

```

210 FOR A=1 TO N
220 TRC=RC*RL(A)/(RC+RL(A))
230 P=.5*ICQ^2*TRC
240 EFF=P/(VCC*ICQ)
250 IF EFF>.25 THEN PRINT "L'AMPLIFICATORE NON STA FUNZIONANDO IN CLASSE A" ELSE
PRINT RL(A), EFF
260 NEXT

```

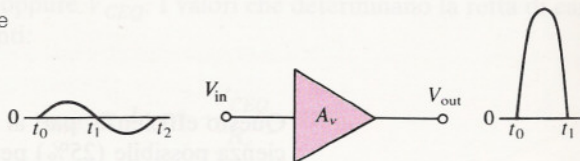
**CHECK-UP  
DEL  
PARAGRAFO 10.1**

1. Qual è la ragione fondamentale per cui la retta di carico dinamica è diversa dalla retta di carico statica?
2. Qual è la collocazione ottimale del punto Q per gli amplificatori in classe A?
3. Quanto vale la massima efficienza di un amplificatore in classe A?
4. Un dato amplificatore è caratterizzato da un punto Q perfettamente centrato, definito da  $I_{CQ} = 10 \text{ mA}$  e  $V_{CEQ} = 7 \text{ V}$ . Quanto vale la massima potenza di uscita dinamica?

## 10.2 GLI AMPLIFICATORI PUSH-PULL IN CLASSE B

Un amplificatore polarizzato in modo tale da funzionare nella zona lineare per i primi  $180^\circ$  del segnale di ingresso e in cutoff per i rimanenti  $180^\circ$ , è detto amplificatore *in classe B*. Tale situazione di funzionamento è illustrata nella figura 10.18, che mostra l'andamento della forma d'onda di uscita in relazione all'andamento della forma d'onda di ingresso.

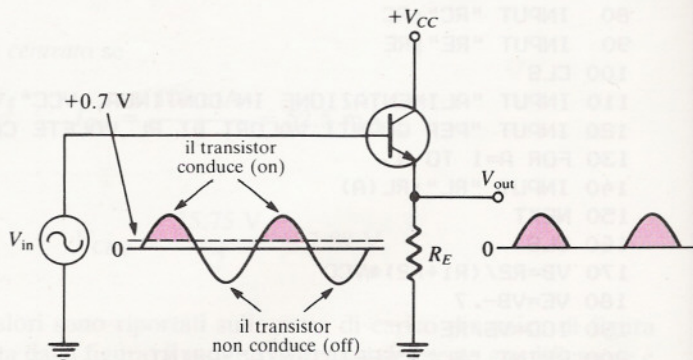
**Figura 10.18** Amplificatore in classe B (non invertente).



### Il punto Q è posizionato in zona di cutoff

Un amplificatore in classe B viene polarizzato in cutoff in modo tale che risulti  $I_{CQ} = 0$  e  $V_{CEQ} = V_{CE(\text{cutoff})}$ . Questo tipo di amplificatore può uscire dal cutoff e funzionare nella sua zona lineare solo quando il segnale di ingresso lo porta in conduzione. Tale situazione è illustrata nella figura 10.19 nel caso di una configurazione a emitter-follower.

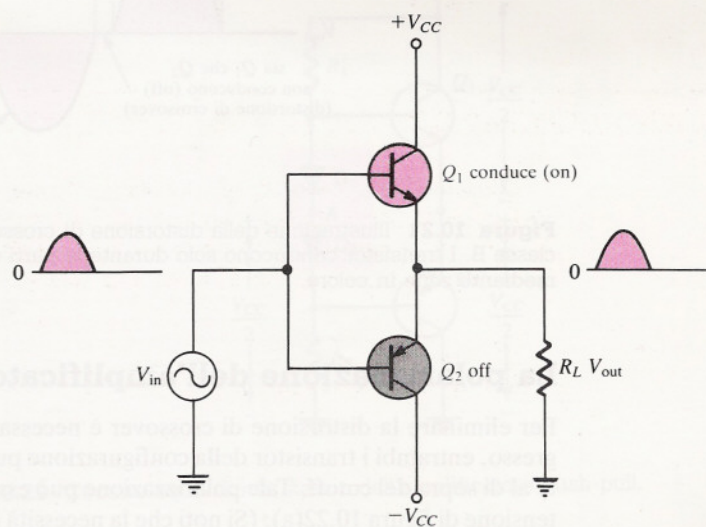
**Figura 10.19** Amplificatore in classe B a collettore comune.



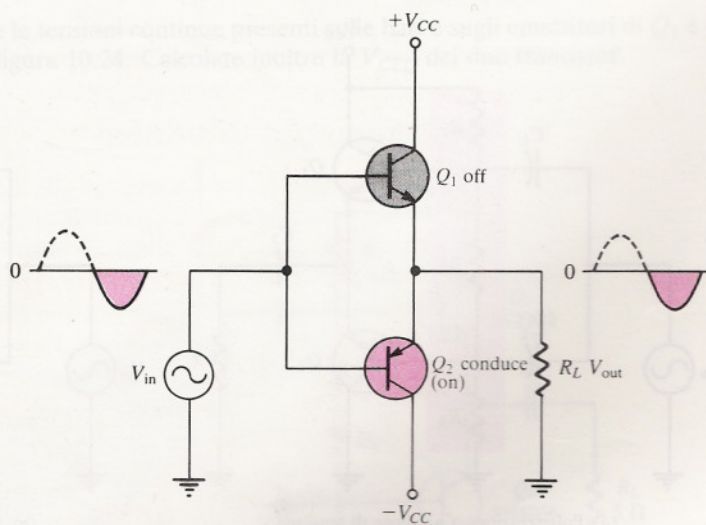
Ovviamente, in questo caso, l'uscita non è l'esatta riproduzione dell'ingresso. Per ottenere una riproduzione abbastanza accettabile della forma d'onda di ingresso si deve ricorrere a una configurazione a due transistor, nota come *amplificatore push-pull*.

### Il funzionamento push-pull

La figura 10.20 riporta un esempio di amplificatore push-pull in classe B costituito da due emitter-follower. Si tratta di un amplificatore a *simmetria complementare*, perché uno dei due emitter-follower utilizza un transistor npn, mentre l'altro utilizza un transistor pnp, il che fa sì che essi conducano in corrispondenza delle semionde *opposte* del segnale di ingresso. Si osservi l'assenza della tensione di polarizzazione statica della base ( $V_B = 0$ ); questo, perché i transistor vengono pilotati in conduzione unicamente dal segnale di ingresso.  $Q_1$  conduce durante la semionda positiva del segnale di ingresso, mentre  $Q_2$  conduce durante la semionda negativa.



(a) Semionda positiva

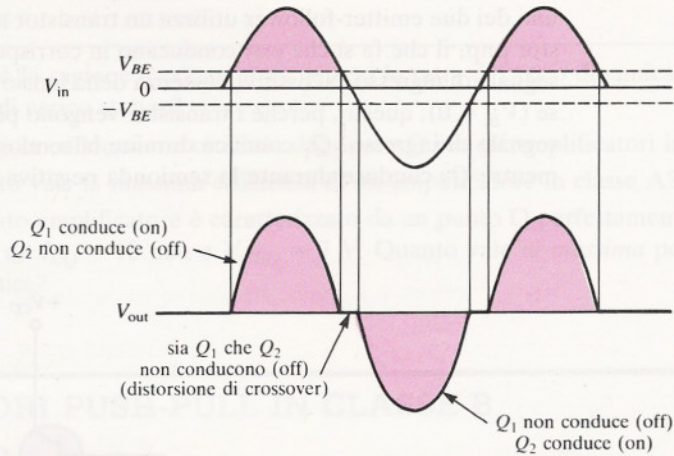


(b) Semionda negativa

**Figura 10.20** Funzionamento di un amplificatore push-pull in classe B.

## La distorsione di crossover

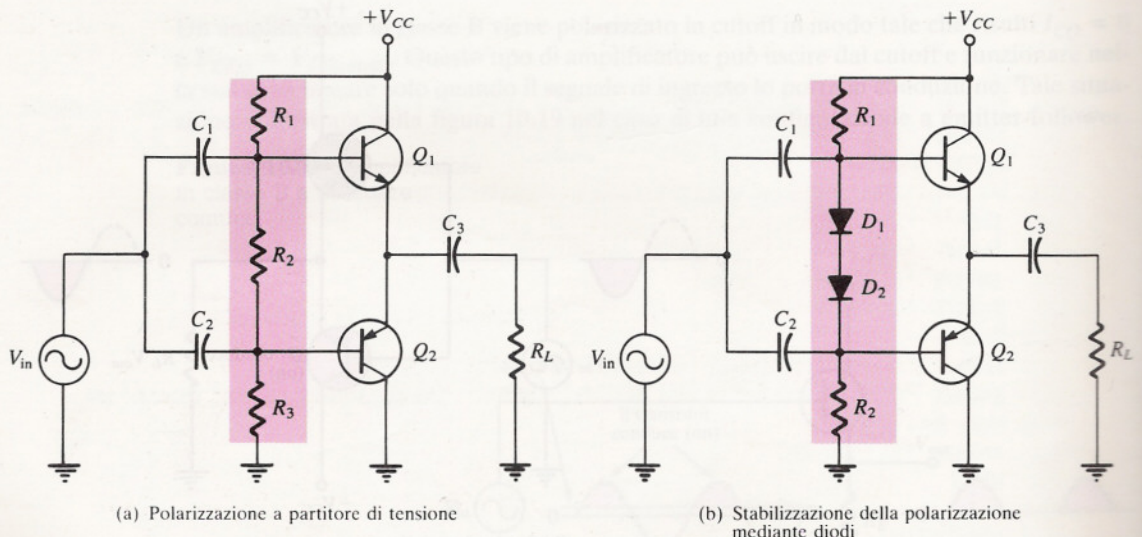
Se la tensione continua applicata alla base vale 0, allora, per poter fare entrare in conduzione un transistor, il segnale di ingresso deve superare  $V_{BE}$ . Ciò fa sì che, come mostra la figura 10.21, vi sia, tra la semionda positiva e quella negativa del segnale di ingresso, un intervallo di tempo durante il quale nessuno dei due transistor si trova in conduzione. La conseguente distorsione della forma d'onda di uscita viene detta distorsione di *crossover*.



**Figura 10.21** Illustrazione della distorsione di crossover di un amplificatore push-pull in classe B. I transistor conducono solo durante le parti del segnale di ingresso indicate mediante zone in colore.

## La polarizzazione dell'amplificatore push-pull

Per eliminare la distorsione di crossover è necessario che, in assenza di segnale di ingresso, entrambi i transistor della configurazione push-pull siano polarizzati leggermente al di sopra del cutoff. Tale polarizzazione può essere ottenuta mediante il partitore di tensione di figura 10.22(a). (Si noti che la necessità di un'alimentazione a doppia polarità viene eliminata accoppiando  $R_L$  capacitivamente.) Con questo circuito, però, è diffi-



**Figura 10.22** La polarizzazione dell'amplificatore push-pull adottata per eliminare la distorsione di crossover.

cile mantenere stabile la polarizzazione in conseguenza del fatto che  $V_{BE}$  varia al variare della temperatura. Nella figura 10.22(b) viene riportata una configurazione circuitale più adatta allo scopo. Se infatti le caratteristiche dei diodi  $D_1$  e  $D_2$  sono esattamente uguali alle caratteristiche di transconduttanza dei transistor, è possibile mantenere stabile la polarizzazione. (In realtà, dato che tale uguaglianza non è mai perfettamente verificata, la polarizzazione non è stabile al cento per cento, ma lo è comunque entro limiti ampiamente accettabili.)

Il circuito equivalente statico dell'amplificatore push-pull è riportato nella figura 10.23. Le resistenze  $R_1$  e  $R_2$  sono uguali e, pertanto, la tensione al punto  $A$ , tra i due diodi, vale  $V_{CC}/2$ . Supponendo che siano identici sia i due diodi che i due transistor, la caduta di tensione ai capi di  $D_1$  è uguale alla  $V_{BE}$  di  $Q_1$  e la caduta di tensione ai capi di  $D_2$  è uguale alla  $V_{BE}$  di  $Q_2$ . Di conseguenza, anche la tensione sugli emettitori vale  $V_{CC}/2$  e, pertanto,  $V_{CEQ_1} = V_{CEQ_2} = V_{CC}/2$ , com'è indicato sulla figura 10.23. Dato che entrambi i transistor sono polarizzati in prossimità del cutoff, si ha che  $I_{CQ} \approx 0$ .

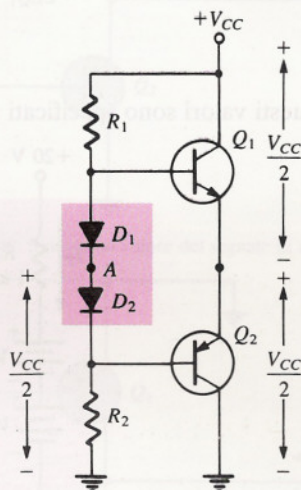


Figura 10.23 Circuito equivalente statico dell'amplificatore push-pull.

**Esempio 10.5** Calcolate le tensioni continue presenti sulle basi e sugli emettitori di  $Q_1$  e  $Q_2$  del circuito di figura 10.24. Calcolate inoltre la  $V_{CEQ}$  dei due transistor.

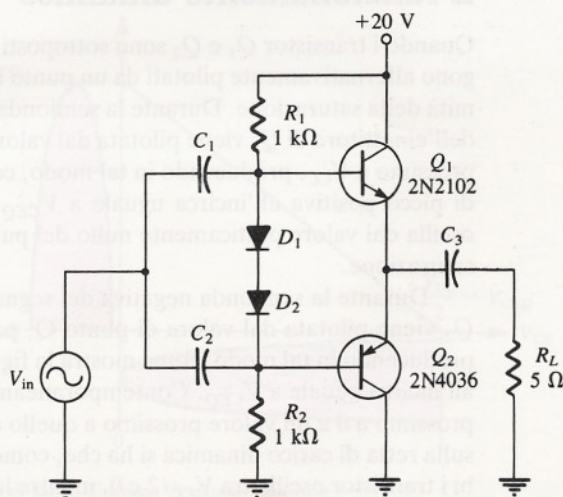
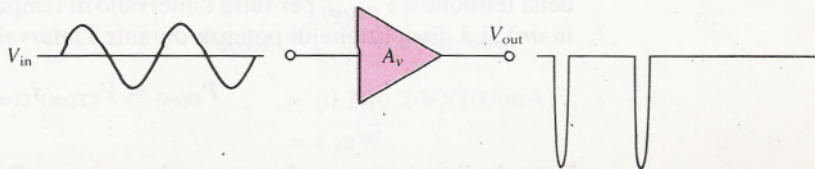


Figura 10.24

## 10.3 GLI AMPLIFICATORI IN CLASSE C

Gli amplificatori *in classe C* vengono polarizzati in modo tale che, come mostra la figura 10.29, la conduzione si verifichi per un intervallo molto inferiore a  $180^\circ$ . Gli amplificatori in classe C sono più efficienti sia di quelli in classe A, sia degli amplificatori push-pull in classe B. Ciò significa che dal funzionamento in classe C è possibile ottenere una maggior potenza di uscita. Poiché la forma d'onda di uscita è fortemente distorta, l'uso degli amplificatori in classe C viene generalmente limitato a particolari applicazioni, come ad esempio gli amplificatori accordati a radiofrequenze (RF).

Figura 10.29 Amplificatore in classe C.



### Principio di funzionamento

Nella figura 10.30(a) è riportato lo schema fondamentale di un amplificatore in classe C a emettitore comune con carico resistivo. Tale amplificatore viene polarizzato *al di sotto del cutoff* mediante l'alimentazione  $-V_{BB}$ . La tensione alternata del segnale di ingresso presenta un valore di picco leggermente superiore a  $V_{BB} + V_{BE}$ , di modo che la tensione presente sulla base può superare la barriera di potenziale della giunzione base-emettitore solo per un breve intervallo di tempo, posizionato nell'intorno del picco positivo di ciascuna semionda, come si può vedere dalla figura 10.30(b). È appunto durante tale breve intervallo di tempo che il transistor entra in conduzione. Sfruttando, come mostra la figura 10.30(c), l'intera retta di carico dinamica, la massima corrente di collettore vale all'incirca  $I_{C(sat)}$  e la minima tensione di collettore vale all'incirca  $V_{CE(sat)}$ , che è molto prossima a 0.

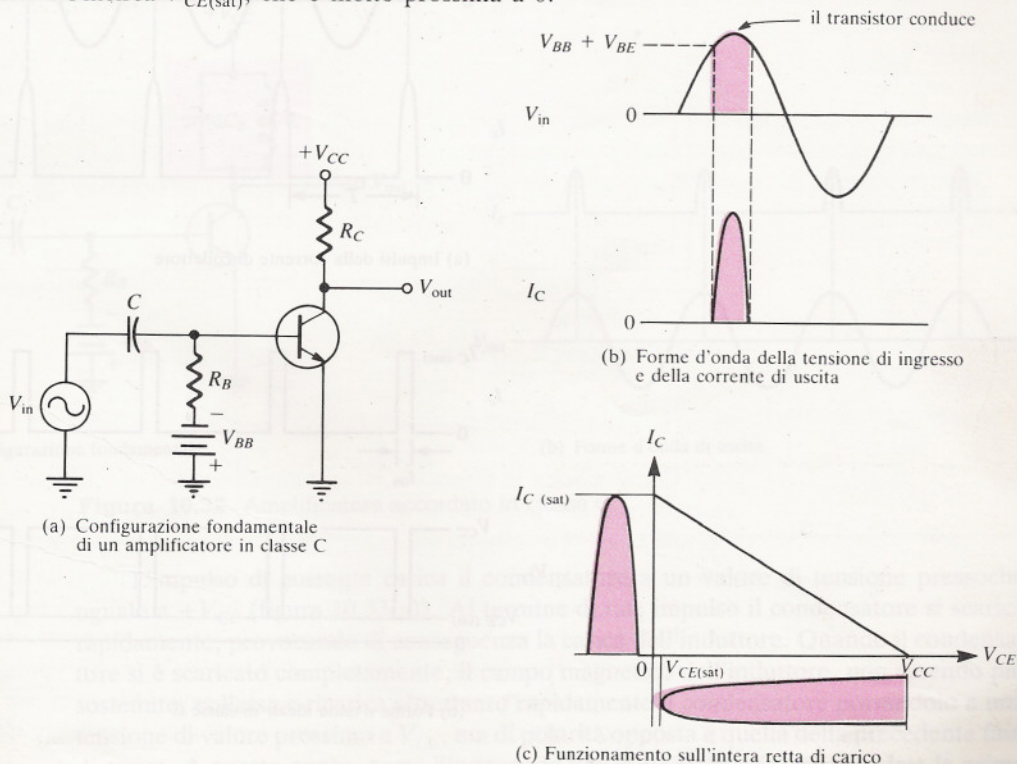


Figura 10.30 Funzionamento di un amplificatore in classe C.

**Esempio 10.8** Un amplificatore in classe C viene pilotato mediante un segnale a 200 kHz. Il transistor conduce per  $1 \mu\text{s}$  e l'amplificatore funziona utilizzando il 100% della sua retta di carico. Supponendo  $I_{C(\text{sat})} = 100 \text{ mA}$  e  $V_{CE(\text{sat})} = 0.2 \text{ V}$ , calcolate la dissipazione media di potenza.

Soluzione

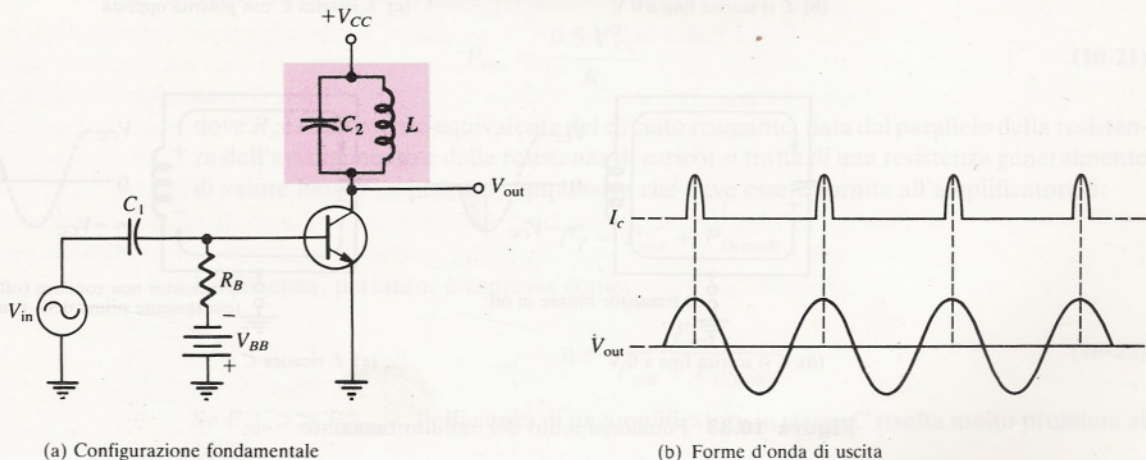
$$T = \frac{1}{200 \text{ kHz}} = 5 \mu\text{s}$$

Quindi:

$$\begin{aligned} P_{D(\text{med})} &= \left( \frac{t_{\text{on}}}{T} \right) V_{CE(\text{sat})} I_{C(\text{sat})} \\ &= (0.2)(0.2 \text{ V})(100 \text{ mA}) \\ &= 4 \text{ mW} \end{aligned}$$

### Il funzionamento accordato

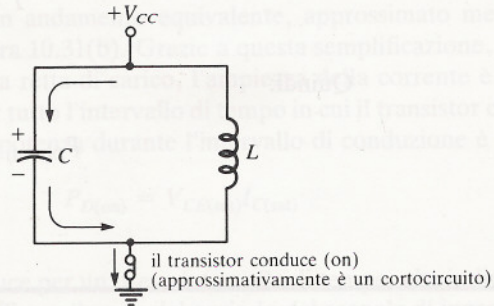
Poiché la tensione di collettore (cioè di uscita) non è una riproduzione fedele della forma d'onda di ingresso, un amplificatore in classe C caricato resistivamente non è di alcuna utilità nelle applicazioni di tipo lineare. È necessario, pertanto, utilizzare l'amplificatore in classe C collegato con un *circuito risonante parallelo*, come indicato in figura 10.32(a). La frequenza di risonanza di tale circuito viene determinata mediante la relazione  $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ . Come mostra la figura 10.32(b), il breve impulso della corrente di collettore che si ha in corrispondenza di ogni periodo del segnale di ingresso è in grado di sostenere l'oscillazione del circuito risonante, per cui è possibile produrre in uscita una tensione ad andamento sinusoidale.



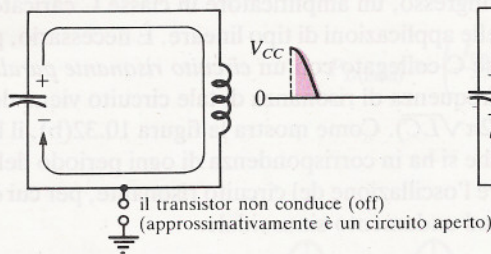
**Figura 10.32** Amplificatore accordato in classe C.

L'impulso di corrente carica il condensatore a un valore di tensione pressoché uguale a  $+V_{CC}$  (figura 10.33(a)). Al termine di tale impulso il condensatore si scarica rapidamente, provocando di conseguenza la carica dell'induttore. Quando il condensatore si è scaricato completamente, il campo magnetico dell'induttore, non essendo più sostenuto, collapsa e ricarica altrettanto rapidamente il condensatore portandolo a una tensione di valore prossimo a  $V_{CC}$ , ma di polarità opposta a quella della precedente fase di carica. A questo punto, come illustrano le figure 10.33(b) e (c), si completa la prima

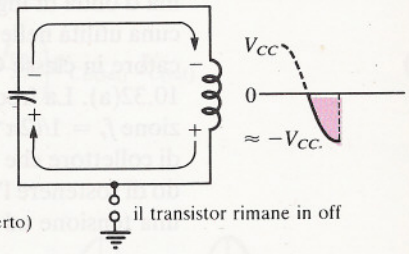
semionda dell'oscillazione. Successivamente, il condensatore si scarica di nuovo, facendo crescere rapidamente il campo magnetico dell'induttore. Questo riporta altrettanto velocemente il condensatore a un livello di carica che è caratterizzato da una tensione avente un picco positivo inferiore a quello della precedente fase di carica in conseguenza della perdita di energia che si verifica nella resistenza dell'avvolgimento dell'induttore. Con ciò si completa la seconda semionda, come illustrano le figure 10.33(d) ed (e). La tensione di uscita picco-picco è quindi all'incirca uguale a  $2 V_{CC}$ .



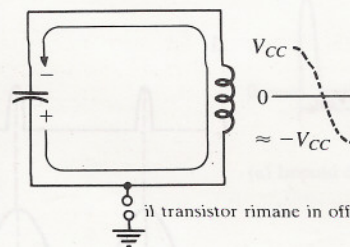
(a) Quando il transistor conduce,  $C$  si carica fino a  $+V_{CC}$  in corrispondenza del picco dell'ingresso



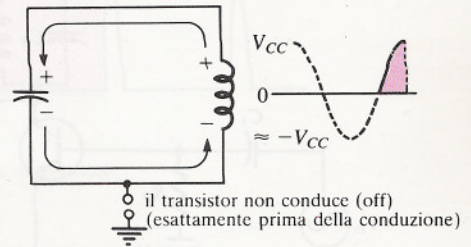
(b)  $C$  si scarica fino a  $0\text{ V}$



(c)  $L$  ricarica  $C$  con polarità opposta



(d)  $C$  si scarica fino a  $0\text{ V}$



(e)  $L$  ricarica  $C$

**Figura 10.33** Funzionamento del circuito risonante.

Come mostra la figura 10.34(a), l'ampiezza dell'oscillazione di ogni periodo successivo risulterà inferiore a quella del periodo precedente a causa della perdita di energia che si ha nella resistenza del circuito risonante; pertanto, l'oscillazione tende a smorzarsi. Tuttavia, il regolare ripetersi degli impulsi della corrente di collettore fornisce energia al circuito risonante ed è quindi in grado di mantenere le oscillazioni ad una ampiezza costante. Se, infatti, il circuito risonante viene accordato sulla frequenza del segnale di ingresso, la somministrazione di energia avviene in corrispondenza di ogni periodo della tensione  $V_r$ , cioè della tensione ai capi del circuito risonante, permettendo così di mantenere costante l'ampiezza delle oscillazioni, come mostra la figura 10.34(b).