

CAPITOLO 3

CIRCUITI DI TEMPORIZZAZIONE

Con il termine *circuiti di temporizzazione* si intende una categoria di circuiti in grado di produrre segnali di tipo *impulsivo* e a *onda quadra* o *rettangolare*. Questi circuiti fanno parte a loro volta di un'ulteriore classe di circuiti, detti *multivibratori*.

Tutti questi segnali trovano larga applicazione in Elettronica. I segnali impulsivi sono impiegati per il *comando* (*trigger*) o la *sincronizzazione* di altri circuiti. L'onda quadra o rettangolare costituisce il segnale di *clock* nei circuiti digitali e viene usata come segnale di *controllo* (*gating*) per attivare e disattivare altri circuiti.

L'inventiva dei progettisti ha proposto una gran varietà di soluzioni circuitali basate sui più diversi dispositivi elettronici: transistori, amplificatori operazionali, porte logiche, integrati dedicati, ecc. Nella maggior parte dei casi il funzionamento di questi dispositivi elettronici prevede il loro brusco passaggio (*commutazione*) fra due stati o condizioni di funzionamento. In generale, tramite questi stessi circuiti è possibile ottenere generatori di forme d'onda, di tipo a rampa, a dente di sega, triangolare, a gradinata (che non sono tuttavia oggetto di questo corso).

Per ottenere le temporizzazioni desiderate vengono solitamente sfruttate le costanti di tempo relative a componenti passivi ad accumulo di energia (condensatori).

3.1 Multivibratori

I *multivibratori* sono circuiti adatti a fornire in uscita onde quadre o rettangolari. Si distinguono in astabili, monostabili e bistabili.

Il *multivibratore astabile* (detto anche *oscillatore a rilassamento*) è caratterizzato da due stati (un'uscita a livello alto e un'uscita a livello basso) fra i quali oscilla automaticamente senza bisogno di comandi esterni. Il periodo dell'oscillazione è determinato dalle costanti di tempo del circuito. In definitiva, l'astabile è un vero e proprio generatore di onde quadre o rettangolari. Spesso l'astabile può essere provvisto di un ingresso di sincronismo, che serve semplicemente a stabilire l'istante di partenza del treno d'onde.

Il *multivibratore monostabile* (indicato in inglese anche con il termine *one-shot*) presenta uno stato stabile, in cui può rimanere indefinitamente, ed uno *quasi-stabile*. Mediante un segnale di comando esterno (segnale di *trigger*) è possibile far passare il circuito dallo stato stabile a quello quasi-stabile, dal quale automaticamente torna nel primo stato dopo un intervallo di tempo determinato dai parametri del circuito stesso. In definitiva, il monostabile genera, in seguito ad un comando, un'unica onda rettangolare (*impulso*) di durata prestabilita. Utilizzando i fronti dell'onda rettangolare come comando per altri dispositivi, il monostabile può essere impiegato come *temporizzatore* o come *ritardatore*.

Il *multivibratore bistabile* presenta due stati stabili in cui può permanere indefinitamente. Il circuito passa da uno stato all'altro solo in seguito ad un comando esterno. In definitiva, il bistabile coincide con il *flip-flop* e trova largo impiego come cella di memoria e divisore di frequenza.

I multivibratori possono essere realizzati a BJT, a FET, con amplificatori operazionali, con porte logiche oppure in forma di circuito integrato. Mentre i bistabili sono ormai realizzati esclusivamente in forma integrata, per i monostabili e gli astabili i progettisti possono prendere in considerazione diverse soluzioni. I monostabili vengono anche prodotti in forma integrata nella serie TTL e HCMOS (74121 e 74122). Spesso, però, la soluzione più semplice è quella di utilizzare *circuiti timer integrati* (quali il 555 – analizzato in dettaglio in questo capitolo – o anche l'XR 2240, l'8038) i quali, opportunamente configurati, possono funzionare sia da monostabili, che da astabili.

3.2 Multivibratori monostabili integrati

Nella realizzazione di sistemi elettronici digitali si pongono frequentemente problemi di sincronizzazione fra segnali. Può capitare, per esempio, di dover fornire a un componente un fronte di salita o di discesa con un determinato ritardo rispetto ad altri avvenimenti. Altre volte può essere necessario generare un fronte di salita e un fronte di discesa distanziati da un ben preciso intervallo di tempo. Tali situazioni possono essere risolte utilizzando un multivibratore monostabile integrato. In tecnologia TTL e HCMOS esistono ad esempio tre integrati specifici che svolgono tale funzione: il 74121, il 74122 e il 74123. In questo paragrafo prendiamo in esame il tipo “121”.

Il “121” è un multivibratore monostabile con un “trigger di Schmitt” sugli ingressi. Il trigger di Schmitt – indicato dall'isteresi stilizzata all'interno del circuito AND di Fig. 3.1 – verrà preso in esame nel Cap. 11. Per adesso, basti sapere che quest'ultimo provvede a squadrare bene le uscite, qualora gli ingressi siano lentamente variabili o provvisti di rumore. La larghezza dell'impulso in uscita (*output pulse width*) è programmabile: utilizzando la sola resistenza interna R_{int} si hanno 35 ns; ricorrendo a una resistenza e un condensatore esterni – R_{ext} , C_{ext} – si può farla variare fra 40 ns e 28 s.

Osservando il pin out in Fig. 3.1a si possono evidenziare una porta OR con ingressi negati, una AND con *trigger di Schmitt*, un flip-flop ed una resistenza R_{int} . La presenza del trigger di Schmitt consente di lavorare con forme d'onda d'ingresso lente e non perfettamente squadrate.

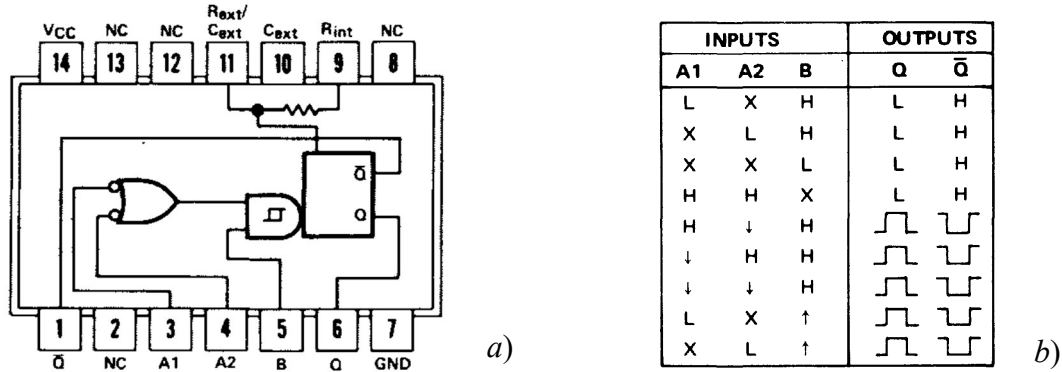


Fig. 3.1 – Monostabile 74121: a) schema funzionale e pin-out; b) tabella di verità

La tabella di verità di Fig. 3.1b ci informa che: se A1 è basso mentre B è alto, oppure se A2 è basso mentre B è alto, oppure se B è basso, o, infine, se A1 e A2 sono entrambi bassi, il “121” non reagisce a eventuali fronti in ingresso. Se non siamo in una di queste quattro condizioni risponde a un fronte di discesa di A1, o di A2, o di entrambi, oppure a un fronte di salita di B, con un impulso di durata determinata.

Il numero di possibili condizioni della tabella di verità può apparentemente sembrare eccessivo; esso ci permette invero di ottenere un componente molto flessibile, adattabile a diverse situazioni. Se si ha bisogno di un monostabile “semplice” ad un ingresso ed un’uscita, si possono adottare i collegamenti di Fig. 3.2a e Fig. 3.2b a seconda che l’impulso debba essere comandato dal fronte di discesa o da quello di salita. Se, invece, si vuole che gli impulsi provengano da due ingressi distinti, si adotta allora la configurazione di Fig. 3.2c, o ancora quella di Fig. 3.2d nel caso in cui si desideri un ulteriore ingresso di *enable*.

Utilizzando la sola resistenza interna collegandola come in Fig. 3.3a, si ottiene un impulso in uscita di $t_w = 35$ ns. Altrimenti si può ricorrere ad una capacità esterna, C_{ext} , collegata come in Fig. 3.3b, lasciando collegata la resistenza R_{int} (con una capacità di 80 pF si ottiene un impulso di 110 ns), oppure a una resistenza, R_{ext} , ed una capacità entrambe esterne come in Fig. 3.3c; in quest’ultimo caso R_{int} deve rimanere scollegata.

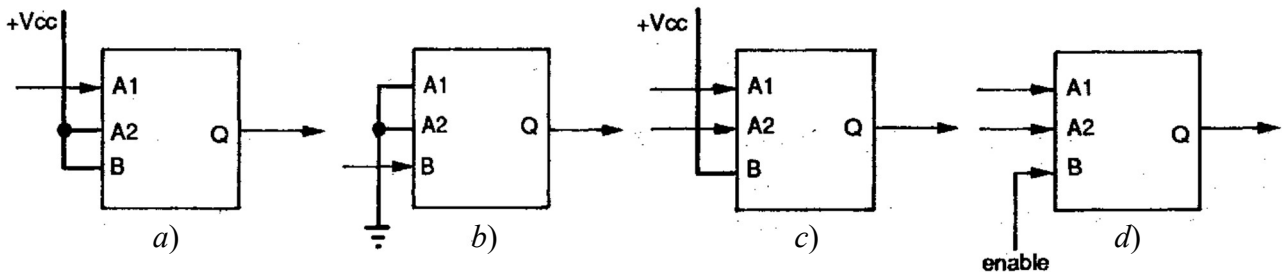


Fig. 3.2 – Configurazioni del 74121: in a) l'impulso in uscita è innescato da un fronte di discesa su A1; in b) da un fronte di salita su B; in c) da un fronte di discesa su A1 o su A2; in d) ancora da un fronte di discesa su A1 o su A2, ma solo se il segnale di abilitazione su B (enable) è alto

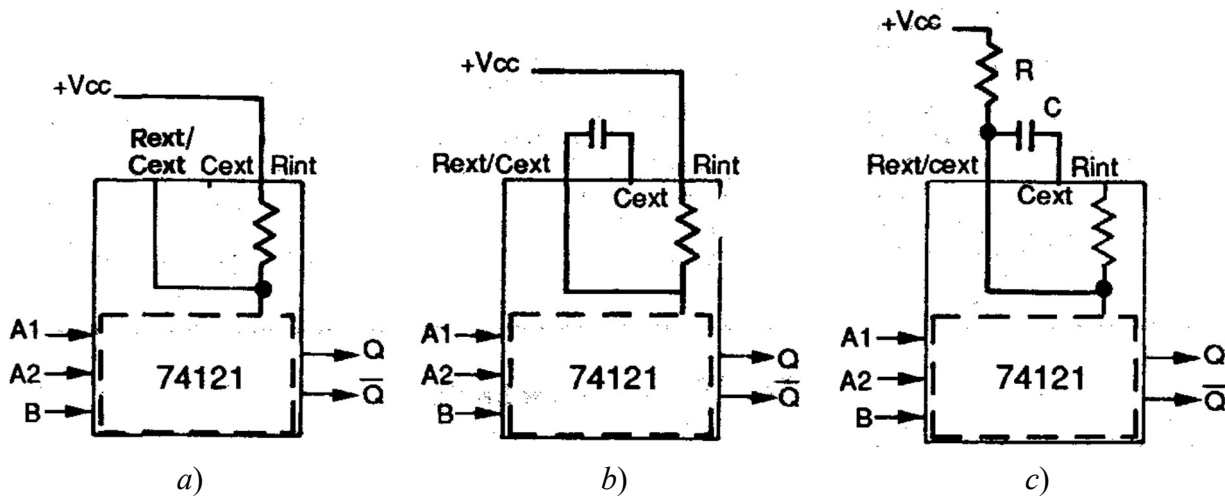


Fig. 3.3 – a) Configurazione senza elementi esterni ($t_w = 30 \text{ ns}$), b) con sola capacità esterna e c) con capacità e resistenza esterne

I valori di larghezze di impulso t_w prima citati sono *valori tipici*, dunque nella pratica possono assumere un campo di valori più ampio (riportato nei data sheet). Normalmente si usa la sola R_{int} – con o senza la C_{ext} – qualora non si desiderino larghezze d'impulso t_w troppo grandi, come nel caso in cui sia necessario un segnale trigger di reset. Diversamente, si usano sia una capacità, che una resistenza esterne e, in tal caso, la larghezza t_w dell'impulso d'uscita è data dalla relazione:

$$t_w = C_{ext} \cdot R_{ext} \cdot \ln 2 \approx 0,7 C_{ext} \cdot R_{ext} . \tag{3.1}$$

Tale formula è valida se i valori di R_{ext} sono compresi tra 2 kΩ e 40 kΩ e quelli di C_{ext} tra 10 pF e 10 μF, altrimenti i valori di R_{ext} e di C_{ext} vanno ricercati sperimentalmente. Pertanto, è sempre

opportuno utilizzare un trimmer, in luogo di una resistenza fissa, se si vuole ottenere una larghezza d'impulso d'uscita ben precisa.

3.3 Timer 555

Il temporizzatore integrato 555 è stato progettato appositamente per applicazioni come temporizzatore (monostabile) e generatore di onda quadra (astabile). Per la versatilità e la facilità di impiego è diventato in breve tempo il più diffuso fra gli integrati del suo tipo e le sue applicazioni sono innumerevoli.

Lo schema funzionale è illustrato in Fig. 3.4. L'alimentazione è normalmente compresa fra 5V e 15V e va applicata al terminale 8 (V_{CC}); il terminale 1 è quello di massa (GND). Il 555 è provvisto di due ingressi: *trigger* (2) e *soglia* (*threshold*, 6). L'uscita è costituita dal terminale 3 e risulta TTL compatibile quando l'alimentazione è 5 V. Il terminale 7 (*scarica* o *discharge*) fa capo internamente ad un transistor ($T1$), chiamato BJT, che verrà studiato nel Cap. 8. Il BJT funziona come un interruttore pilotato dal segnale che arriva al terminale B: se quest'ultimo è a livello alto il transistor si comporta da interruttore chiuso e collega il terminale 7 a massa ($T1$ ON); viceversa, se B è a livello basso il transistor si comporta da interruttore aperto lasciando il terminale 7 fluttuante ($T1$ OFF). Sono presenti anche due comparatori (analogici) il cui funzionamento è il seguente: se al terminale indicato con “+” è applicata una tensione (analogica) maggiore di quella applicata al terminale “-”, l'uscita è una tensione (digitale) a livello alto (pari al valore della tensione di alimentazione); in caso contrario, l'uscita si porta a livello basso. I comparatori analogici saranno trattati più in dettaglio nel Cap. 4. La funzione dei terminali di *reset* (4) e *tensione di controllo* (5) verrà spiegata più avanti.

Il funzionamento del 555 è il seguente. Se la tensione v_2 all'ingresso di *trigger* è inferiore a $1/3 V_{CC}$ e contemporaneamente la tensione v_6 all'ingresso di *soglia* è inferiore a $2/3 V_{CC}$, il 555 presenta l'uscita (3) allo stato alto ($\approx V_{CC}$) ed il BIT interno $T1$ è interdetto (OFF). Viceversa, se $v_6 > 2/3 V_{CC}$ e contemporaneamente $v_2 > 1/3 V_{CC}$, l'uscita scende allo stato basso (≈ 0 V) e $T1$ va ON.

La terza combinazione degli ingressi, $v_2 > 1/3 V_{CC}$ e contemporaneamente $v_6 < 2/3 V_{CC}$, non produce effetto, lasciando il timer nella condizione precedente (stato di *memoria*). L'ultima combinazione, $v_2 < 1/3 V_{CC}$ e $v_6 > 2/3 V_{CC}$, non è operativa e quindi da evitare; in corrispondenza ad essa il comportamento del 555 varia da costruttore a costruttore.

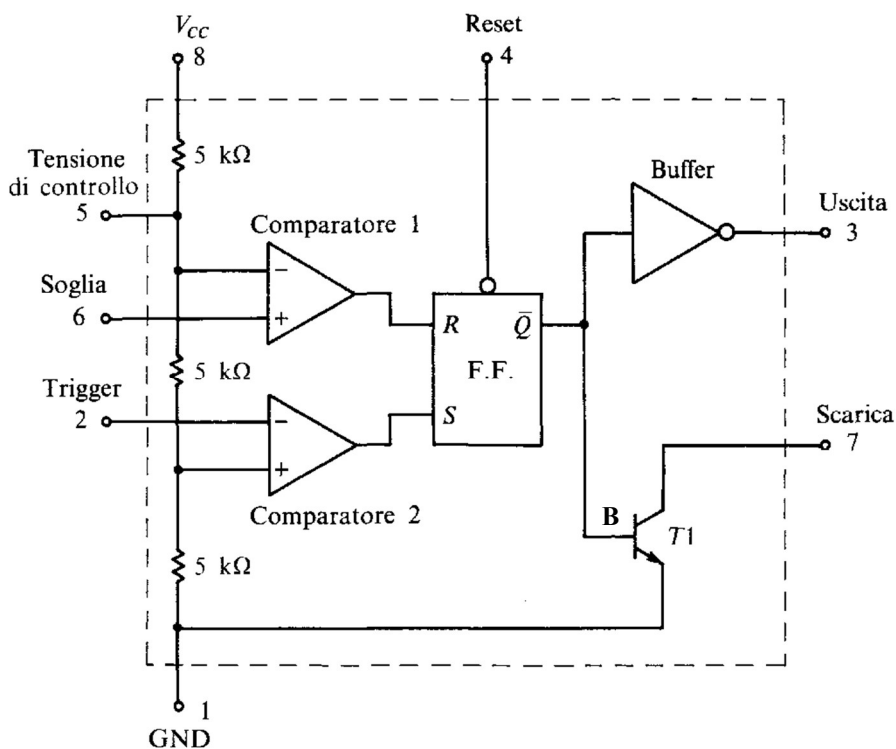


Fig. 3.4 – Schema funzionale del 555

Quanto detto è più sinteticamente espresso dalla Tab. 3.1 limitatamente ai due casi attivi. In altre parole, il *trigger* viene attivato portandolo sotto $1/3 V_{CC}$, purché la *soglia* sia inattiva ($< 2/3 V_{CC}$). Viceversa la *soglia* viene attivata portandola sopra $2/3 V_{CC}$, purché il *trigger* sia inattivo ($> 1/3 V_{CC}$).

Tab. 3.1 – Tabella funzionale del timer 555

	Trigger v_2	Soglia v_6	Uscita v_3	T1
Trigger attivo	$< 1/3 V_{CC}$	$< 2/3 V_{CC}$	Alta (H)	OFF
Soglia attiva	$> 1/3 V_{CC}$	$> 2/3 V_{CC}$	Bassa (L)	ON

L'uscita è in grado di erogare o assorbire, secondo i dati tecnici, una corrente di 200 mA (corrente di *source* o corrente di *sink*). La tensione al livello alto è inferiore di circa 0,5 V rispetto a V_{CC} , mentre a livello basso è di circa 0,1 V (per una corrente di *sink* inferiore a 25 mA).

La struttura a blocchi del timer, illustrata in Fig. 3.4, è la seguente: un partitore molto preciso costituito da tre resistenze da $5\text{ k}\Omega$ fornisce ai due comparatori le tensioni di riferimento, rispettivamente $2/3 V_{CC}$ e $1/3 V_{CC}$. Quando v_2 all'ingresso di *trigger* scende sotto $1/3 V_{CC}$, il comparatore 2 fornisce un'uscita alta che attiva l'ingresso di *set* del flip-flop *SR*. Pertanto l'uscita \bar{Q} del flip-flop si porta a livello basso, interdicendo *T1* e portando il buffer invertente ad avere l'uscita alta.

Quando v_6 a sua volta supera $2/3 V_{CC}$, viene attivato l'ingresso di *reset* del flip-flop, quindi l'uscita \bar{Q} va a livello alto forzando *T1* ad andare in stato ON e portando l'uscita del buffer a livello basso.

Il piedino 4 di *reset*, quando è basso ($\leq 0,4\text{ V}$), azzerà il timer portando l'uscita 3 a livello basso e *T1* in conduzione.

Il terminale 5 (*tensione di controllo*) è collegato direttamente al partitore e viene usato in alcune applicazioni per variare dall'esterno la tensione sul partitore e quindi i riferimenti dei comparatori. Quando non è usato, non deve essere lasciato fluttuante, bensì collegato a massa tramite un condensatore da 10 nF il quale, mentre cortocircuita a massa eventuali disturbi captati dal terminale, isola in continua il partitore dalla massa.

3.3.1 Il 555 come astabile

In Fig. 3.5a è riportato lo schema circuitale che consente di impiegare il 555 come multivibratore astabile. Il ramo di temporizzazione è costituito da R_A , R_B e C , a cui sono collegati sia gli ingressi (2 e 6) del timer (in modo da sentire la tensione sul condensatore), sia il terminale di scarica (7). Il BJT interno è rappresentato dall'interruttore *T1*.

All'accensione il condensatore è scarico e $v_C = 0$. Essendo la tensione del *trigger* e della *soglia* al di sotto di $1/3 V_{CC}$, l'uscita (3) è alta e *T1* è OFF; allora il condensatore si carica tendendo a V_{CC} con costante di tempo $\tau = (R_A + R_B) C$, come riportato in Fig. 3.5b. Il circuito equivalente di carica del condensatore è riportato in Fig. 3.5c. La corrente i_C proveniente dal terminale positivo di V_{CC} carica il condensatore inizialmente scarico, attraverso le resistenze R_A e R_B e non può fluire né attraverso il terminale (7) di scarica in quanto *T1* è aperto, né attraverso i terminali (2) e (6) di *trigger* e di *soglia* in quanto tali ingressi sono ad alta impedenza (cfr. Cap. 4) e non scorre corrente in essi. Ecco perché il circuito equivalente è composto dall'unica maglia in figura.

Quando v_C raggiunge $2/3 V_{CC}$, si attiva l'ingresso di *soglia*, che porta l'uscita a livello basso e *T1* in stato ON. Il condensatore C allora si scarica su R_B e su *T1* (che essendo in stato ON presenta resistenza trascurabile e può essere considerato un cortocircuito) con costante di tempo $R_B C$ più breve della precedente. Il circuito equivalente di scarica del condensatore è riportato in Fig. 3.5d.

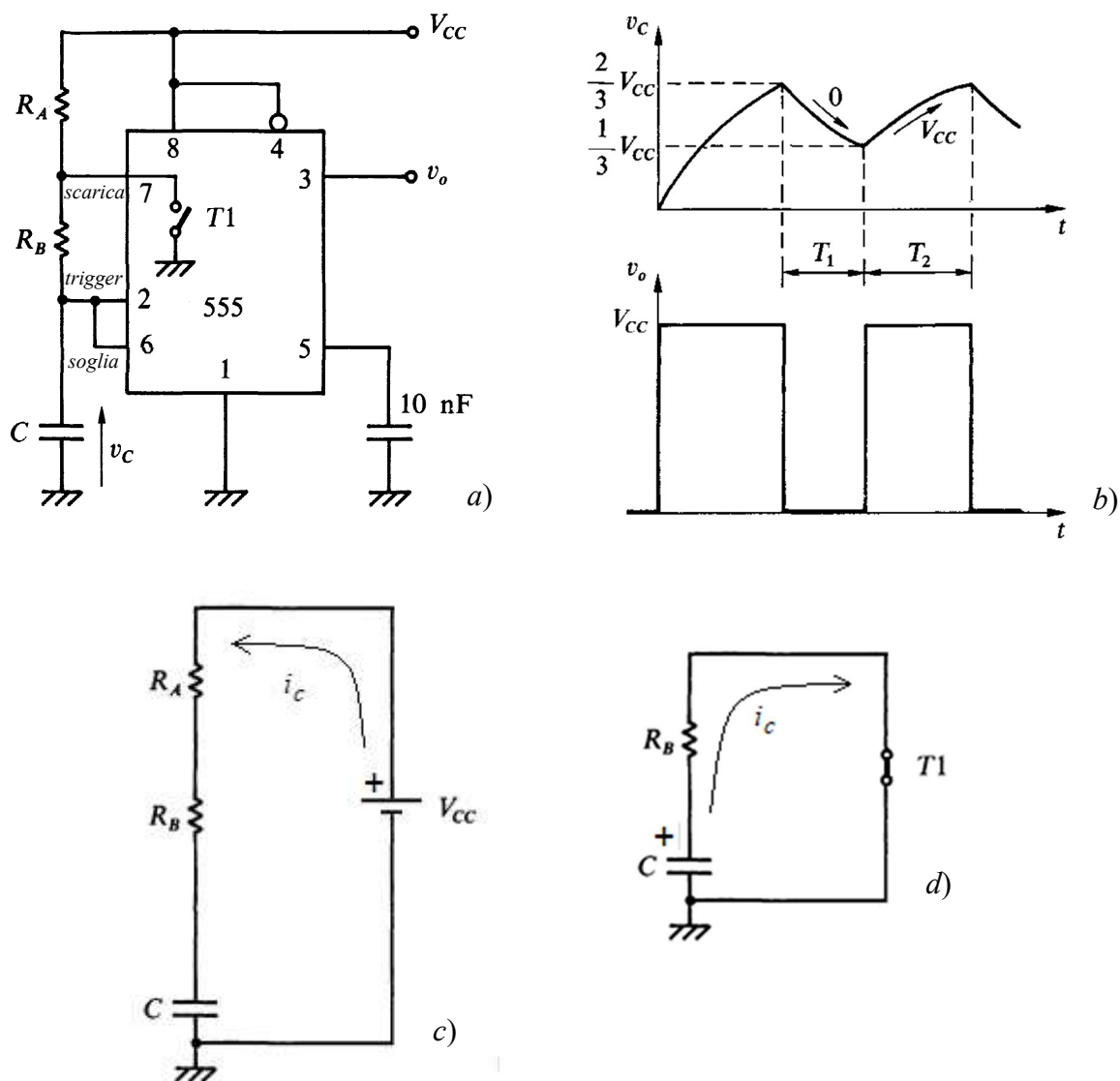


Fig. 3.5 – a) Il 555 in configurazione astabile. b) Forme d'onda di v_C e v_o .
 c) Circuito equivalente di carica e d) di scarica del condensatore C

Durante la fase di scarica v_C diminuisce sino a giungere a $\frac{1}{3} V_{CC}$: a quel punto il trigger, attivandosi, riporta il 555 nella condizione iniziale, C ricomincia a caricarsi e il ciclo riprende daccapo. In Fig. 3.5b sono riportati gli andamenti delle tensioni v_C e v_o .

Per calcolare il periodo (e la frequenza) dell'oscillazione si fa riferimento all'andamento esponenziale di v_C , escludendo il primo semiperiodo di transitorio. Ricordiamo che l'espressione analitica di una funzione esponenziale decrescente $y(t)$ che parte dal valore y_0 per $t = 0$ e tende a y_∞ per $t \rightarrow \infty$, è la seguente:

$$y(t) = y_{\infty} - (y_{\infty} - y_0)e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3.2)$$

da cui si ricava la relazione inversa:

$$t = \tau \ln\left(\frac{y_{\infty} - y_0}{y_{\infty} - y(t)}\right). \quad (3.3)$$

La relazione (3.3) può essere impiegata per calcolare l'intervallo T_1 indicato in Fig. 3.5b relativo al secondo transitorio esponenziale. Utilizzando i valori indicati in figura, si ottiene

$$T_1 = R_B C \ln\left(\frac{0 - \frac{2}{3}V_{CC}}{0 - \frac{1}{3}V_{CC}}\right) = 0,7R_B C; \quad (3.4)$$

Analogamente si ricava T_2 :

$$T_2 = (R_A + R_B) C \ln\left(\frac{V_{CC} - \frac{1}{3}V_{CC}}{V_{CC} - \frac{2}{3}V_{CC}}\right) = 0,7(R_A + R_B) C. \quad (3.5)$$

Pertanto, il periodo dell'oscillazione si ricava da

$$T = \frac{1}{f} = T_1 + T_2 = 0,7(R_A + 2R_B) C. \quad (3.6)$$

Si noti che, non potendo essere eliminata R_A senza danneggiare il BJT di scarica per l'eccessiva corrente, i due semiperiodi non possono essere uguali; perciò teoricamente il duty cycle risulta sempre superiore al 50%.

3.3.2 Il 555 come monostabile

Modificando il circuito, come indicato in Fig. 3.6a, si ottiene un monostabile il cui ingresso coincide con l'ingresso di *trigger* (2) del 555. In Fig. 3.6b è riportato l'andamento della tensione di comando v_i correlata alle tensioni sul condensatore e sull'uscita.

Lo stato stabile (per $t < 0$) vede $T1$ ON (e di conseguenza il condensatore C scarico) e l'uscita bassa. Infatti, se così non fosse, C si caricherebbe e, allorché $v_C = 2/3 V_{CC}$, verrebbe attivato l'ingresso di *soglia*, con conseguente conduzione di $T1$ e uscita bassa.

Quando, all'istante $t = 0$, v_i scende al di sotto di $1/3 V_{CC}$, il *trigger* si attiva portando l'uscita alta e $T1$ OFF. Il condensatore si carica tendendo a V_{CC} con costante di tempo $\tau = R_A C$.

Allorché v_C arriva a $2/3 V_{CC}$, la soglia viene attivata e $T1$ va ON, scaricando a massa molto rapidamente il condensatore. In particolare, la scarica avviene con costante di tempo data dal prodotto tra il condensatore C e la resistenza del BJT che è in stato ON. Quest'ultima è molto piccola

(praticamente quasi un cortocircuito) per cui la costante di tempo è prossima allo zero. Applicando sempre la relazione (3.3) alla v_C , si ricava la durata T dell'impulso:

$$T = R_A C \ln \left(\frac{V_{CC} - 0}{V_{CC} - \frac{2}{3} V_{CC}} \right) = 1,1 R_A C . \tag{3.7}$$

Essendo molto rapida la scarica di C su $T1$, il tempo di recupero è praticamente trascurabile.

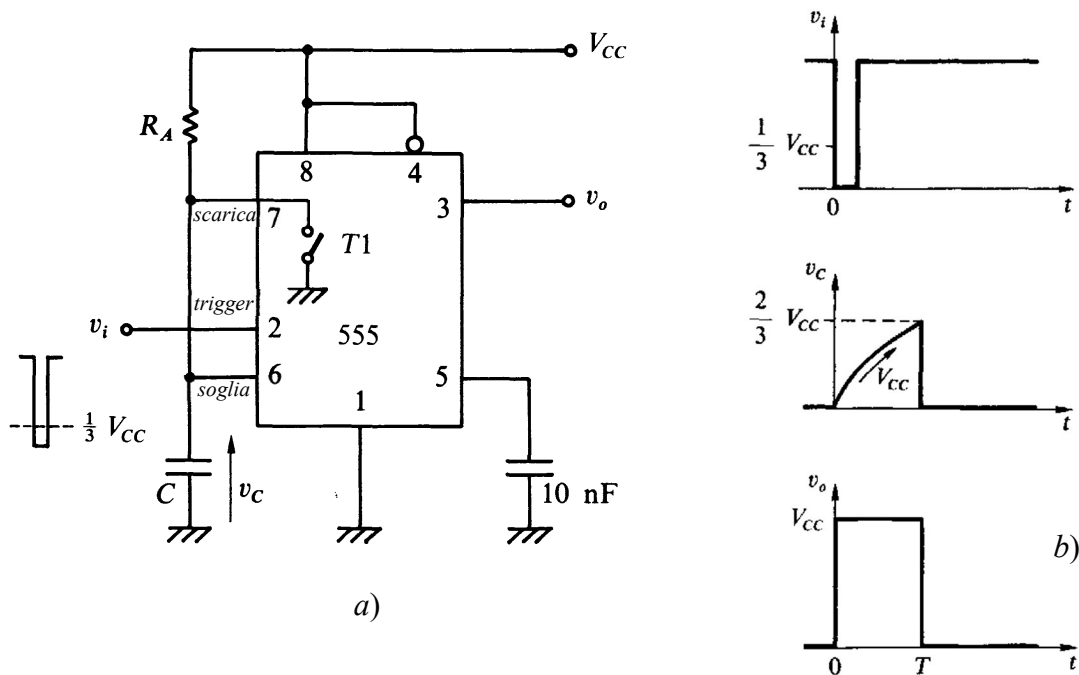


Fig. 3.6 – a) Il 555 in configurazione monostabile. b) Forme d'onda di v_i , v_C e v_o