente adottata) mediante una analisi di tipo grafico, realizzando un sistema di equazioni con l'equazione caratteristica del diodo insieme alla retta che rappresenta l'equazione (**retta di**

carico) di Kirchoff che realizza l'equilibrio del

circuito; l'intersezione di tali equazioni fornisce il **punto di lavoro Q**, punto a cui in seguito andrà sovrapposto il segnale di interesse. Nel caso in cui il segnale sovrapposto sia dello stesso ordine di grandezza della tensione termica V_T , allora si può effettuare una **approssimazione per piccoli segnali** e considerare la caratteristica semplificata seguente: $i_D(t) \cong I_D (1 + v_D/nV_T)$. Consideriamo ora la fisica che è alla base del funzionamento del diodo. Il diodo a semiconduttore è una **giunzione p-n**. Tale giunzione



consiste di una parte di silicio di tipo p (arricchita cioè di cariche positive), messa a contatto con una parte di tipo n (arricchita con cariche negative).

Cioè, il materiale è lo stesso ma le due parti sono diversamente "drogate". Questo stesso tipo di giunzione è anche alla base dei **transistors**. Un cristallo di silicio puro ha una struttura regolare, con atomi legati tra loro tramite **legami covalenti**, con 4 elettroni messi a disposizione da ogni atomo di silicio. A basse temperature i legami sono forti, non ci sono elettroni liberi e quindi non c'è possibilità di avere

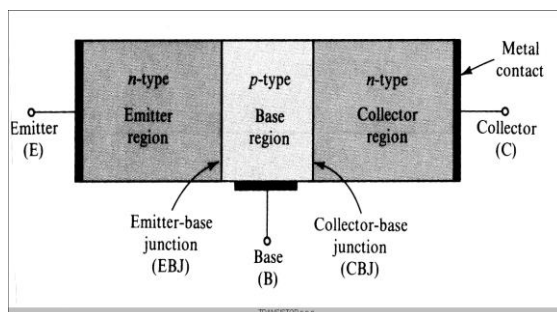
conduzione di corrente elettrica. A temperatura ambiente qualche legame covalente può rompersi e liberare così uno ione negativo (elettrone n) e uno ione positivo (lacuna p): questo processo è detto **ionizzazione termica**. Ogni elettrone liberato può essere attratto da una lacuna vicina: tale fenomeno è detto **ricombinazione**. All'aumentare della temperatura questi fenomeni aumentano producendo quindi un trasporto di cariche. In condizioni di equilibrio la velocità di ionizzazione è pari a quella di ricombinazione e sono uguali le concentrazioni di ioni: $n=p=n_i$, dove con n_i si indica la concentrazione in un silicio puro per una certa temperatura. La ragione per cui tale silicio è detto **semiconduttore** dipende dal fatto che la sua conduttività, dovuta al numero di cariche libere, è compresa tra quella dei metalli (conduttori) e quella degli isolanti. Il movimento di elettroni e lacune nel cristallo può avvenire per due meccanismi: la **diffusione** e il **trascinamento**. La diffusione è associata al moto casuale per agitazione termica ed è dovuta alle differenti concentrazioni di cariche positive e negative, concentrazioni che tendono ad uniformarsi all'interno dell'intero cristallo, producendo così un flusso di carica detto **corrente di diffusione**. Il trascinamento invece è l'azione che un campo, applicato dall'esterno, svolge sulle cariche

liberi presenti nel cristallo è ciò produce la **corrente di trascinamento**. Il drogaggio del silicio viene effettuato inserendo degli atomi estranei (impurità) con diverse capacità di creare legami: in particolare introducendo un certo numero di atomi di fosforo (pentavalente) si arricchisce il silicio di cariche negative n; inserendo atomi di boro (trivalente) si arricchisce il silicio di cariche positive p. All'equilibrio, nella zona centrale del silicio drogato si creerà una barriera di potenziale (**regione a svuotamento o di carica spaziale**) che impedirà il passaggio di cariche da una parte all'altra del silicio, riducendo fortemente la corrente di diffusione; solo l'applicazione di un opportuno campo esterno potrà favorire o arrestare completamente il passaggio di tale corrente.

2) IL BJT

Il BJT (transistor a giunzione bipolare) è un dispositivo a tre terminali ed è utilizzato in molte applicazioni, dall'amplificazione di segnale, alla realizzazione di circuiti logici. Il principio base del transistor è: l'applicazione di una tensione tra due terminali per controllare il flusso di corrente nel terzo terminale. Il BJT consiste di due giunzioni p-n

connesse in serie; la corrente è condotta sia dagli elettroni, sia dalle lacune, da cui segue il termine bipolare. Le giunzioni possono essere realizzate in modo da poter ottenere due possibili configurazioni: n-p-n oppure p-n-p; le tre regioni sono dette **emettitore (E)**, **base (B)**, **collettore (C)**. Ad ogni



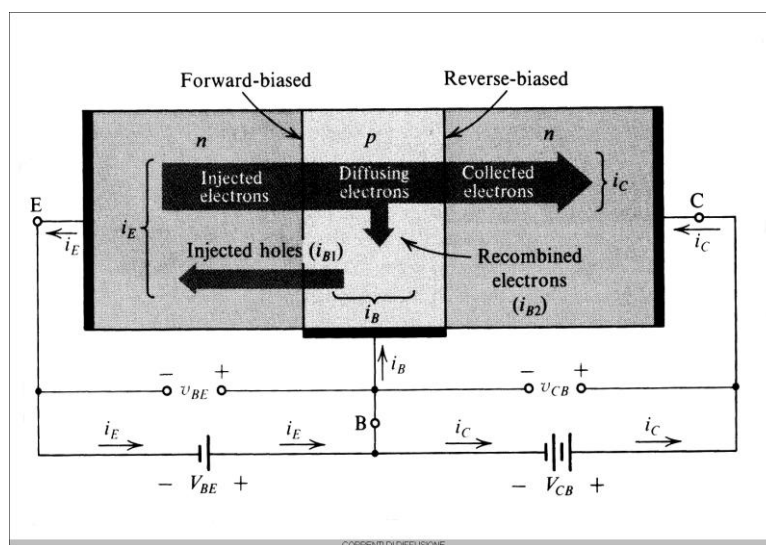
regione è collegato un terminale e le due giunzioni sono quelle costituite da: emettitore-base (EBJ) e

collettore-base (CBJ). In base alla polarizzazione (diretta o inversa) di ognuna delle giunzioni, si ottengono differenti modi di funzionamento del BJT.

MODI	EBJ	CBJ
INTERDIZIONE	INVERSA	INVERSA
ATTIVO	DIRETTA	INVERSA
SATURAZIONE	DIRETTA	DIRETTA

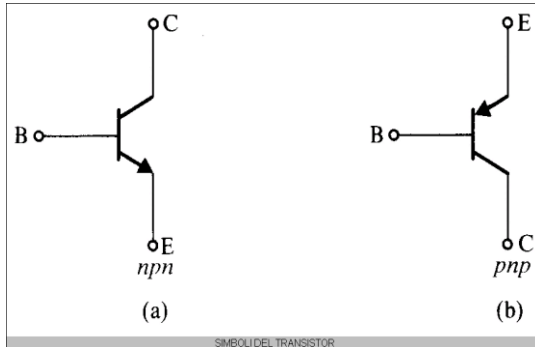
Quando il transistor opera come amplificatore si utilizza il modo attivo; nelle applicazioni come interruttore si utilizzano i modi di interdizione (spento) e saturazione (acceso). Analizzando il transistor n-p-n, per funzionare in modo attivo la

tensione V_{BE} pone la base a un potenziale più alto rispetto all'emettitore (diretta), mentre la tensione V_{CB} polarizza inversamente la giunzione collettore-base. Il flusso di corrente più importante è quello di diffusione dovuto ai portatori maggioritari, cioè a quelle cariche che in ogni regione risultano prevalenti e che tendono a "diffondere" verso le regioni adiacenti. In sintesi la tensione di polarizzazione diretta V_{BE} provoca il flusso di una corrente di tipo esponenziale i_C nel terminale di collettore; quindi in modo attivo il collettore si comporta come una sorgente di corrente costante con



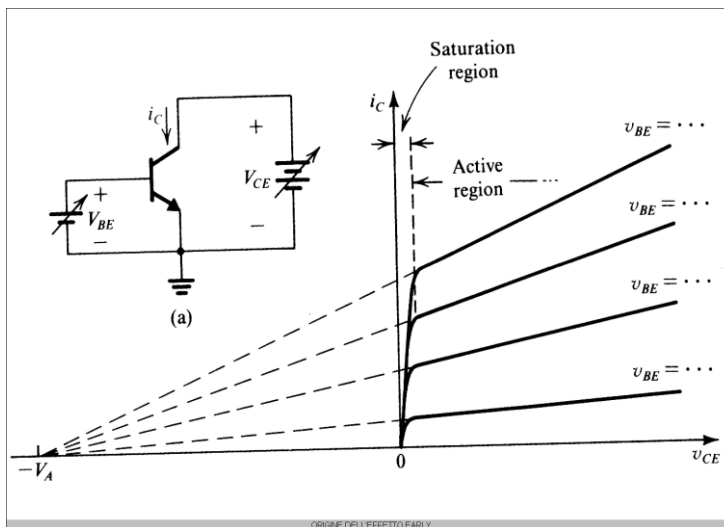
valore determinato da V_{BE} . La corrente i_B è pari a $i_B = i_C / \beta$, dove β è il guadagno di corrente a emettitore comune, inoltre $i_E = i_B + i_C$. Il transistor p-n-p opera in modo simile a quello n-p-n, occorre soltanto porre attenzione nel modificare tutte le polarità delle tensioni esterne. Il BJT può essere rappresentato da un simbolo circuitale, in cui l'emettitore è identificato da

una freccia che indica la polarità del dispositivo, con il verso della corrente dall'alto verso il basso. Tale freccia sull'emettitore indica la polarità emettitore-base per polarizzare tale giunzione in modo diretto. In un p-n-p la V_{EB} è positiva, in un n-p-n è la V_{BE} ad



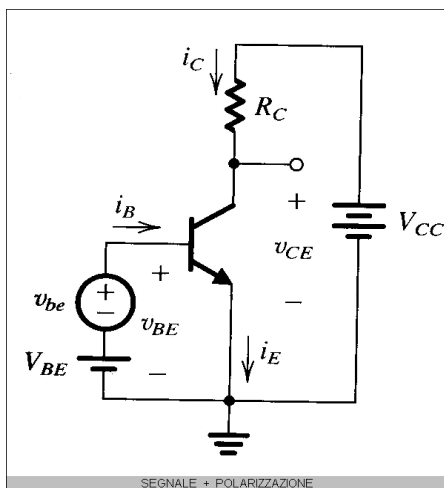
essere positiva. Le relazioni tra le correnti di un BJT e la tensione di polarizzazione sono di tipo esponenziale, in particolare si ha:

$i_C = I_S e^{(V_{BE}/nV_T)}$. Per $V_{BE} < 0,5 \text{ V}$ la corrente è trascurabile, per $0,6\text{V} < V_{BE} < 0,8\text{V}$ passa corrente. Si possono considerare due caratteristiche importanti: quella di ingresso $i_B - V_{BE}$, e quella di uscita $i_C - V_{CE}$. In regione attiva, i BJT reali mostrano una dipendenza di i_C dalla tensione di collettore e di questo si tiene conto mediante l'**effetto Early**, la cui tensione ($-V_A$) si



trova considerando il punto di incontro di tutte le curve $i_C - V_{CE}$. Per poter funzionare

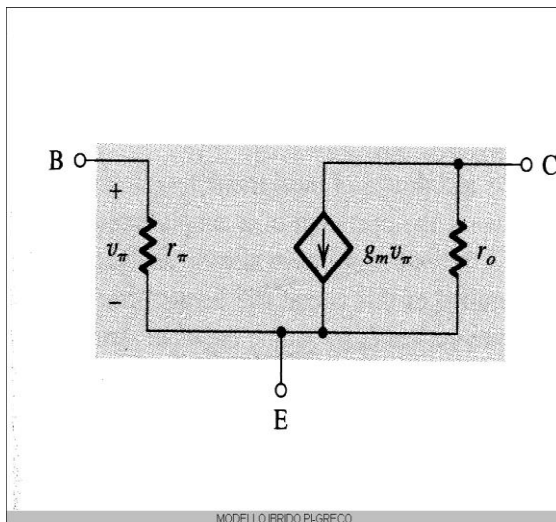
come amplificatore un transistor deve operare in regione attiva; il problema della polarizzazione è di stabilire una corrente continua costante nell'emettitore o nel collettore, cioè una corrente insensibile alle variazioni di temperatura, di β e così via. Anche per il transistor può valere l'approssimazione per piccoli segnali, in particolare se il segnale da amplificare vale $v_{be} < 10 \text{ mV}$ e quindi l'espressione della corrente



diventa: $i_C \cong I_C(1 + v_{be}/V_T)$. Da tale espressione si nota come la corrente di collettore sia costituita da due componenti: una dovuta alla polarizzazione $i_C = I_C$, e una dovuta al segnale vero e proprio $i_C = I_C v_{be}/V_T$. La

grandezza $g_m = I_C/V_T$ è detta **transconduttanza** e rappresenta la pendenza della curva i_B - V_{BE} nel punto di polarizzazione Q. In sintesi, l'approssimazione per piccoli segnali è possibile quando la loro ampiezza è tale che il funzionamento è ristretto ad un segmento quasi lineare della curva i_B - V_{BE} . Aumentando tale ampiezza compaiono componenti non lineari nella corrente di collettore in relazione a v_{be} ; allora per piccoli segnali ($v_{be} \ll V_T$) il transistor si comporta come una sorgente di corrente controllata in tensione.

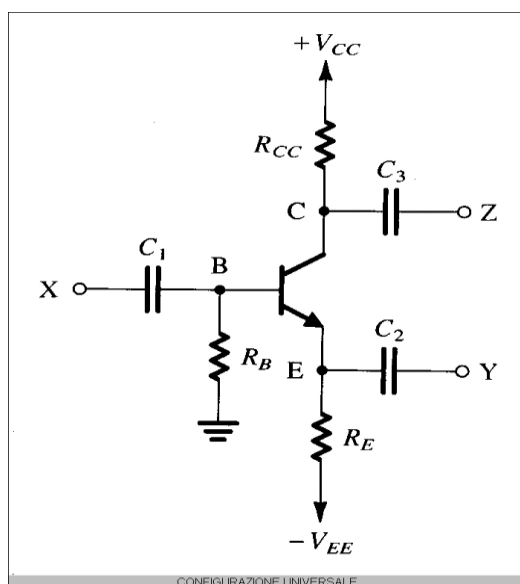
La porta d'ingresso di tale sorgente è tra base ed emettitore, l'uscita tra collettore ed emettitore; la relativa transconduttanza è g_m e la resistenza di uscita r_o è molto grande (non infinita a causa dell'effetto Early), cioè con andamento quasi parallelo all'asse v_{CE} . Altre resistenze sono: quella d'ingresso $r_\pi = v_{be}/i_b$ (tra segnale e corrente di base dovuta al segnale) e quella d'emettitore $r_e = V_T/I_E$. Nella pratica, ogni corrente e tensione in un circuito d'amplificazione è composta da due componenti: una continua dovuta alla polarizzazione e una dovuta al segnale. Dal punto di vista circuitale, un BJT a piccoli segnali può essere rappresentato da diversi tipi di configurazioni, in particolare si utilizza il **modello ibrido- π** , in cui il transistor appare come un generatore di corrente controllato in tensione e relative resistenze. Si noti che ogni modello rappresenta il transistor ad un certo punto di polarizzazione. I passi da eseguire nello studio di un circuito a transistor per piccoli segnali sono i seguenti: 1) si calcola prima il punto di funzionamento Q (I_B, I_C, V_C) in continua annullando il



controllato in tensione e relative resistenze. Si noti che ogni modello rappresenta il transistor ad un certo punto di polarizzazione. I passi da eseguire nello studio di un circuito a transistor per piccoli

segnali sono i seguenti: 1) si calcola prima il punto di funzionamento Q (I_B, I_C, V_C) in continua annullando il

segnale d'ingresso; 2) si calcolano i parametri del modello a piccoli segnali (r_e , g_m , r_π); 3) infine si eliminano le sorgenti continue l'ingresso viene collegato al modello che sostituisce il BJT e si determinano le quantità richieste (guadagno in tensione, resistenze, ecc.). Anche per un transistor è possibile effettuare una analisi di tipo grafico: prima si elimina il segnale e d'ingresso e si trova la corrente di polarizzazione di base I_B , sovrapponendo la retta di carico con pendenza $-1/R_B$ con la caratteristica del diodo, poi si studiano le caratteristiche i_C - V_{CE} sovrapposte alla retta di carico con pendenza $-1/R_C$. A partire da una configurazione universale, che comprende resistenze di polarizzazione, tensioni di



alimentazione e condensatori di accoppiamento, è possibile ottenere tre diverse configurazioni possibili; in funzione di dove venga posto l'ingresso e da dove venga prelevata l'uscita, possiamo distinguere le

seguenti configurazioni: **base comune** (ingresso sull'emettitore e uscita sul collettore, con base a

massa), **emettitore comune** (ingresso sulla base e uscita sul collettore, con emettitore a massa), **collettore comune** (ingresso sulla base e uscita sull'emettitore, con collettore a massa). Ognuna di queste configurazioni si può far preferire in certi casi quando si desiderano particolari prestazioni, in termini di guadagni, resistenze d'ingresso, resistenze di uscita, ecc. Per finire accenniamo al fatto che solitamente lo studio di un BJT viene effettuato a medie frequenze, dove è possibile considerare i condensatori di accoppiamento (che tagliano la risposta a bassa frequenza) come dei corto-circuiti e dove è possibile trascurare le capacità interne proprie del transistor (che tagliano la risposta ad alta frequenza).