



Giovanni Schgör (g.schgor)

IMPARIAMO IL BJT

31 October 2005

Simulazioni con calcolatore per la didattica del transistor

- Le versioni esecutive dei programmi descritti ed il dettaglio degli algoritmi utilizzati, sono gratuitamente a disposizione dei Docenti su richiesta via e-mail a: g.schgor@polaris-net.it
oppure direttamente scaricabili da: <http://www.schgor.com/cirbase/CBINDX.htm>

Sommario

Vengono presentati alcuni programmi di simulazione per lo studio mediante calcolatore del comportamento del transistor BJT, in configurazione ad emettitore comune.

Scopo principale di tali programmi è quello di offrire ai Docenti di elettronica strumenti didattici di più immediata comprensione da parte degli allievi, attraverso appunto una serie di 'esperimenti virtuali' svolti al calcolatore.

I singoli programmi illustrano nell'ordine:

- significato delle curve caratteristiche del transistor
- l'amplificazione di un segnale
- il circuito monostabile (temporizzatore)
- il circuito astabile (oscillatore)
- il circuito bistabile (T-flip-flop)

I programmi si inquadrano in una proposta di collaborazione per nuove forme didattiche basate sull'uso del calcolatore che l'Autore ha presentato a Didamatica 2004 (vedi 'Esperienze di programmi didattici in Rete')

Il modello matematico del transistor

Quasi tutti i libri di testo che trattano i transistor riportano i classici modelli a quadripolo, che però hanno scarsa utilità pratica sia perché non sono quasi mai noti i valori dei parametri delle rispettive equazioni, sia per la variabilità di questi parametri nelle varie condizioni di funzionamento.

Avendo a disposizione un calcolatore, si può pensare di utilizzarlo per ricavare un modello sperimentale 'pratico', che permetta di prevedere con discreta approssimazione il comportamento del transistor in tutte le possibili condizioni di funzionamento.

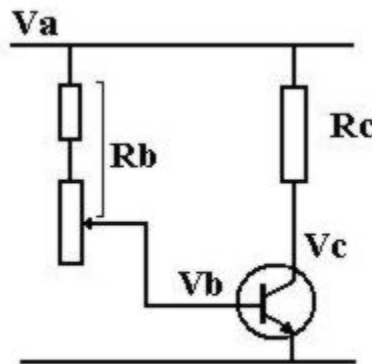
Il modello proposto è basato sui rilievi sperimentali che possono essere preventivamente eseguiti su un dato elemento, quindi non sarebbe neppure richiesta la disponibilità dei rispettivi 'data sheets' (salvo la conoscenza dei valori massimi, quindi dei limiti di utilizzazione del transistor stesso).

Dato il carattere didattico, quindi con l'esigenza di mantenere semplice il modello, si adottano alcune assunzioni che però non influiscono significativamente sull'aderenza del modello alla realtà.

Caratteristica Base-Emettitore

La prima di queste assunzioni è la costanza della caratteristica base-emettitore (non dipendente, come a rigore sarebbe, dalla tensione di collettore).

Tale caratteristica è costituita da un tratto lineare raccordato a parabola con l'asse delle ascisse (vedi fig.1.1).



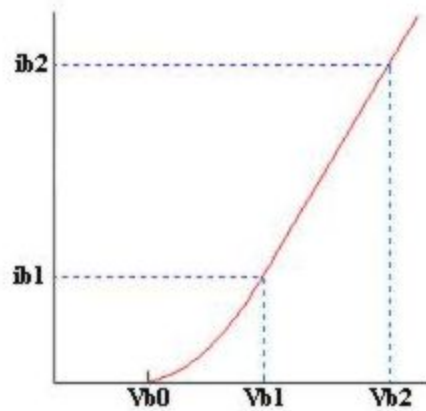


Fig.1.1 Determinazione della caratteristica Base-Emettitore.

Il primo rilievo sperimentale consiste quindi nel definire il comportamento medio del 'diodo' rappresentato dalla giunzione Base-Emettitore (medio rispetto a variazioni di tensione e corrente di collettore: si suggerisce ad esempio di utilizzare per i rilievi in proposito, una resistenza di collettore doppia rispetto al valore ricavabile dalla massima potenza di dissipazione ammessa dal transistor) .

Una semplice interpretazione grafica dei risultati sperimentali dovrebbe permettere l'individuazione dei 2 punti significativi del nostro modello (ib_1, V_{b1} , come inizio del tratto lineare e ib_2, V_{b2} come massimo, anche se per stabilire con maggior precisione tali punti ovviamente sarebbe più opportuna un'analisi di regressione lineare).

I 2 punti permettono di ricavare sia i coefficienti della retta passante fra questi, sia i coefficienti della parabola che deve avere pendenza uguale a quella della retta nel punto 1 e minimo sull'asse delle ascisse (buon esempio di geometria analitica applicata).

Il valore del minimo (V_{b0} , cioè la tensione sotto la quale la corrente di base è uguale a zero) è la quarta delle incognite che si ricavano dall'equazione della parabola rispettivamente nei punti 0 e 1, e dalle equazioni esprimenti i vincoli di pendenza (derivate prime) negli stessi punti.

La caratteristica così determinata permette quindi di ottenere il valore della corrente di base (ib) data la tensione di base (V_b): è ciò che normalmente viene definito 'punto di lavoro della base'.

Ovviamente sarà :

$$ib = alin \cdot V_b + blin \quad \text{nel tratto lineare da } V_{b1} \text{ a } V_{b2} \text{ (con rispettivamente } alin = \text{pendenza e } blin = \text{intercetta) e}$$

$$i_b = a_{par} \cdot V_b^2 + c_{par} \cdot V_b + d_{par} \quad \text{nel tratto parabolico da } V_{b0} \text{ a } V_{b1}.$$

Per maggior comodità è opportuno disporre anche di una subroutine che legghi i_b direttamente ai valori di tensione di alimentazione (V_a) e alla resistenza di base (R_b)

1-2 Collettore-Emettitore

Un po' più complicata è la relazione per determinare il 'punto di lavoro del collettore'.

In effetti vi è una famiglia di curve, ciascuna tracciata ad i_b costante, che lega la corrente di collettore i_c alla tensione di collettore V_c .

Com'è risaputo, il punto di lavoro del collettore è poi determinato in base all'intersezione della particolare curva corrispondente all'effettivo valore di i_b , con la 'retta di carico', cioè con la retta della i_c in funzione della tensione di alimentazione V_a , e della resistenza di collettore R_c .

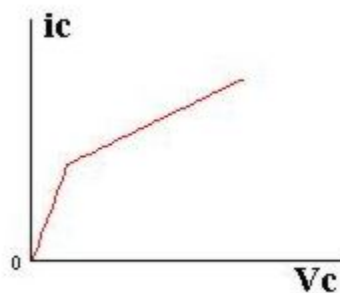
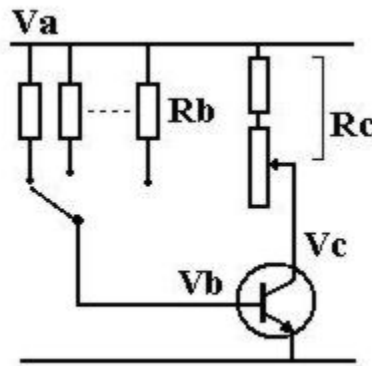


Fig.1.2 Determinazione delle caratteristiche di Collettore-Emettitore (funzione di i_b).

La seconda assunzione, ai fini della semplificazione del modello (che però come si è già detto non incide significativamente sui risultati pratici), è quella di assimilare le curve caratteristiche a semirette con doppia pendenza: un primo tratto in condizione di saturazione (con pendenza praticamente indipendente da i_b , quindi costante) ed un secondo tratto con pendenza ed intercetta variabili in funzione di i_b .

I rilievi sperimentali per ottenere pendenza e intercetta per ciascuna condizione di i_b sono elementari (vedi fig.1.2), ma per la determinazione dei valori desiderati (pendenza ed intercetta) si suggerisce il ricorso alla regressione lineare dei valori sperimentali, ad esempio utilizzando le corrispondenti funzioni EXCEL.

Questo va ripetuto per un certo numero di valori di i_b (almeno 5, nel campo da 1/10 al valore massimo), in modo da ottenere una serie di valori di pendenza ed intercetta in funzione appunto di i_b .

Poiché lo scopo è quello di ricavare un modello valido per qualsiasi condizione di lavoro, è chiaro che dovremo ricavare le relazioni di variazione di pendenza ed intercetta per qualsiasi valore di i_b .

Anche qui dovremo quindi usare una regressione. Purtroppo queste relazioni non sono lineari e per un'approssimazione sufficiente occorrerebbe almeno una regressione quadratica, richiedendo un ambiente matematico più potente di EXCEL (qui è stato utilizzato il MathCad).

Supponiamo comunque di aver ottenuto le relazioni cercate: a questo punto abbiamo una famiglia di semirette che si innestano sulla semiretta di saturazione ed è facile determinarne per ciascuna il punto di discontinuità (ginocchio) ovviamente in funzione di i_b .

Il punto di lavoro cercato è l'intersezione della retta di carico con la semiretta caratteristica di i_b (se sopra il ginocchio) oppure fra la retta di carico e la semiretta di saturazione in caso contrario.

Il problema è così matematicamente risolto ed il metodo può essere convertito in un programma che permette di ricavare la corrente di collettore i_c come funzione di i_b , V_a ed R_c .

2. Programma sul funzionamento del transistor

Per mettere subito alla prova il nostro modello, inseriamo il transistor in un circuito come in fig.2.

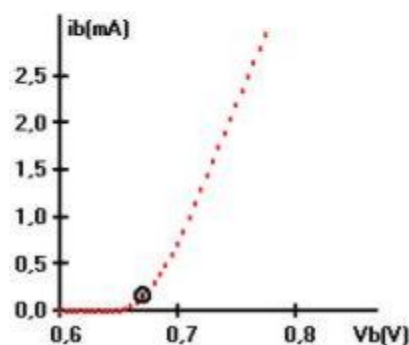
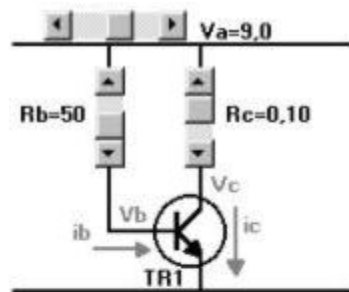
Il programma di simulazione è scritto in Visual Basic e consente, oltre alla grafica, di utilizzare 'oggetti' come i cursori per la variazione dei parametri.

E' quindi semplice, mediante il mouse, variare i valori della tensione di alimentazione (V_a) o delle resistenze rispettivamente di base (R_b) o di collettore (R_c).

Al termine di ogni variazione, il programma richiama le subroutines di calcolo sopra citate per aggiornare i risultati dei punti di lavoro (i punti cerchiati nella figura).

Per una maggior comprensione, il programma disegna per punti anche le 'curve' da cui vengono ricavati quelli di lavoro, con il richiamo delle subroutines di calcolo per una regolare serie di valori di ascissa, cioè utilizzando istruzioni di loop (For-Next).

Particolarmente interessante ai fini didattici, è la visualizzazione della caratteristica i_c - V_c (a i_b costante) intersecata dalla retta di carico: muovendo i rispettivi cursori si può seguire la variazione delle 'curve' cogliendone immediatamente le correlazioni (le velocità degli attuali calcolatori consentono l'aggiornamento della figura in tempo reale).



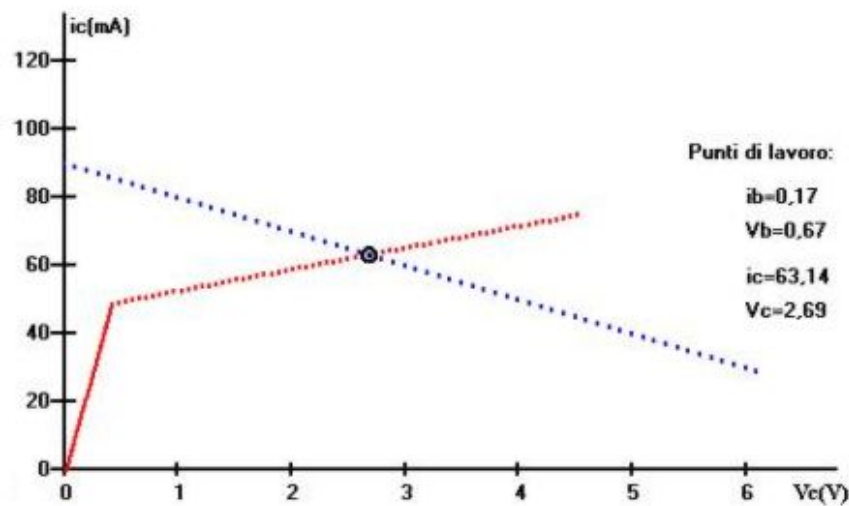


Fig.2 Programma per la determinazione dei punti di lavoro del transistor, dati V_a (in Volt), R_b ed R_c (in kOhm).

3. Il transistor come amplificatore di segnale.

Inserendo nel circuito di base un generatore di segnale sinusoidale (ovviamente virtuale), possiamo utilizzare il richiamo delle subroutines di calcolo con un loop nel tempo (ad esempio esteso all'intero periodo di oscillazione del segnale stesso) per ricavare l'andamento del segnale in uscita, cioè la variazione di V_c in funzione del segnale d'ingresso (V_s) e della polarizzazione della base.

La fig.3 mostra un possibile programma che mette in evidenza l'amplificazione, ma anche la deformazione del segnale d'uscita rispetto alla sinusoide d'ingresso se non si predispongono opportunamente polarizzazione e massima ampiezza del segnale d'ingresso.

Nel caso particolare della configurazione simulata, si vede che se il livello di polarizzazione è troppo piccolo, si ha una netta deformazione della parte negativa del segnale uscente (V_{c2}), ma che questo si verifica anche con polarizzazioni elevate se il segnale d'ingresso (V_s) è troppo grande.

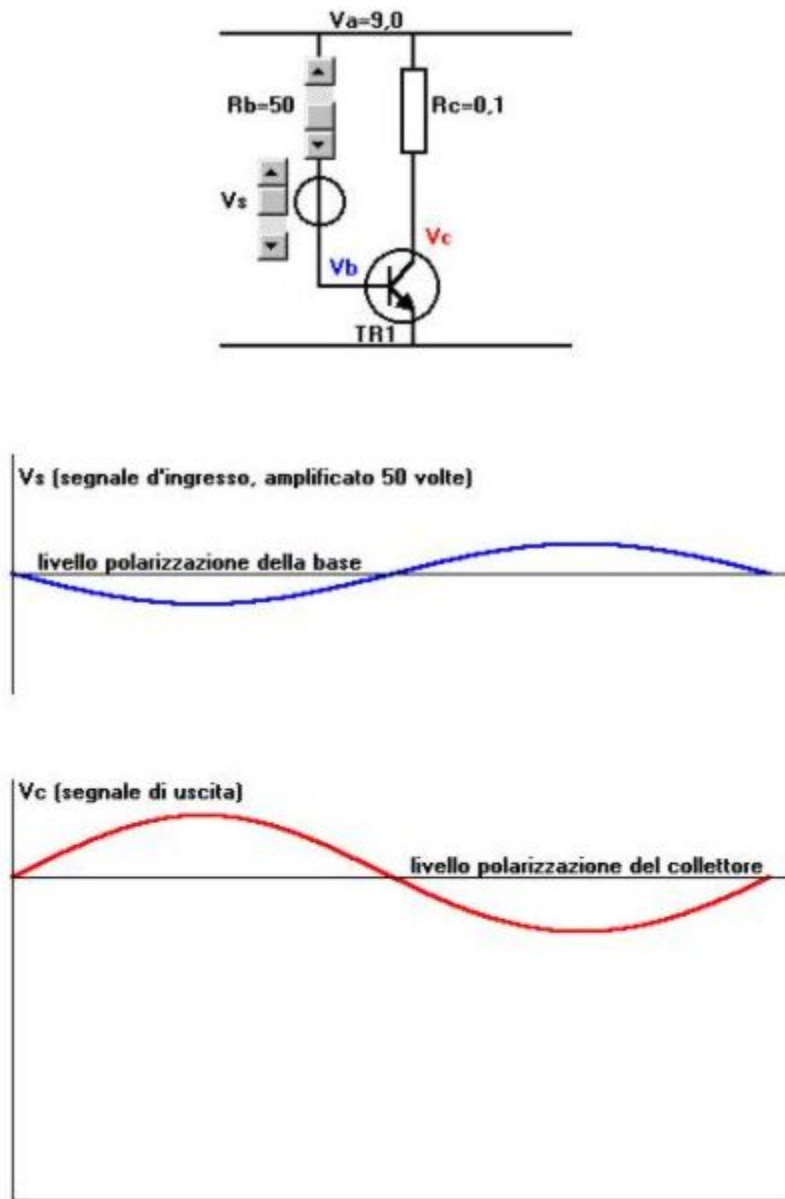


Fig.3 Simulazione del transistor come amplificatore di segnale.

Ovviamente questo dovrebbe costituire lo spunto per mostrare l'utilità di configurazioni più complesse, quali ad esempio la reazione negativa di emettitore.

Ma più che entrare nei particolari, interessa qui mettere in evidenza l'utilità pratica di disporre di semplici subroutines di calcolo che permettono di risolvere dinamicamente il problema del comportamento del transistor nelle varie possibili configurazioni circuitali.

4. Il circuito monostabile

La simulazione può essere applicata anche a configurazioni in cui il transistor funziona a tutto-o-niente, cioè o in stato di interdizione ('aperto') o in saturazione ('chiuso'), anzi in questi casi è ancora più semplice studiarne il comportamento, determinando prima i valori nelle condizioni stabili e raccordandoli poi con le equazioni dinamiche (esponenziali, funzioni delle costanti di tempo).

Un primo caso che può essere preso in considerazione è quello del circuito monostabile, in cui la momentanea chiusura di un pulsante (P) provoca la 'chiusura' del transistor d'uscita (TR2) per un tempo prefissabile. E' questo il tipico caso del temporizzatore utilizzato negli automatismi industriali.

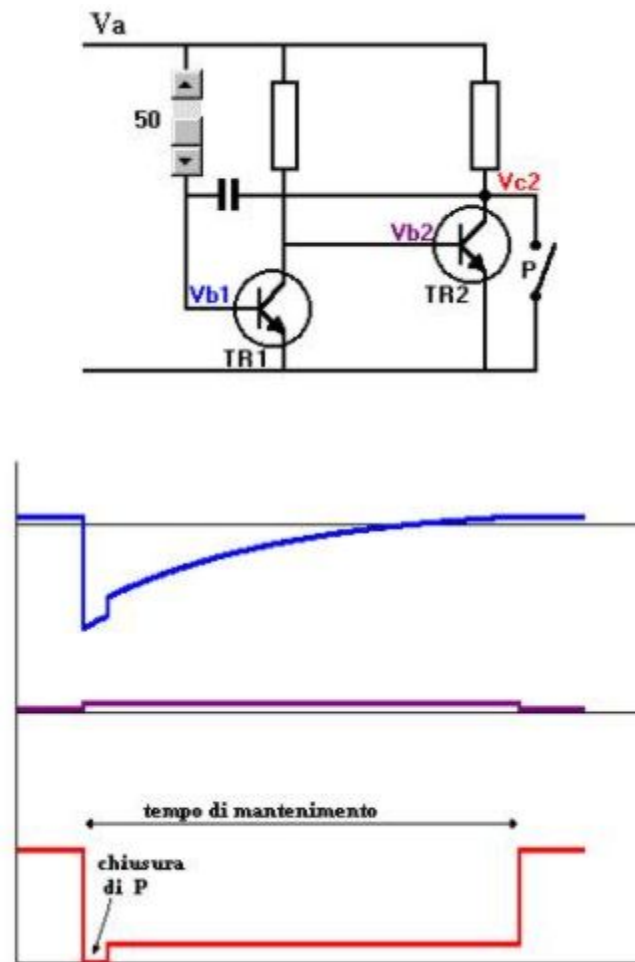


Fig.4 Simulazione di un circuito monostabile (temporizzatore).

All'atto dell'alimentazione, il condensatore si carica praticamente al valore di alimentazione attraverso la resistenza di collettore di TR2, forzando in conduzione TR1.

Con TR1 'chiuso', la base di TR2 è mantenuta sotto la soglia di conduzione, quindi TR2 è 'aperto'.

Se a questo punto si chiude P, la tensione del condensatore diventa una polarizzazione negativa sulla base di TR1 (vedi grafico di Vb1, azzurro), che si interdice, cioè si 'apre'.

A questo punto la resistenza di collettore di TR1 diventa la resistenza di base di TR2, che passa in conduzione, e vi rimane (anche quando si rilascia P) , finché il condensatore non si è scaricato.

I grafici riportano l'andamento dei valori di tensione calcolati dal programma di simulazione rispettivamente sulle basi (Vb1, azzurro e Vb2, magenta) e sul collettore d'uscita (Vc2, rosso).

Interessanti esercitazioni potrebbero essere la determinazione pratica dei valori da assegnare alle resistenze di collettore (rispettivamente Rc1 che diventa resistenza di base Rb2 quando TR2 conduce, ed Rc2 che determina il segnale d'uscita) o la ricerca della relazione fra valore del condensatore e tempi di mantenimento (regolabili poi fra un massimo ed un minimo con il cursore).

5. Il circuito astabile

Di grande importanza è anche il circuito che commuta automaticamente di stato in tempi prefissabili, il classico 'oscillatore'.

L'accoppiamento incrociato, mediante condensatori, fra le rispettive resistenze di collettore e di base, provoca un comportamento simile a quanto visto precedentemente: quando un condensatore si è scaricato, si verificano le condizioni per la conduzione del transistor che era interdetto e questo provoca a sua volta l'interdizione dell'altro transistor che era in conduzione.

Questo 'scambio' si ripete all'infinito, generando forme d'onda quadre, con tempi di 'impulso' e 'pausa' regolabili mediante i potenziometri posti nei rispettivi circuiti di base (variabili da 5 a 50 kOhm)

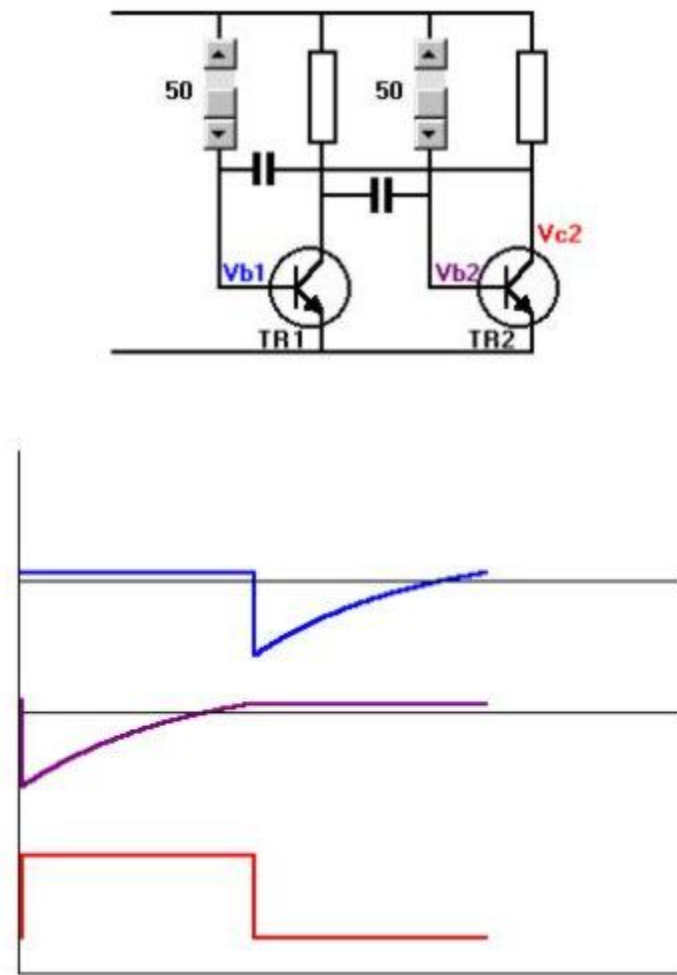


Fig.5 Simulazione di un circuito astabile (oscillatore).

La simulazione, effettuata col solito modello, consente di verificare questo comportamento permettendo di variare a piacere sia la frequenza, sia il rapporto impulso/pausa della forma d'onda in uscita (Vc2).

Anche in questo caso naturalmente, la simulazione può permettere la progettazione circuitale, cioè la determinazione dei valori più opportuni delle resistenze e dei condensatori da utilizzare (indicati in figura appunto senza i rispettivi valori.).

6. Il circuito bistabile

Altri fondamentali circuiti delle tecniche digitali sono i circuiti che possono assumere (e mantenere stabilmente) uno o l'altro dei 2 possibili stati, comunemente noti come 'flip-flop'.

Tra le diverse possibili versioni, viene qui considerata quella in cui il cambiamento di stato viene provocato dal fronte d'onda di un impulso.

Poiché, come è evidente, il circuito riassume la situazione di partenza ogni 2 impulsi, questo è la base di qualsiasi dispositivo di conteggio.

E' anche comunemente definito come T-flip-flop o 'divisore di frequenza'.

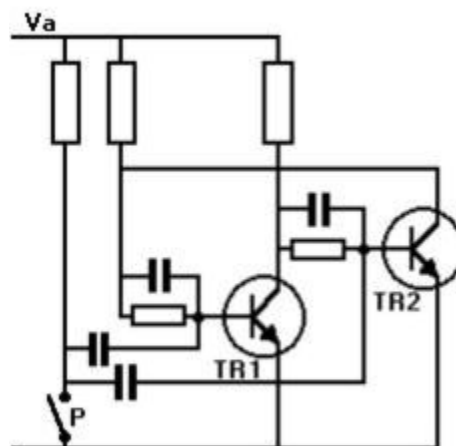
Il circuito tipico, riportato in fig.6, è pilotato da un pulsante P (che può essere sostituito da un transistor, come ad esempio lo stadio finale dell'oscillatore precedente), che viene chiuso momentaneamente: ad ogni chiusura corrisponde il cambiamento di stato dell'uscita (rappresentato dalla tensione di collettore di TR2, cioè V_{c2}).

All'applicazione dell'alimentazione, una piccola dissimmetria circuitale porta uno dei 2 transistor in conduzione (supponiamo TR2), mentre l'altro (TR1) è interdetto.

Questo provoca la carica del condensatore nel circuito di base di TR2, mentre quello del circuito di base di TR1 rimane scarico.

Poiché con pulsante P aperto i 2 condensatori a lui collegati si caricano, la sua chiusura provoca un'interdizione forzata di entrambi i transistor. Per il fatto però che solo uno dei condensatori delle basi è scarico, l'effetto di apertura dei transistor provoca la carica di questo, con conseguente forzatura in conduzione del transistor relativo.

In pratica, ad ogni chiusura impulsiva di P si ha uno scambio di stato fra i 2 transistor (non viene simulato l'effetto della carica dei condensatori).



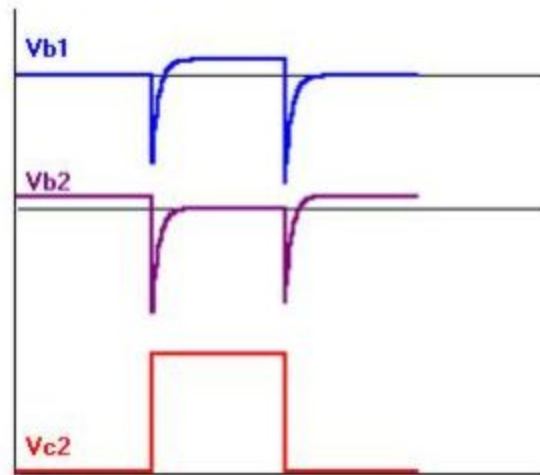


Fig.6 Simulazione di un circuito bistabile (T-flip-flop).

Conclusioni

Con questa breve panoramica di circuiti fondamentali, si è voluta dimostrare la possibilità di applicazione del modello matematico del transistor alla simulazione circuitale mediante calcolatore.

Dovrebbe comunque essere ovvio che la possibilità di simulazione con calcolatore va ben oltre il caso particolare dei transistor (oggi tecnologicamente sempre più superati da configurazioni integrate). Anzi, proprio l'attuale complicazione dei componenti spinge ad indagini non più basate sulla pura intuizione e su procedimenti sperimentali classici.

L'utilizzo del calcolatore in questo campo richiede tuttavia un 'approccio ai problemi' che attualmente non è sufficientemente diffuso nelle scuole italiane.

La 'digitalizzazione' delle soluzioni richiede di saper convertire un progetto in una procedura logico-matematica qual è un programma per calcolatore (e questo è tutt'altra cosa che saper utilizzare Word o PowerPoint o 'navigare' in Internet).

Mi auguro che la modellizzazione del transistor qui presentata serva almeno ai Docenti come stimolo per un approfondimento in questo campo.

Le versioni esecutive dei programmi descritti ed il dettaglio degli algoritmi utilizzati, sono comunque gratuitamente a disposizione dei Docenti su semplice richiesta via e-mail a: g.schgor@polaris-net.it