

Esercitazione 11 - Gruppo AC

Semplici circuiti logici e multivibratori

Marco Cilibrasi

Tommaso Pajero

16 aprile 2015

L'esperienza consiste nel montaggio e nella verifica del funzionamento di alcuni circuiti logici elementari, di un multivibratore monostabile e di un multivibratore astabile. Infine, collegando questi ultimi due circuiti per mezzo di un derivatore RC, si è realizzato un generatore di onda quadra a periodo e *duty cycle* modificabili variando semplicemente il valore di due resistenze. Le uniche porte logiche utilizzate per la realizzazione dei vari circuiti sono le otto porte logiche NAND di due IC SN7400.

1. Costruzione di circuiti logici elementari

1.a Verifica del funzionamento di una porta NAND tramite l'osservazione di un diodo LED

Si è montato il circuito in figura 1, collegando le entrate di una delle porte NAND di un IC7400 a due degli interruttori del *DIP switch* in dotazione, le cui seconde estremità sono state poste a terra. Alternativamente, si sono posti i due interruttori nelle quattro configurazioni possibili, fornendo alla porta NAND tutte le diverse combinazioni di segnale in entrata realizzabili¹. In questo modo si è verificata la relativa tabella di verità osservando il diodo (il LED, infatti, è illuminato solo se l'uscita della porta è alta).

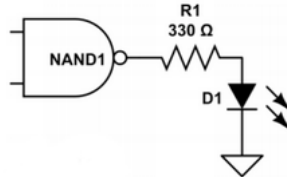


Figura 1: Circuito utilizzato per la verifica del funzionamento della porta NAND (i cui ingressi sono stati collegati a massa tramite due interruttori).

1.b Verifica del funzionamento della porta NAND all'oscilloscopio

Si sono scollegate le due entrate della porta NAND dagli interruttori e si sono collegate ai piedini Y1 e Y2 del circuito montato nell'esperienza 10, che forniscono due onde quadre di uguale periodo e sfasate di $\pi/2^2$ (la seconda è in ritardo sulla prima). Si sono visualizzate l'uscita della porta NAND e il segnale fornito dal piedino Y2 all'oscilloscopio, impostando il trigger sul fronte in salita del piedino Y1. È stato così possibile verificare la tabella di verità della porta direttamente osservando la schermata di tale strumento, riportata in figura 2.

1.d Progettazione, realizzazione e verifica del funzionamento di alcuni elementari circuiti logici

Si sono progettati e montati dei circuiti logici che implementano le funzioni AND, OR, XOR, e un HALF ADDER utilizzando esclusivamente porte logiche NAND, nel minor numero possibile³. Si è quindi verificata all'oscilloscopio la tabella di verità di tali circuiti, utilizzando la stessa procedura descritta al punto 1.b. Gli schemi circuitali e le schermate che visualizzano i segnali in ingresso e in uscita sono riportate in figura 3.

¹Per la famiglia di integrati TTL, infatti, un ingresso non collegato equivale a un ingresso alto.

²E quindi coprono tutte le combinazioni possibili di segnali in ingresso alla porta.

³Il circuito HALF ADDER presenta due uscite, SOMMA e RESTO, pari rispettivamente all'XOR e all'AND dei segnali in ingresso.

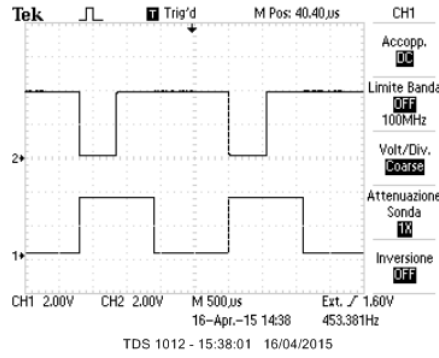


Figura 2: Tabella di verità della porta NAND: il trigger è impostato sul fronte in salita dell'entrata Y1, Y2 è visualizzata sul Ch1 e l'uscita del NAND sul Ch2.

2. Multivibratore monostabile

2.a-b Montaggio e misura della durata dell'impulso in uscita

Si è montato il circuito rappresentato in figura 4 con $R_1 = 457 \pm 4 \Omega$ e $C_1 = 103 \pm 4 \text{ nF}$; l'ingresso è stato collegato al generatore di onde quadre, impostato su una frequenza vicina a 5 kHz e con *duty cycle* minimo (prossimo al 7.5%). In uscita si è osservata un'onda quadra, riportata, congiuntamente a quella dell'ingresso, in figura 5. Si è controllato che la durata dell'impulso in uscita, pari a $t_{pos} = 42.8 \pm 0.2 \mu\text{s}$, non dipendesse dalla frequenza né dal *duty cycle* dell'impulso in ingresso. Ciò si è rivelato vero, a patto che la durata dell'impulso in ingresso fosse superiore a $14.7 \pm 0.1 \mu\text{s}$ (sotto a tale valore t_{pos} diminuiva)⁴.

2.c Funzionamento del circuito

Consideriamo il regime in cui il circuito funge effettivamente da multivibratore monostabile (con t_{pos} costante). Nel momento in cui l'entrata commuta dallo stato basso a quello alto la tensione in uscita da NAND2, V_C e V_{out} assumono istantaneamente il valore alto. V_C inizia però immediatamente a diminuire, a causa della carica di C_1 attraverso R_1 , finché non raggiunge il valore di commutazione V_{comm} della porta NAND3. Quando ciò avviene, V_{out} e la tensione in uscita da NAND2 passano allo stato basso (nel frattempo, infatti, l'impulso su V_{in} è terminato e l'entrata è tornata bassa). Questo ragionamento spiega le forme d'onda riportate nelle figure 5 e 6. In particolare, al momento della commutazione l'inerzia della grande intensità di corrente associata alla discontinuità di V_C (in corrispondenza della quale, come si è osservato all'oscilloscopio, termina pure l'impulso in uscita) provoca un *overshoot* rispetto al valore atteso V_{OL} . Tale fenomeno è limitato dal diodo, che mantiene V_C maggiore dell'opposto della sua tensione di soglia (il suo effetto può essere apprezzato maggiormente in figura 7, dove si osserva che il segnale scende al di sotto di $V_C^{min} = -0.78 \pm 0.02 \text{ V}$, per poi risalire velocemente). L'evoluzione successiva dell'onda corrisponde alla scarica di C_1 fino alla tensione V_{OL} .

In particolare, si sono misurati $V_C^{max} = 3.2 \pm 0.1 \text{ V}$ e $V_{comm} = 1.50 \pm 0.07 \text{ V}$. Dall'analisi teorica che abbiamo fatto ci attenderemmo che t_{pos} , corrispondente alla carica del condensatore, valesse:

$$t_{pos}^{teo} = R_1 C_1 \ln \frac{V_C^{max}}{V_{comm}} = 36 \pm 3 \mu\text{s}$$

Questo risultato si discosta leggermente dal valore sperimentale $t_{pos} = 42.8 \pm 0.2 \mu\text{s}$, probabilmente a causa dell'impedenza in uscita dalla porta NAND2 e dell'impedenza in entrata alla porta NAND3. Ad ogni modo, ci attenderemmo che la dipendenza di t_{pos} da R_1 sia lineare.

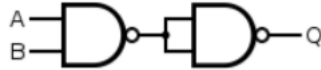
Infine, si è osservata la forma di V_C per impulsi in ingresso di durata inferiore a $14.7 \pm 0.1 \mu\text{s}$. In particolare, si è notato che in questo caso V_C^{max} non raggiungeva il valore prima misurato di $3.2 \pm 0.1 \text{ V}$, bensì si attestava su valori più bassi. Questo fenomeno, di cui non si è riusciti a fornire una spiegazione, dà ragione della diminuzione della durata degli impulsi su V_{out} misurata al punto 2.a-b (infatti, la scarica del condensatore inizia da un valore di tensione più basso, e dunque dura meno).

2.d Verifica della linearità $t_{pos} - R_1$

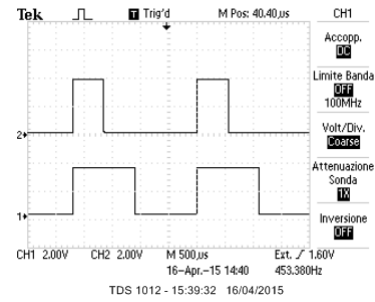
Si è sostituita R_1 con resistenze di valore non troppo distante, misurando i t_{pos} relativi. I risultati sono riportati in tabella 1 e graficati in figura 8. L'andamento fra le due grandezze è lineare a vista, come atteso (un fit lineare dei primi cinque dati, riportato in sovrapposizione al grafico succitato, restituisce $\chi_{rid}^2 = 0.7$). Solo l'ultimo

⁴Per una spiegazione di tale fatto si veda il punto 2.c.

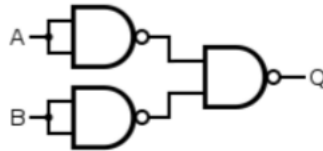
Figura 3: Schemi di circuiti che implementano le semplici funzioni logiche del punto 1.d e, sulla destra, osservazione all'oscilloscopio del loro funzionamento. Il Ch1 visualizza l'entrata A, il Ch2 l'uscita del circuito; il trigger è impostato sul fronte d'onda in salita dell'entrata B (che ha la stessa forma e periodo di quella A ma è in anticipo di $\pi/2$).



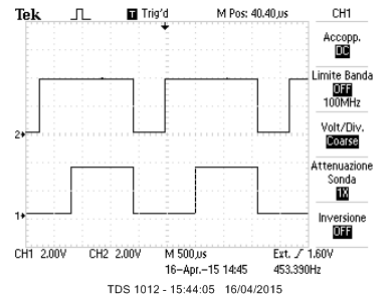
(a) AND - Schema circuitale.



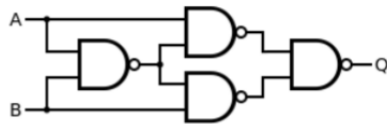
(b) AND - Segnale in uscita.



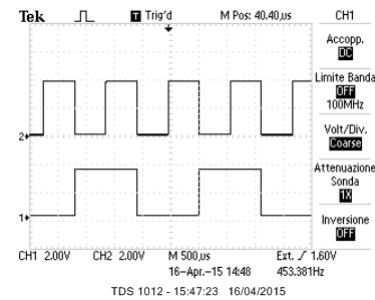
(c) OR - Schema circuitale.



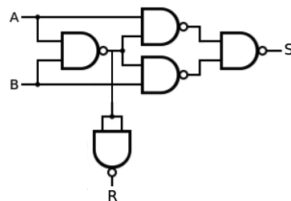
(d) OR - Segnale in uscita.



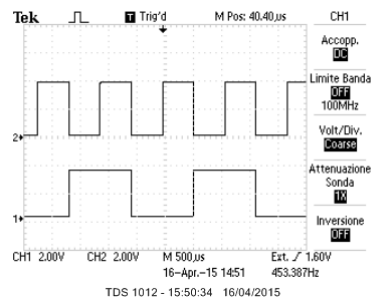
(e) XOR - Schema circuitale.



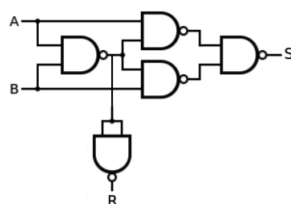
(f) XOR - Segnale in uscita.



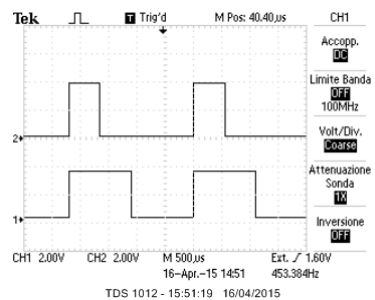
(g) HALF ADDER - Schema circuitale.



(h) HALF ADDER - Segnale all'uscita S (somma).



(i) HALF ADDER - Schema circuitale.



(j) HALF ADDER - Segnale all'uscita R (resto).

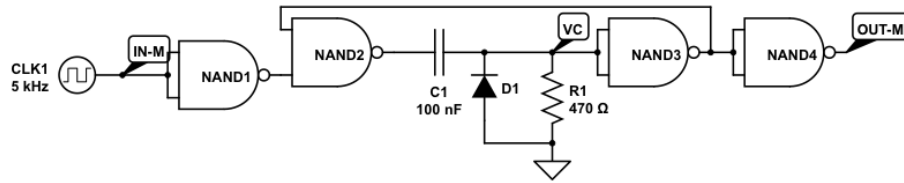


Figura 4: Schema circuitale del multivibratore monostabile del punto 2.

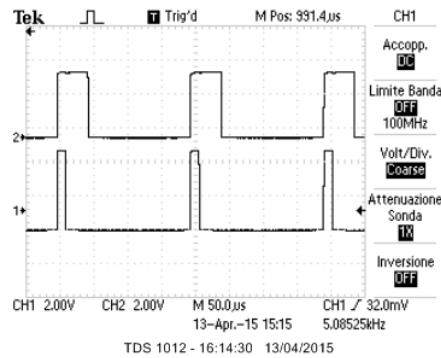


Figura 5: Tensione in entrata (Ch.1) e in uscita (Ch.2) dal multivibratore monostabile in figura 4.

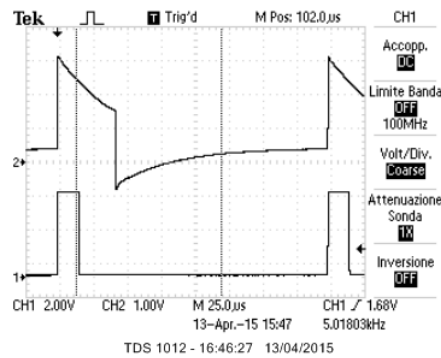


Figura 6: Tensione in entrata (Ch.1) e V_C (Ch.2) del multivibratore monostabile in figura 4.

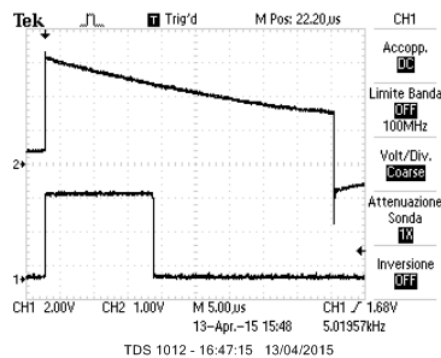


Figura 7: Tensione in entrata (Ch.1) e V_C (Ch.2) del multivibratore monostabile in figura 4.

punto sperimentale si discosta leggermente dalla retta ottenuta; ciò è probabilmente dovuto al fatto che per valori di R_1 prossimi al $k\Omega$ la resistenza in ingresso di NAND3, posta in parallelo, comincia a contare e abbassa il tempo di scarica del condensatore e, conseguentemente, la durata dell'impulso in uscita.

Tabella 1: Durata degli impulsi in uscita su V_{out} al variare di R_1 per il multivibratore monostabile in figura 4.

R_1 [Ω]	σ_{R_1} [Ω]	t_{pos} [μs]	$\sigma_{t_{pos}}$ [μs]
120	1	6.08	0.04
385	3	34.8	0.2
457	4	42.8	0.2
559	4	53.6	0.4
821	7	81.6	0.4
1184	9	116	1

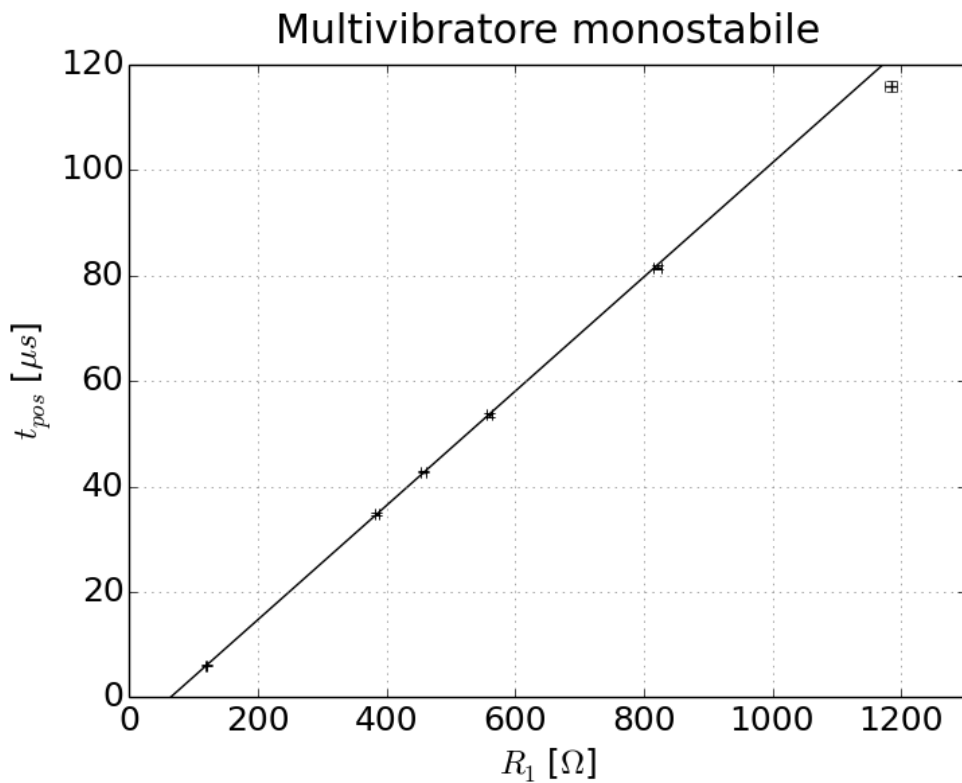


Figura 8: Durata degli impulsi in uscita su V_{out} al variare di R_1 per il multivibratore monostabile in figura 4.

3. Multivibratore astabile

Senza smontare il circuito precedente, abbiamo montato il circuito in figura 9 utilizzando $R_2 = 1020 \pm 8 \Omega$ e $C_2 = 101 \pm 4 \text{ nF}$.

3.b Forma d'onda in uscita OUT-A

Abbiamo osservato all'oscilloscopio la forma d'onda in uscita, verificando che si trattasse effettivamente di un'onda quadra (figura 10) e ne abbiamo misurato periodo e duty cycle, ottenendo i seguenti risultati:

- Periodo: $T = 198 \pm 1 \mu s$;
- Durata dell'impulso positivo: $t_{pos} = 135 \pm 1 \mu s$;
- Duty cycle: $68.2 \pm 0.6\%$.

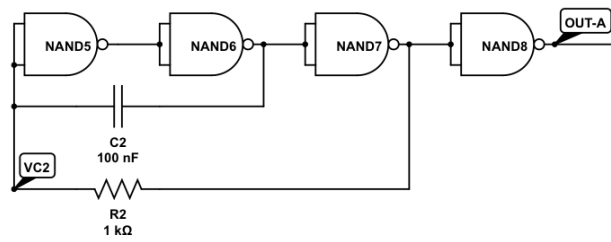


Figura 9: Schema circuitale del multivibratore astabile.

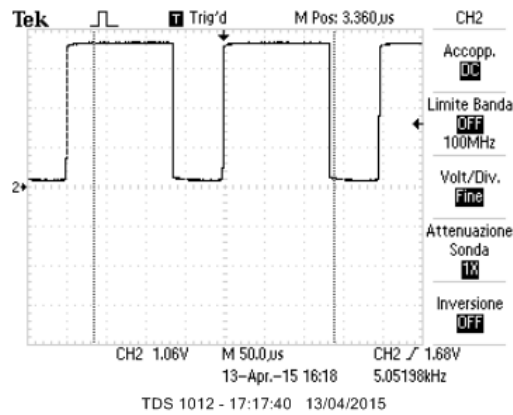


Figura 10: Forma d'onda all'uscita OUT-A.

3.c Forma d'onda in uscita VC2

Successivamente abbiamo osservato all'oscilloscopio il segnale all'ingresso del primo NAND (VC2), riportato in figura 11. In particolare, abbiamo misurato:

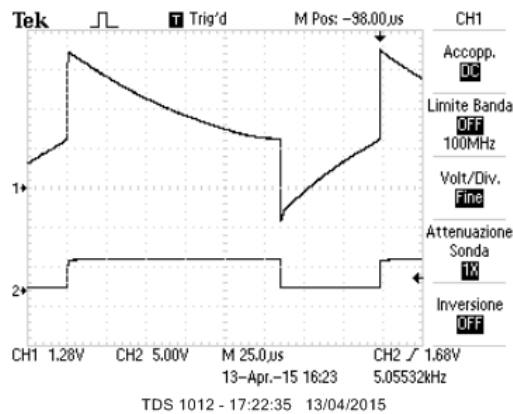


Figura 11: Forma d'onda all'uscita VC2 (CH1) sovrapposta al segnale all'uscita OUT-A (CH2).

- Tensione massima raggiunta dal segnale: $V_{MAX} = 4.4 \pm 0.2$ V;
- Tensione minima raggiunta dal segnale: $V_{MIN} = -1.14 \pm 0.06$ V;
- Tensione di commutazione del NAND5: $V_{COMM} = 1.54 \pm 0.07$ V⁵.

Abbiamo provato a dare un'interpretazione della forma d'onda in figura 11 nel modo seguente. Supponiamo che inizialmente il segnale VC2 sia TRUE ($VC2 = V_{MAX}$), allora sia l'uscita del NAND8 (OUT-A) sia l'uscita

⁵La tensione è la stessa sia in salita che in discesa.

del NAND6 sono TRUE. Entrambe le piastre del condensatore sono quindi a $\sim 5 \text{ V}$ ⁶. In uscita al NAND7 abbiamo invece FALSE, cioè R2 è collegata verso terra. Inizia quindi la scarica esponenziale del condensatore, fino a che la tensione VC2 non raggiunge la soglia di commutazione del NAND5. A questo punto tutti i segnali si negano, per cui l'armatura destra del condensatore si abbassa bruscamente fino a $\sim 0 \text{ V}$. Analogamente anche l'armatura di sinistra dovrebbe abbassarsi di 5 V , ma a causa dei diodi in entrata al NAND5 questa raggiunge una tensione pari a V_{MIN} . Il condensatore allora inizia a caricarsi attraverso la resistenza R_2 , fino a raggiungere la soglia di commutazione del NAND5, facendo ricominciare il ciclo. Da questa analisi si ottiene in particolare che la durata dell'impulso positivo è data da:

$$t_{pos} = R_2 C_2 \ln \left(\frac{V_{MAX}}{V_{COMM}} \right)^7$$

3.d Linearità con la resistenza

Nella formula sopra ottenuta notiamo che la durata dell'impulso positivo dovrebbe dipendere linearmente dal valore della resistenza R_2 ; se si rifacesse l'analisi per la durata dell'impulso negativo, si troverebbe lo stesso risultato (dipendenza lineare da R_2). Abbiamo dunque verificato la linearità fra periodo e R_2 utilizzando diverse resistenze e fittando i dati ottenuti. Le misure effettuate sono riportate in tabella 2 e nel grafico in figura 12.

Tabella 2: Durata del periodo al variare della resistenza R_2 .

R_2 [k Ω]	T[μ s]
0.357 ± 0.003	70.4 ± 0.4
0.559 ± 0.004	113 ± 1
0.666 ± 0.005	133 ± 1
1.020 ± 0.008	198 ± 1
1.49 ± 0.01	294 ± 2
1.79 ± 0.01	382 ± 2
2.18 ± 0.02	550 ± 4

Dal grafico notiamo come dopo un certo valore di R_2 ($\sim 1.5 \text{ k}\Omega$), la linearità prevista in precedenza si perda. Per le prime 4 misure la linearità è invece perfettamente verificata ($\chi^2_{rid} = 0.04$). Notiamo però che la retta ha un'intercetta all'origine non nulla ($10.2 \pm 0.1 \mu\text{s}$) e che il valore del coefficiente angolare è diverso da quanto atteso ($184.2 \pm 0.2 \text{ nF}$ contro un valore atteso di $115 \pm 14 \text{ nF}$). Questo ci porta a pensare che per un'analisi più precisa del circuito dovremmo analizzare meglio gli effetti di capacità e resistenza delle porte NAND.

4. Generatore di onda quadra

Utilizzando i due circuiti studiati in precedenza⁸ e accoppiandoli con un circuito derivatore ($C_3 = 10.2 \pm 0.4 \text{ nF}$, $989 \pm 8 \Omega$) abbiamo costruito il circuito in figura 13.

4.b Forma d'onda all'uscita del derivatore

Innanzitutto osserviamo la forma d'onda in uscita al derivatore, che serve per trasformare l'onda quadra dell'astabile in un breve impulso. Abbiamo verificato che il circuito produce correttamente un segnale impulsivo come derivata dell'onda quadra prodotta dal circuito astabile, come si può vedere in figura 14. Il monostabile è sensibile solo agli impulsi positivi, in quanto il NAND1 non è sensibile agli impulsi negativi grazie all'effetto di *clamping* dei diodi presenti in ingresso⁹.

4.c Forma d'onda all'uscita del monostabile

La forma d'onda del segnale in uscita è un'onda quadra di periodo $198 \pm 1 \mu\text{s}$ e duty cycle $21.4 \pm 0.2\%$ (figura 14). Considerando le analisi fatte separatamente per il monostabile e l'astabile, possiamo concludere che:

⁶Per questa analisi qualitativa prendiamo come valore indicativo per il TRUE $\sim 5 \text{ V}$, in realtà questo dipende dalla porta: ad esempio in uscita al NAND6 abbiamo misurato per il TRUE un valore di $V_{TRUE} = 3.3 \pm 0.2 \text{ V}$ e per il FALSE un valore di $V_{FALSE} = 0.20 \pm 0.01 \text{ V}$.

⁷Considerando quanto detto nelle note precedenti per un'analisi più precisa dovremmo considerare il valore non nullo corrispondente al FALSE, in particolare una formula più adeguata si otterrebbe mediante le sostituzioni $V_{MAX} \rightarrow V_{MAX} - V_{FALSE}$ e $V_{COMM} \rightarrow V_{COMM} - V_{FALSE}$.

⁸Tornando ai valori originari di R_1 e R_2 .

⁹Si veda lo schema circuitale dell'integrato SN7400.

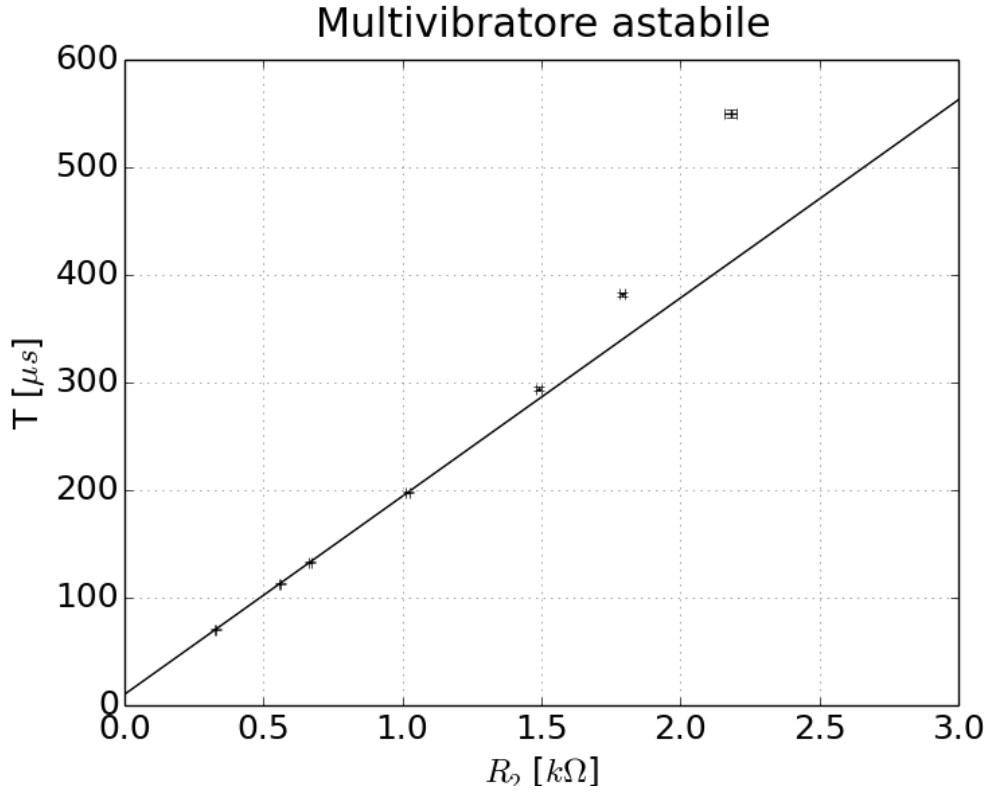


Figura 12: Relazione lineare tra periodo e R_2 .

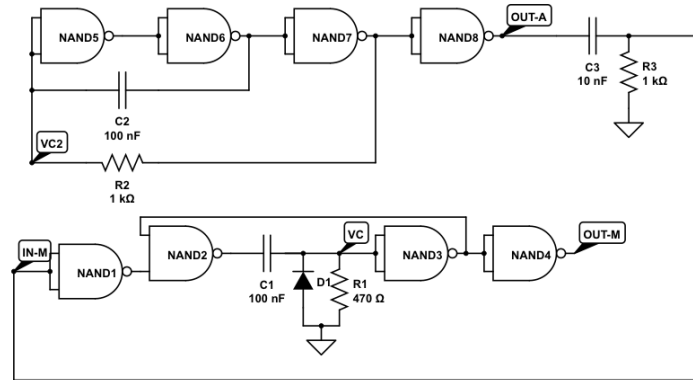


Figura 13: Schema circuitale del generatore di onda quadra.

- La durata della parte positiva del segnale di onda quadra in uscita non dipende dall'impulso forzante, ma dipende linearmente dalla resistenza R_1 (che determina la durata degli impulsi prodotti dal monostabile).
- Il periodo dell'onda quadra in uscita dipende dal periodo dell'impulso forzante, quindi dal periodo dell'onda quadra prodotta dal circuito astabile. In definitiva, dipende linearmente da R_2 .

Possiamo verificare questa nostra analisi misurando il periodo dell'onda quadra e la durata della sua parte positiva al variare dei valori di R_1 e R_2 . I risultati delle misure sono riportati in tabella 3.

Questi dati confermano la previsione teorica¹⁰. In base ad essi scegliamo i valori $R_1 = 331 \pm 3 \Omega$ e $R_2 = 454 \pm 4 \Omega$, in modo da ottenere un'onda quadra di periodo $T = 93.6 \pm 0.4 \mu s$ e $t_{pos} = 27.0 \pm 0.2 \mu s$ (duty cycle $28.8 \pm 0.2\%$), osservabile in figura 15.

¹⁰Notiamo che t_{pos} varia leggermente al variare di R_2 , come già discusso nell'analisi del monostabile. Questo quindi non è in contrasto con la nostra previsione.

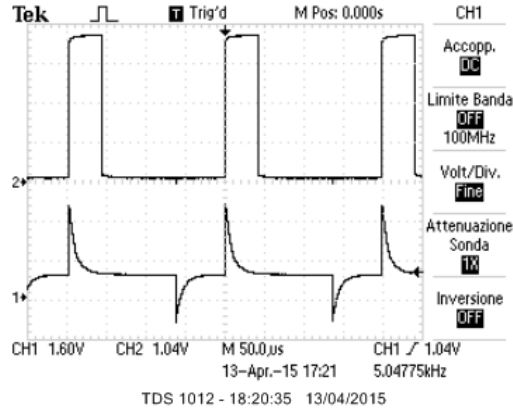


Figura 14: Forma d'onda all'uscita del derivatore (CH1) e forma d'onda all'uscita OUT-M (CH2).

Tabella 3: Durata del periodo e dell'impulso positivo al variare delle resistenze R_1 e R_2

R_1 [Ω]	R_2 [$k\Omega$]	$T[\mu s]$	$t_{pos}[\mu s]$
331 ± 3	0.326 ± 0.003	69.6 ± 0.4	25.4 ± 0.2
"	0.454 ± 0.004	93.6 ± 0.4	27.0 ± 0.2
"	1.020 ± 0.008	198 ± 1	28.6 ± 0.2
"	1.47 ± 0.01	292 ± 2	28.6 ± 0.2
457 ± 4	0.326 ± 0.003	70.0 ± 0.6	34.6 ± 0.2
"	0.454 ± 0.004	93.6 ± 0.4	37.8 ± 0.4
"	1.020 ± 0.008	198 ± 1	42.4 ± 0.4
"	1.47 ± 0.01	290 ± 2	42.4 ± 0.4
821 ± 7	0.326 ± 0.003	69.6 ± 0.4	56.0 ± 0.4
"	0.454 ± 0.004	93.6 ± 0.4	63.6 ± 0.4
"	1.020 ± 0.008	198 ± 1	80.8 ± 0.4
"	1.47 ± 0.01	290 ± 2	85.2 ± 0.4

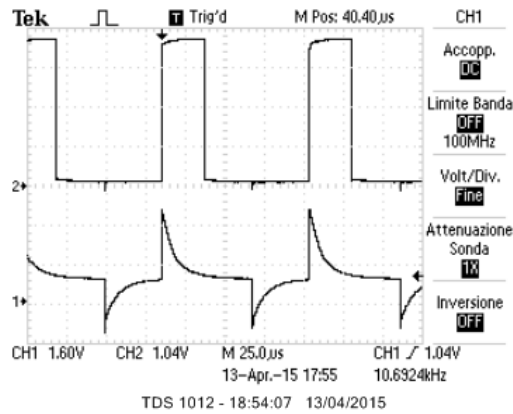


Figura 15: Forma d'onda all'uscita del derivatore (CH1) e forma d'onda all'uscita OUT-M (CH2) con la scelta indicata di R_1 e R_2 .