

GENERATORI DI CORRENTE.....	2
<i>Premesse Teoriche</i>	2
<i>Generatore di corrente a BJT</i>	2
<i>Metodi di variazione della corrente generata</i>	3
<i>a) Variazione di R_e</i>	3
<i>b) Variazione della sorgente di riferimento</i>	4
<i>Altre configurazioni circuitali</i>	4
<i>Modalità di funzionamento "sink" e "source"</i>	4
<i>Impiego dei generatori di corrente nei circuiti integrati</i>	5
<i>Generatori di corrente realizzati con Amplificatori Operazionali</i>	5
SPECCHIO DI CORRENTE (CURRENT MIRROR)	6
CARICA DI UN CONDENSATORE A CORRENTE COSTANTE.....	7

Generatori di Corrente

prof. Cleto Azzani
 IPSIA Moretto Brescia
 Gennaio 1996

Generatori di Corrente

Premesse Teoriche

I generatori di corrente a differenza dei generatori di tensione non sono facilmente realizzabili. È necessario ricorrere a circuiti elettronici per realizzare tale funzione. Converrà ricordare che un generatore di corrente deve imporre al suo carico R_c la circolazione di una intensità di corrente costante senza tenere conto del valore ohmico che il carico assume (vedi fig. 1). Un generatore ideale di corrente è caratterizzato da una resistenza interna infinita.

Un generatore reale (vedi fig. 2) è caratterizzato da una resistenza interna di valore finito; perciò la corrente erogata non risulta costante ma è data dalla espressione:

$$I = I_0 - \frac{V}{R_i} \quad 1.1$$

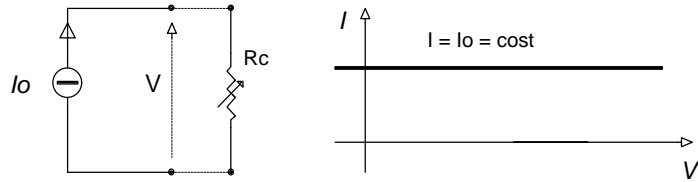


fig. 1 Generatore ideale di corrente e relativa caratteristica

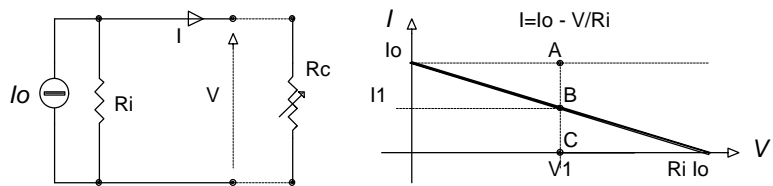


fig.2 Generatore reale di corrente e relativa caratteristica

rappresentata nel grafico di fig. 2.

In esso si può notare che se ipotizziamo che V_1 sia la tensione presente ai capi del carico, I_1 sarà la corrente che circola nel carico. Sul grafico di fig. 2 il segmento BC rappresenta la corrente I_1 fornita al carico, il segmento AB rappresenta la corrente che percorre R_i . È evidente che quanto più grande risulta R_i rispetto ad R_c tanto maggiore sarà la corrente che percorre il carico R_c (segmento BC) rispetto a quella che percorre R_i (segmento AB)

Nel circuito di fig. 3 è presentato un generatore di tensione che eroga corrente approssimativamente costante al suo carico; infatti l'espressione della corrente è data da:

$$I = \frac{E}{R_i + R_c} \cong \frac{E}{R_i} \quad 1.2$$

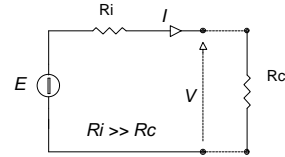


fig. 3 Generatore di tensione che eroga corrente costante

L'intensità di corrente I risulta in prima approssimazione indipendente dal carico R_c in quanto si è posto $R_i \gg R_c$.

Il circuito di fig. 3 è di scarsa praticità in quanto:

1. consente al carico R_c solo variazioni limitate
2. poichè la maggior caduta di tensione si localizza ai capi di R_i è necessario utilizzare generatori con tensione molto elevata rispetto a quella che cade normalmente sul carico.

Generatore di corrente a BJT

Un transistor bipolare BJT inserito nel circuito di fig. 4 si comporta da generatore di corrente a condizione che siano verificate le due condizioni:

- 1)- il BJT deve funzionare in zona attiva o lineare,
- 2)- il BJT deve essere dotato di guadagno statico h_{FE} elevato (h_{FE} almeno pari a 100)

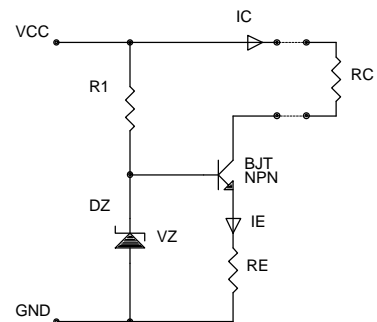


fig. 4 Generatore di corrente a BJT (modalità SINK)

Scrivendo il secondo principio di Kirchoff alla maglia di ingresso si ha:

$$V_Z = V_{BE} + R_E(I_C + I_B) \quad 1.3$$

ma per la seconda ipotesi risulta:

$$I_C = h_{FE} I_B \gg I_B \quad 1.4$$

quindi la 1.3 diventa :

$$V_Z = V_{BE} + R_E(I_C + I_B) \cong V_{BE} + R_E I_C \quad 1.5$$

a cui si ha :

$$I_C = \frac{V_Z - V_{BE}}{R_E} \quad 1.6$$

E' evidente che fintantochè le grandezze presenti nella 1.6 rimangono costanti, la corrente I_C risulta costante (ossia non dipende dal valore del carico R_C). Il carico R_C tuttavia non può variare arbitrariamente ma le sue variazioni dovranno essere contenute in modo da soddisfare la condizione di funzionamento del BJT in zona lineare: infatti se R_C aumenta abbiamo visto che I_C si mantiene costante e quindi la VCE del BJT diminuisce:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_E I_C - R_C I_C \quad 1.7$$

La condizione di funzionamento in zona lineare si traduce nella condizione :

$$V_{CE} = V_{CC} - R_E I_C - R_C I_C \geq V_{BE} \quad 1.8$$

$$R_C \leq \frac{V_{CC} - V_{BE} - R_E I_C}{I_C} \quad 1.9$$

Sostituendo nella 1.8 la I_C data dalla relazione 1.6 si ha :

$$R_C \leq R_E \frac{V_{CC} - V_Z}{V_Z - V_{BE}} = R_{C_{MAX}} \quad 1.10$$

Il valore della Resistenza di carico del generatore di corrente perciò deve essere compresa fra 0 (carico in corto circuito) ed il valore massimo dato dalla 1.10 per assicurare il funzionamento in zona attiva del BJT.

Metodi di variazione della corrente generata

a) Variazione di R_E

Nel circuito di fig. 5 è rappresentato un generatore di corrente che ha come sorgente di riferimento quella fornita dai due diodi D1 e D2 connessi in serie. In tale circuito la resistenza di emettitore è stata scorporata in due parti R_{E1} variabile ed R_{E2} fissa. La espressione 1.6 applicata al circuito di fig. 5 fornisce il risultato :

$$I_C = \frac{V_D}{R_{E1} + R_{E2}} \quad 1.11$$

L'espressione 1.11 è rappresentata dal grafico di fig. 6. Si noti che il legame di proporzionalità inversa che esiste fra le due grandezze produce *elevate variazioni di I_C a valori bassi di R_{E1} e basse variazioni di I_C a valori elevati di R_{E1} .*

In altri termini la pendenza della curva di regolazione di I_C non risulta costante.

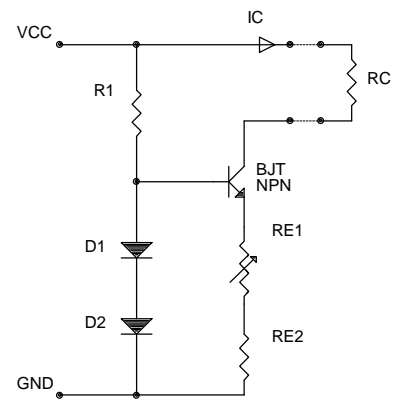


fig. 5 Variazione di I_C con R_{E1}

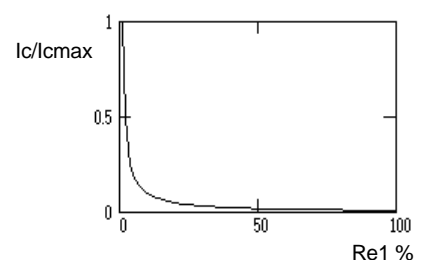


fig. 6 Variazione di I_C al variare di R_{E1}

b) Variazione della sorgente di riferimento

Nel circuito di fig. 7 è rappresentato un generatore di corrente in cui la tensione di riferimento V_{BM} varia da un minimo V_{D2} a V_Z . La espressione 1.6 applicata al circuito di fig. 7 fornisce il risultato:

$$I_C = \frac{V_{BM} - V_{BE}}{R_E} \quad 1.12$$

L'espressione 1.12 è rappresentata dal grafico di fig. 8. Si noti che la proporzionalità diretta che esiste fra le due grandezze produce eguali variazioni di I_C a valori bassi e a valori elevati di $(V_{BM} - V_{D2})$.

Volendo perciò costruire generatori di corrente in cui il valore della corrente possa essere regolato linearmente si sceglierà il metodo di regolazione di fig. 7.

Il circuito di fig. 7 presenta un altro vantaggio: se il diodo $D2$ è dello stesso tipo di semiconduttore con cui è realizzato il BJT ed è a contatto termico con la giunzione BE del transistor il circuito è anche compensato termicamente. E' infatti facile convincersi che nella maglia di ingresso la ddp V_{D2} compensa esattamente la V_{BE} del BJT anche in presenza di variazioni nella temperatura ambiente.

Altre configurazioni circuitali

Nei circuiti presi in esame fino ad ora non si è mai rivelata la necessità di ricorrere a sorgenti di tensione stabilizzata. Infatti in tutti i circuiti esaminati il riferimento in tensione è stato ricavato dalla tensione di alimentazione V_{CC} con una rete stabilizzatrice più o meno raffinata (diodo zener nei circuiti di fig. 4 e fig. 7, diodi normali nel circuito di fig. 5). Nel campo dei circuiti elettronici tuttavia spesso è disponibile una sorgente di tensione stabilizzata per cui è sufficiente ricorrere ad un partitore per ricavare la tensione di riferimento necessaria per il funzionamento del generatore di corrente (vedi fig. 9).

Modalità di funzionamento "sink" e "source"

Nei circuiti presi in esame fino ad ora il carico R_C risulta collegato da un lato al polo positivo della V_{CC} e dall'altro al collettore del BJT facente parte del generatore di corrente; pertanto in questa configurazione il transistor NPN risucchia (sink) la corrente I_C proveniente attraverso il carico R_C dalla sorgente V_{CC} ; il generatore di corrente opera in modalità "sink". In molte configurazioni circuitali il carico per necessità proprie ha uno dei suoi capi connessi a massa per cui si richiede al generatore di corrente di operare in modalità "source". Il circuito pertanto deve essere modificato ad esempio come in fig. 10; in tale circuito, il diodo led agisce da sorgente di riferimento e segnala inoltre visivamente il corretto funzionamento del generatore di corrente. Sarà opportuno osservare che in condizioni di funzionamento normale (ossia se

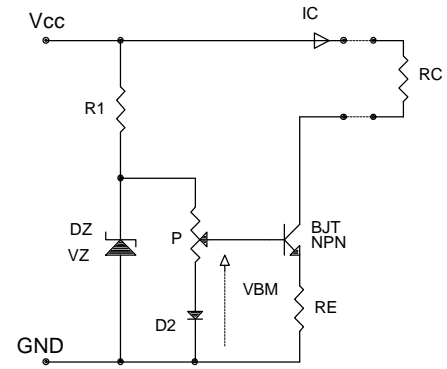


fig. 7 Variazione di I_C con V_{BM}

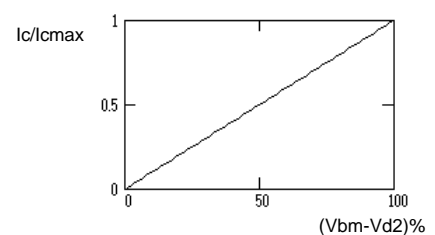


fig. 8 Variazione di I_C al variare di $(V_{BM} - V_{D2})\%$

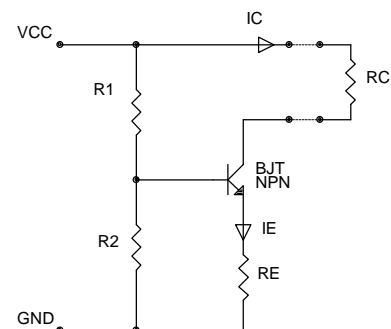


fig. 9 Generatore di corrente alimentato da sorgente V_{CC} stabilizzata

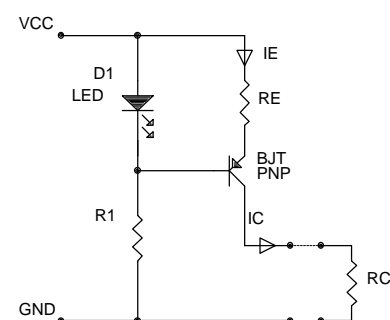


fig. 10 Generatore di corrente operante in modalità SOURCE

risulta soddisfatta puntualmente la relazione 1.9) il BJT lavora in zona attiva quindi risulta :

$$\begin{aligned} I_C &= h_{FE} I_B \gg I_B \\ I_E &= I_C + I_B \cong I_C \end{aligned} \quad 1.13$$

se la 1.9 non risulta più soddisfatta, nella condizione limite di carico di collettore R_c interrotto si ha certamente:

$$I_C = 0 \quad 1.14$$

e quindi

$$I_E = I_B \quad 1.15$$

La relazione 1.15 esprime una condizione di funzionamento alquanto pericolosa per la giunzione BE di un BJT. Infatti se il carico di collettore si interrompe l'intera corrente di emettitore percorre la base con tutte le conseguenze che ciò può comportare (distruzione del BJT soprattutto nel caso di connessioni Darlington). Nel circuito di fig. 10 in caso di interruzione del carico il diodo led viene di fatto ad essere cortocircuitato dal basso valore di R_e perciò il led si spegne.

Impiego dei generatori di corrente nei circuiti integrati

I generatori di corrente sono largamente impiegati nella realizzazione di circuiti integrati lineari quali amplificatori operazionali, convertitori A/D e D/A. Nella progettazione di amplificatori operazionali essi vengono impiegati nella duplice veste di :

- a) carichi attivi di emettitore di stadi amplificatori differenziali
- b) carichi attivi di collettore di stadi amplificatori differenziali

a) Il CMRR (Common Mode Rejection Ratio), parametro che definisce la bontà di un amplificatore differenziale, è direttamente proporzionale al valore della resistenza di emettitore R_e del primo stadio differenziale.

b) L'amplificazione di uno stadio dipende dal valore del carico (generalmente è direttamente proporzionale ad esso).

Sorge quindi la necessità di realizzare valori di resistenza più alti possibile mantenendo nel contempo a livelli accettabili la tensione richiesta dai circuiti alimentatori. Il generatore di corrente è il circuito che permette il conseguimento simultaneo dei due obiettivi :

a) è dotato di resistenza dinamica sufficientemente elevata (un generatore di corrente ideale è dotato di resistenza interna infinita)

b) richiede modeste d.d.p. per funzionare (basta assicurare il funzionamento in zona attiva del BJT ossia deve essere $V_{ce} > V_{be}$ con un adeguato margine di sicurezza)

Generatori di corrente realizzati con Amplificatori Operazionali

In fig. 11 è rappresentata una soluzione circuitale che utilizza due amplificatori operazionali. A1 in connessione differenziale trasferisce sull'ingresso invertente di A2 la c.d.t. presente ai capi di R_1 (percorsa dalla corrente che interessa il carico). Pertanto risulta:

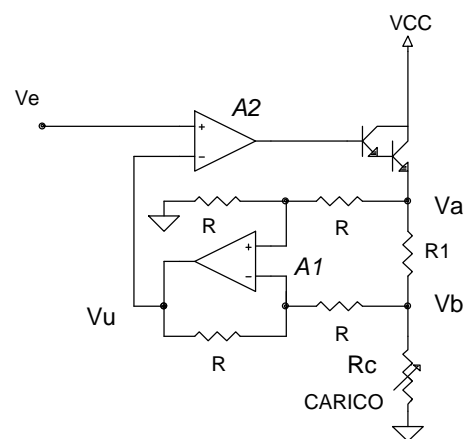


fig. 11 Generatore di corrente regolato da V_e

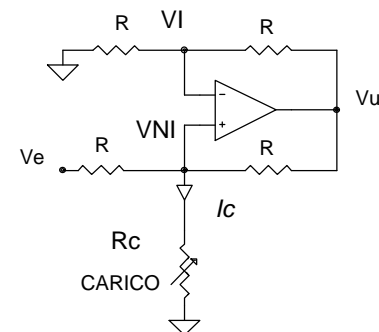


fig.12 Altro generatore di corrente

$$V_u = V_a - V_b = V_{R1} = R_1 I_C \quad 1.16$$

Le condizioni di linearità su A2 impongono che risulti :

$$V_{NI} = V_I \quad 1.17$$

$$V_e = V_u = R_1 I_C$$

da cui risulta :

$$I_C = \frac{V_e}{R_1} \quad 1.18$$

L'intensità di corrente che percorre il carico dipende dal valore della tensione V_e applicata al circuito e dalla resistenza R_1 disposta in serie al carico R_c .

Un'altra soluzione circuitale è quella di fig. 12. Risulta in questo caso che:

$$V_I = \frac{V_u}{2} \quad 1.19$$

Applicando il teorema di Millmann all'ingresso NI (non invertente) si ha :

$$V_{NI} = \frac{\frac{V_e}{R} + \frac{V_u}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_c}} \quad 1.20$$

Le condizioni di funzionamento in zona lineare impongono l'uguaglianza fra la 1.19 e la 1.20 per cui risulta :

$$V_u = \frac{2R_c}{R} V_e \quad 1.21$$

da cui risulta facilmente :

$$I_C = \frac{V_{NI}}{R_c} = \frac{V_I}{R_c} = \frac{V_u}{2R_c} = \frac{V_e}{R} \quad 1.22$$

L'intensità di corrente che percorre il carico dipende dal valore della tensione V_e applicata al circuito e dalla resistenza R presente nella configurazione circuitale di fig.12.

Specchio di Corrente (current mirror)

Nella tecnologia dei circuiti integrati lineari frequentemente ci si imbatte in circuiti denominati "current mirror". Si propone lo studio di tre configurazioni circuitali per rendersi conto delle loro modalità di funzionamento. In fig. 13 è presentata la configurazione base di uno specchio di corrente. In esso sono presenti due BJT TR1 con base e collettore cortocircuitati che si comporta da diodo integrato e TR2. Nella tecnologia dei circuiti integrati non è difficile realizzare transistor con le stesse caratteristiche di guadagno ossia con :

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta \gg 1 \quad 1.23$$

dal circuito si verifica che essendo le due basi ed i due emettitori connessi assieme risulta :

$$V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE} \quad 1.24$$

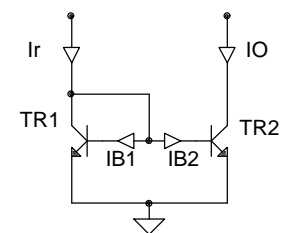


fig. 13 Specchio di corrente

I due BJT TR1 e TR2 con identiche caratteristiche costruttive saranno quindi interessati da valori identici di corrente sia di base che di collettore.

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_0}{\beta} \quad 1.25$$

Ricavando il valore di I_1 risulta :

$$I_r = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_0 + 2I_B = I_0 + 2 \frac{I_0}{\beta} = \frac{\beta + 2}{\beta} I_0 \quad 1.26$$

da cui facilmente si perviene a :

$$I_0 = I_r \frac{\beta}{\beta + 2} \cong I_r \quad 1.27$$

Nel circuito di fig. 14 TR1 e TR3 costituiscono un primo specchio di corrente per il quale può essere riscritta la relazione 1.27 :

$$I_{C1} = \frac{\beta I_{E2}}{\beta + 2} \quad 1.28$$

calcolo l'espressione di I_o (collettore di TR2) :

$$I_0 = I_{E2} - I_{B2} = I_{E2} - \frac{I_0}{\beta} \quad 1.29$$

dalla 1.29 ricavo I_{E2} :

$$I_{E2} = \frac{\beta + 1}{\beta} I_0 \quad 1.30$$

calcolo ora I_r tenendo conto della 1.28 e della 1.29 :

$$I_r = I_{C1} + I_{B2} = I_{C1} + \frac{I_0}{\beta} = \frac{\beta + 1}{\beta} I_0 + \frac{I_0}{\beta} = I_0 \frac{\beta(\beta + 1) + \beta + 2}{\beta(\beta + 2)} \quad 1.31$$

da cui risulta :

$$I_0 = I_r \frac{\beta^2 + 2}{\beta^2 + 2\beta + 2} \cong I_0 \quad 1.32$$

La formula 1.32 ci esprime l'uguaglianza fra I_r ed I_o nel circuito di fig. 14.

Nel circuito di fig. 15 l'intensità di corrente I_{E3} è data dall'espressione :

$$I_{E3} = I_{B1} + I_{B2} = 2 \frac{I_0}{\beta} \quad 1.33$$

$$I_{B3} = \frac{I_{E3}}{\beta + 1} = \frac{2I_0}{\beta(\beta + 1)} \quad 1.34$$

calcolo ora I_r :

$$I_r = I_{B3} + I_{C1} = I_{B3} + I_0 = \frac{2 + \beta(\beta + 1)}{\beta(\beta + 1)} I_0 \quad 1.35$$

da cui risulta:

$$I_0 = \frac{\beta(\beta + 1)}{\beta(\beta + 1) + 2} I_r = \frac{\beta^2 + \beta}{\beta^2 + \beta + 2} I_r \cong I_r \quad 1.36$$

Carica di un Condensatore a Corrente costante

Nel circuito di fig. 16 il condensatore C viene caricato a corrente costante (interruttore S aperto) il valore della corrente è dato dall'espressione 1.6. Si può concretamente scrivere :

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} = I_0 \quad 1.37$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{I_0}{C} = cost. \quad 1.38$$

da cui è immediato concludere:

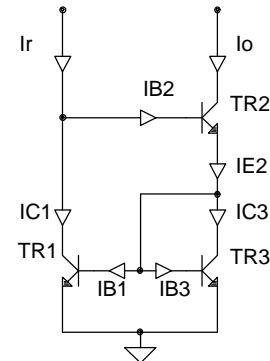


fig. 14 Altro specchio di corrente

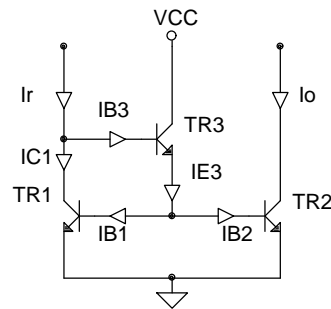


fig. 15 Altro specchio di corrente

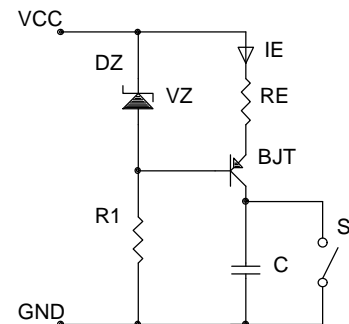


fig. 16 Carica di C a I_o costante

$$v_c(t) = \frac{I_0}{C}t + V_0 \quad 1.39$$

Infatti la 1.38 assicura che la tangente alla curva $V_c(t)$ ha inclinazione costante e quindi non può che essere una retta come indicato dalla 1.39.

Supponendo che all'istante $t=0$ il condensatore C sia scarico risulta $V_0=0$ per cui si potrà scrivere:

$$v_c(t) = \frac{I_0}{C}t \quad 1.40$$

La relazione 1.40 rappresenta graficamente una retta passante per l'origine del sistema di assi cartesiani. Il coefficiente angolare m è dato dalla relazione :

$$m = \frac{I_0}{C} \quad 1.41$$

con valori elevati di I_0 e valori bassi di C si avrà una carica rapida; con valori bassi di I_0 e valori elevati di C si avrà una carica lenta (vedi fig. 17).

Nel circuito di fig. 16 con il passare del tempo cresce la tensione V_c ai capi del condensatore; contemporaneamente si riduce la V_{ec} ai capi del BJT; ciò può provocare il passaggio dal funzionamento in zona lineare a funzionamento in zona di saturazione infatti scrivendo il secondo principio di Kirchoff alla maglia che contiene R_e , il BJT, il condensatore C di fig. 16 si ha:

$$V_{EC} = V_{CC} - R_E I_E - v_C \cong V_{CC} - R_E I_C - v_C \quad 1.42$$

al crescere di v_c , si riduce la tensione V_{ec} . Perché il funzionamento si mantenga in zona lineare deve essere soddisfatta la relazione seguente:

$$V_{EC} > V_{EB} \quad 1.43$$

per cui si dovrà avere :

$$v_C < V_{CC} - R_E I_C - V_{EB} \quad 1.44$$

Il secondo membro della 1.44 esprime il valore massimo teorico della tensione ai capi di C superato il quale il transistor satura, la V_c in tal caso non cresce più. Per riprendere il ciclo da capo nel circuito dovrà essere presente un interruttore elettronico (schematizzato dal contatto S in fig. 16) che chiudendosi ad un determinato istante, scarica C , riporta il transistor a funzionare in zona lineare consentendo quindi altri cicli di carica lineare. La forma d'onda generata dal circuito viene denominata a "dente di sega" (vedi fig. 18).

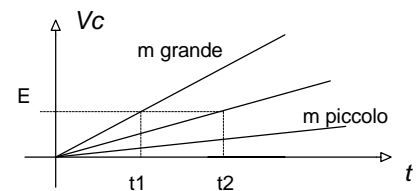


fig. 17 Legge di carica del condensatore

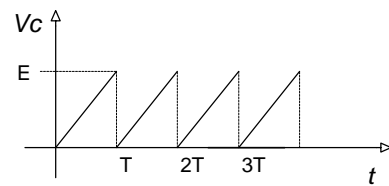


fig. 18 Generazione onda a dente di sega