

Es04B: Amplificatore operazionale, circuiti lineari

Gruppo 1G.BM

Gabriele Astorino, Stefano Romboni, Matteo Morresi

18 Novembre 2021

Indice

1	Amplificatore di carica	1
1.1	Verifica iniezione di carica	2
1.2	Montaggio circuito discriminatore	3
1.2.1	Piccola considerazione sul valore di V_{thr}	3
1.3	Caratterizzazione del circuito del circuito	4
1.4	Confronto dei dati con i risultati attesi	4
1.5	Alcune considerazioni sulle misure	5
1.6	Best-fit dei dati	6
2	Multivibratore astabile	7
2.1	Analisi del circuito	8
2.2	Andamento in funzione del tempo	8
2.3	Periodo e duty cycle	10
2.4	Discussione sulla massima frequenza producibile	11

1 Amplificatore di carica

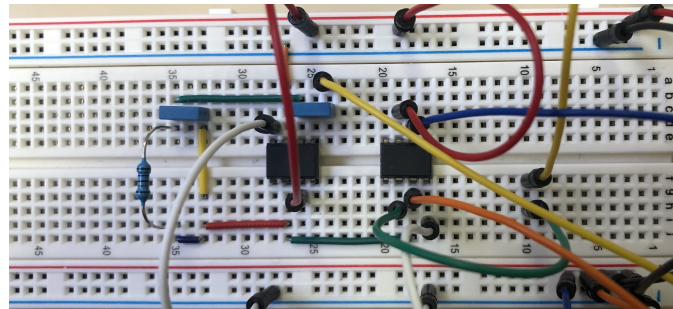


Figura 1: Circuito TOT

Questo circuito è un esempio di circuito utilizzato per registrare la quantità di carica prodotta dal segnale di un rivelatore. Questa carica è generalmente rilasciata in un impulso di tempo breve e di forma variabile. Un metodo utilizzato per registrare segnali di questo tipo è detto “time-over-threshold” (TOT). In pratica viene trasformato il segnale in carica prodotto dal rivelatore in un segnale in tensione di forma fissa e, per misurare l’ampiezza, si misura il lasso di tempo in cui il segnale rimane al di sopra di una soglia prefissata. Un circuito TOT è costituito da tre blocchi di base (per lo schema circuitale si rimanda a ??):

- circuito di iniezione di carica che simula il segnale generato da un rivelatore;
- un circuito formatore (shaper) che converte la carica in un segnale in tensione di forma fissa;

- un discriminatore che confronta il segnale con una soglia prefissata e produce un impulso proporzionale al tempo in cui il segnale è sopra la soglia.

Si riportano inizialmente i valori dei componenti circuitali misurati con multimetro digitale per ciascun circuito (ad eccezione del condensatore da 1 [nF]).

- **Circuito 1:** $C_T = C_F = (1 \pm 5\%) \text{ [nF]}$, $R_1 = (100.5 \pm 0.8) \text{ [k}\Omega\text{]}$;
- **Circuito 2:** $C_T = C_F = (1 \pm 5\%) \text{ [nF]}$, $R_1 = (99.9 \pm 0.8) \text{ [k}\Omega\text{]}$;
- **Circuito 3:** $C_T = C_F = (1 \pm 5\%) \text{ [nF]}$, $R_1 = (99.6 \pm 0.8) \text{ [k}\Omega\text{]}$;

1.1 Verifica iniezione di carica

Come prima cosa vengono montati i primi due blocchi del circuito TOT, ovvero il "rivelatore di carica" e il "formatore". Essendo il circuito sufficientemente complesso da analizzarlo nella sua interezza, si procede a verificare il corretto funzionamento delle prime due parti. Per fare ciò, viene inviata in ingresso un'onda quadra di frequenza 100 [Hz] e ampiezza picco-picco $V_{pp} = 2 \text{ [V]}$ (nominale da settaggio Wavegen), con l'intento di simulare una rivelazione di carica $Q = C_T V_s$ (si noti come V_s è da intendere picco-picco). Tramite l'utilizzo dell'oscilloscopio si verifica dunque che il segnale di tensione uscente dal formatore abbia la forma attesa, ovvero uno "spike" verso l'alto e poi una caduta esponenziale.

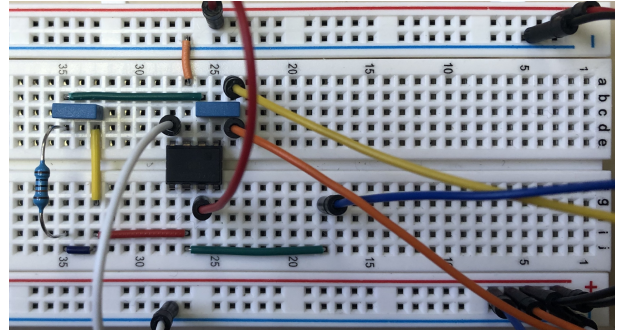


Figura 2: Circuito rivelatore + formatore

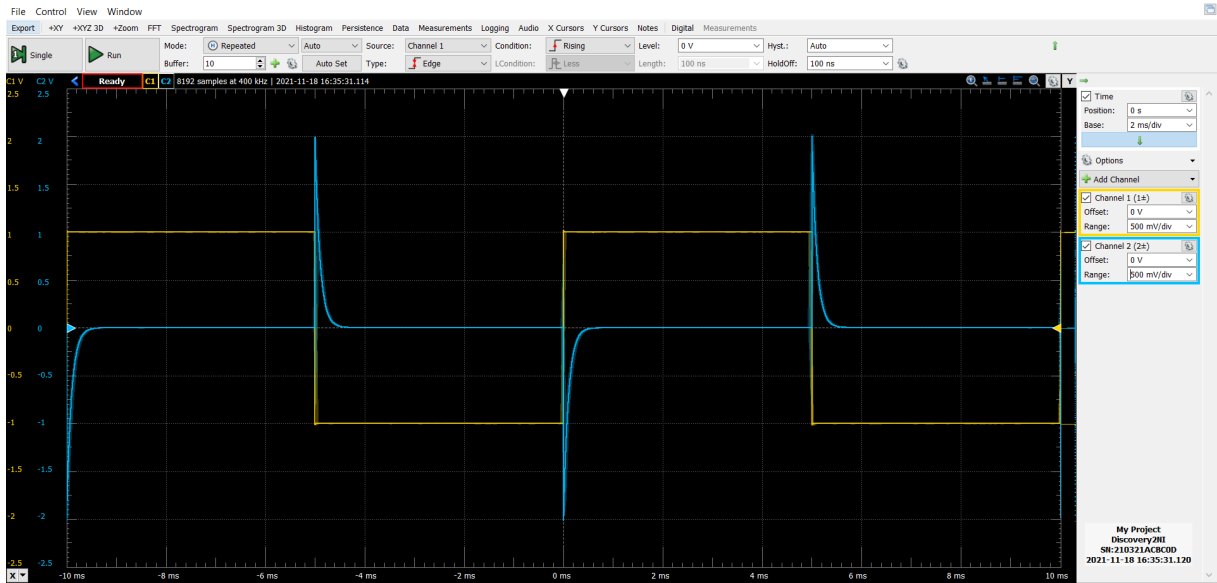


Figura 3: Immagine dell'oscilloscopio dell'iniezione di carica visualizzata mediante il canale 1 (giallo) per l'onda quadra in ingresso ed il canale 2 (blu) per l'uscita.

1.2 Montaggio circuito discriminatore

Si procede con il montaggio del terzo blocco del circuito, il discriminatore, che verrà collegato poi in serie con i primi due blocchi. In sostanza si collega l'uscita dell'OpAmp del circuito formatore all'ingresso di tensione V_+ del secondo OpAmp, quello del discriminatore. All'ingresso V_- viene invece collegato il generatore di tensione $W2$ dell'AD impostato per inviare una tensione in DC di 60 [mV] (nominali).

1.2.1 Piccola considerazione sul valore di V_{thr}

Si è impostato su Wavegen2 il valore di tensione in DC su 60 [mV]. In seguito è stata fatta un acquisizione tramite oscilloscopio del segnale per verificare che fosse effettivamente quanto voluto. Così facendo però ci siamo accorti che il suo valore si attestava a circa 73 [mV] invece che quanto dichiarato da settaggio. Abbiamo eseguito anche un best-fit dei dati con una costante per quantificare in maniera opportuna la misura poichè determinante per le considerazioni successive. Seguono i risultati di best-fit. Per gli errori è stato passato solamente quello statistico riferito alla misurazione di tensione pari allo 0.5%rdg (l'errore sull'asse dei tempi è stato trascurato in quanto trascurabile e non influente sul tipo di fit svolto). Si è poi sommato in quadratura all'errore trovato sulla tensione gli 0.3 [mV] dovuti al fondo scala.

Best-fit segnale di uscita

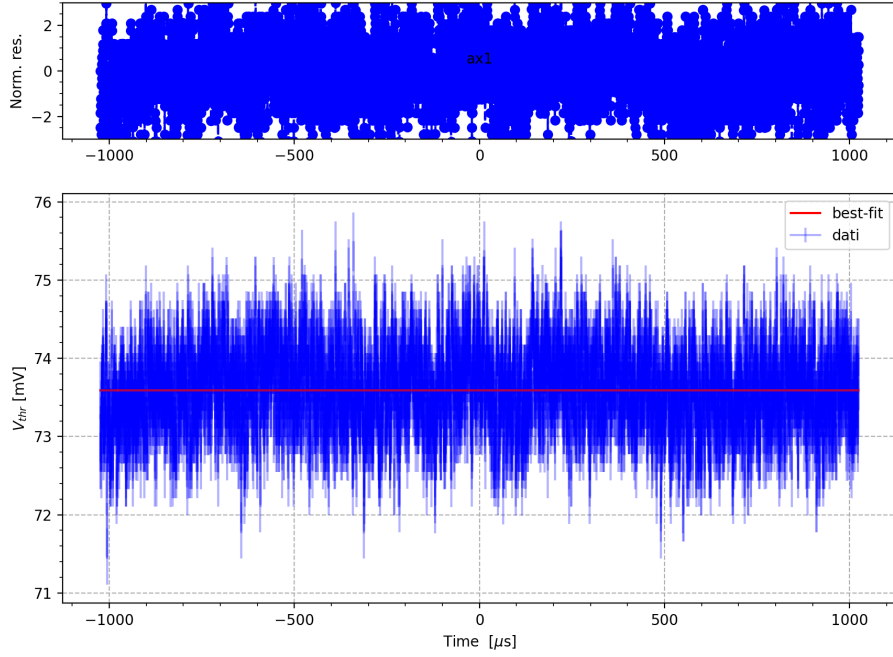


Figura 4: Best-fit segnale V_{thr}

Risultati di best-fit	
χ^2/ndof	$a \equiv V_{thr} \text{ [mV]}$
14664/8192	73.6 ± 0.3

Tabella 1: Dati **circuito 2**

1.3 Caratterizzazione del circuito del circuito

Per quanto riguarda il segnale di uscita dai primi due blocchi, V_{sh} , possiamo considerare il circuito come un amplificatore con impedenze complesse (avendo considerato l'OpAmp come ideale e l'uscita lineare). Siamo dunque in condizioni di corto virtuale: $V_- = V_+ = 0$. Abbiamo quindi la seguente relazione:

$$\frac{V_s - V_-}{Z_1} = \frac{V_- - V_{sh}}{Z_2} \Rightarrow \frac{V_{sh}}{V_s} = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

$$\Rightarrow V_{sh} = -\frac{C_T}{C_F} V_s = -\frac{C_T}{C_F} \frac{Q}{C_T} e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{Q}{C_F} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

con $\tau = R_F C_F$

(* essendo V_s uguale alla carica rivelata e quindi accumulata sul condensatore).

In serie a questi due circuiti abbiamo invece un discriminatore. L'ingresso negativo dell'OpAmp non è collegato a terra ma ad una tensione di soglia indicata con V_{thr} , posta pari a 60 [mV] (nominali, vedere 1.2.1). L'uscita V_{out} è invece determinata dalla seguente relazione:

$$V_{out} = \begin{cases} V_{OH} & V_d > 0 \quad \Leftrightarrow \quad V_s > V_{thr} \\ V_{OL} & V_d < 0 \quad \Leftrightarrow \quad V_s < V_{thr} \end{cases}$$

1.4 Confronto dei dati con i risultati attesi

Riportiamo nella tabella di seguito la misura della durata dell'impulso in uscita per un singolo valore di carica iniettata Q_{in} :

	Carica [nC]	Tempo [μs]
Circuito 1	2.0 ± 0.1	339 ± 2
Circuito 2	2.0 ± 0.1	349 ± 2
Circuito 3	2.0 ± 0.1	318 ± 2

La misura del tempo è stata presa utilizzando i cursori di Wavegen e associando alla misura l'errore massimo. Il cursore è stato posizionato nel punto in cui l'onda quadra inizia a scendere, che corrisponde al momento in cui la tensione V_{sh} scende sotto il valore di V_{thr} (5).

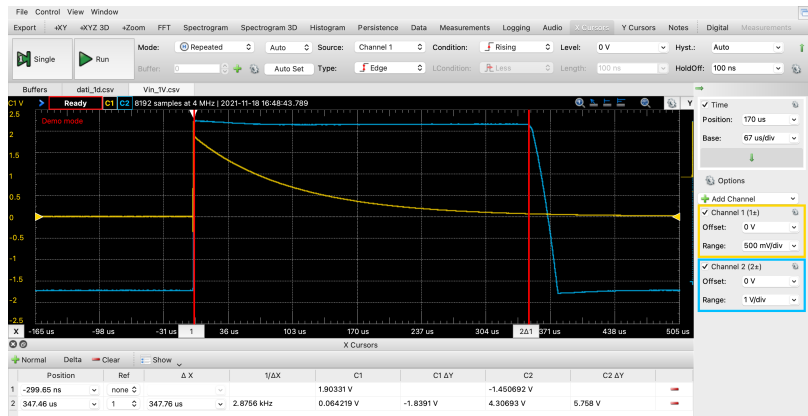


Figura 5: misurazione durata impulso temporale

1.5 Alcune considerazioni sulle misure

Per quanto riguarda la misura della durata temporale dell'impulso si è scelto di prendere il tempo tra il punto in cui il segnale di tensione saliva (in maniera piuttosto rapida) e il punto in cui il segnale iniziava a scendere. La discesa poco rapida del segnale, e quindi la formazione di un profilo simile ad un parallelepipedo piuttosto che di forma rettangolare è dovuto all'OpAmp. Infatti, nonostante nella nostra trattazione si sia potuto considerare ideale, e quindi tale per cui $A_d = \infty$, in questo caso questa approssimazione non può più essere considerata valida. Ovvero, la presenza di una discesa non "verticale" (sempre nei limiti della risposta dell'OpAmp data dallo slewrate) è dovuta al fatto che quando il segnale di shape, V_{sh} , raggiunge valori vicini a quelli della tensione di threshold, V_{thr} , abbiamo che la tensione di modo differenziale, V_d , diventa molto piccola, spostando il punto di lavoro del circuito nella zona lineare. Questo comporta una fase temporale in cui il guadagno del circuito diminuisce "gradualmente" fino ad uscire di nuovo dalla zona lineare e andare in saturazione "negativa".

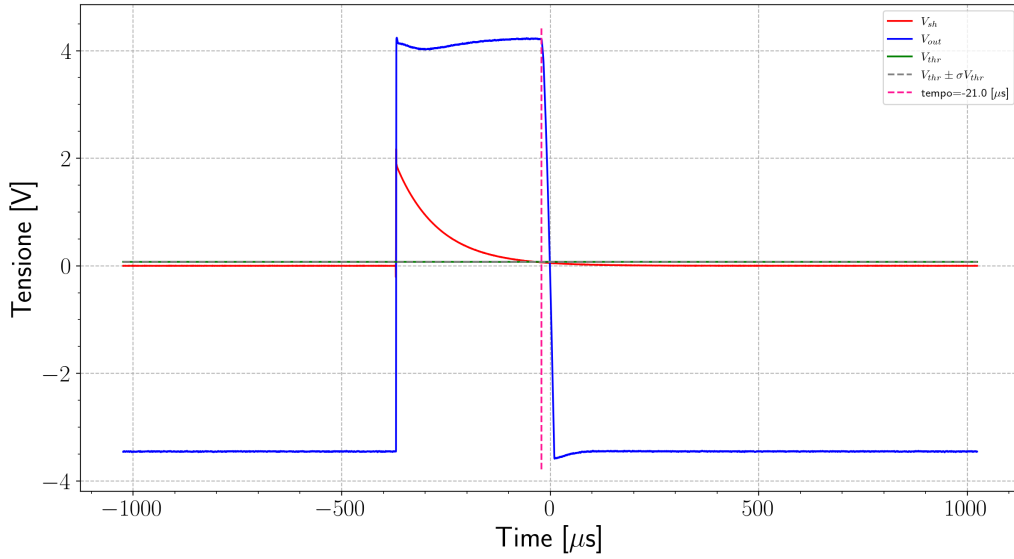


Figura 6: Risposta circuito TOT

Un'ulteriore considerazione riguarda il punto di intersezione del segnale V_{sh} con il segnale V_{thr} come si vede dalla figura 6. Secondo le considerazioni fatte questo punto di intersezione dovrebbe essere temporalmente coincidente con il punto in cui l'onda quadra inizia a scendere, evidenziato dalla retta color rosso sempre in figura 7. Si nota però una differenza temporale di circa $15[\mu s]$. Questo ritardo è dovuto in parte al fatto che i segnali a cui ci stiamo riferendo sono stati presi a "monte" rispetto all'OpAmp, mentre per avere una misura consistente dell'intervallo temporale occorre sempre fare riferimento ad un solo segnale, evitando dunque possibili errori di scala nella misurazione (il segnale così come risulta in ritardo alla fine è in ritardo anche all'inizio annullando questo effetto quando viene presa la differenza).

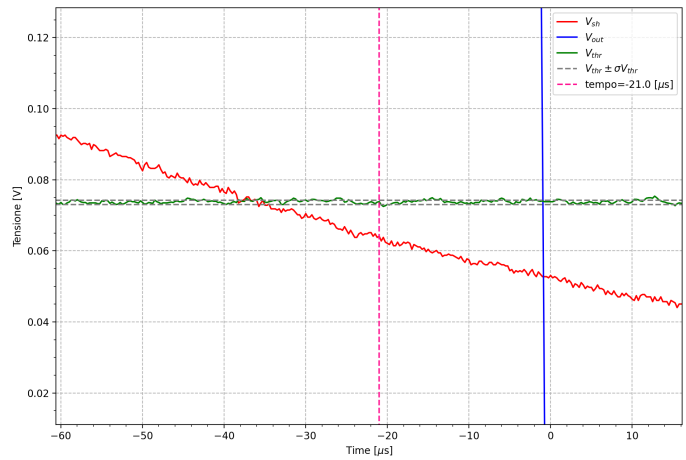


Figura 7: Zoom zona di intersezione

1.6 Best-fit dei dati

Per il solo **circuito 2** sono state eseguite diverse misurazioni della durata dell'impulso del segnale in uscita al variare dell'ampiezza del segnale di ingresso, e quindi della carica Q_{in} . Per quanto riguarda la durata dell'impulso in uscita ci aspettiamo che sia

$$\Delta T = \tau_F \ln \frac{Q}{V_{\text{thr}} C_F}$$

in quanto il segnale, seguendo una legge esponenziale, si annulla nel momento in cui raggiunge il valore di V_{thr} , ovvero:

$$\frac{Q}{C_F} e^{-\frac{\bar{t}}{\tau_F}} = V_{\text{thr}},$$

da cui poi segue che $\Delta T = \bar{t} - t_0$, con $t_0 = 0$.

Tensione di ingresso [V]	Carica* $\pm 5\%$ [nC]	Tempo ΔT [μs]
1.0	2.0 ± 0.1	349 ± 2
0.9	1.80 ± 0.09	339 ± 2
0.7	1.40 ± 0.07	311 ± 2
0.6	1.20 ± 0.06	296 ± 2
0.5	1.00 ± 0.05	276 ± 2
0.4	0.80 ± 0.04	252 ± 2
0.3	0.60 ± 0.03	223 ± 3
0.2	0.40 ± 0.02	181 ± 3
0.1	0.20 ± 0.01	110 ± 4
0.08	0.160 ± 0.008	84 ± 5
0.06	0.120 ± 0.006	56 ± 10

Tabella 2: Dati **circuito 2**

(* il valore della carica è $Q = V_S C_F$, dove V_S si intende la tensione picco-picco di ingresso). Per quanto riguarda le incertezze riportate in tabella, per la tensione si è assunto solamente il valore nominale in quanto nel calcolo della carica il suo errore percentuale era sufficientemente minore di quello del condensatore. Abbiamo eseguito un best-fit utilizzando come funzione modello:

$$f(x, a, b) = a \ln \frac{x}{b},$$

dove a, b sono i due parametri di best-fit, ovvero il tempo di scarica τ_F e il prodotto $V_{\text{thr}} \times C_F$. Come errori abbiamo utilizzato gli errori efficaci, in cui era prevalente quello dovuto alla misura della carica, essendo condizionato dall'elevata incertezza con cui conosciamo il valore della capacità del condensatore C_F (5% del valore nominale).

Risultati di best-fit		
χ^2/ndof	$a \equiv \tau_F$ [μs]	$b \equiv V_{\text{thr}} C_F$ [pC]
1/9	104.6 \pm 0.4	71.1 \pm 0.8

Tabella 3: Dati **circuito 2**

Notiamo che il χ^2 risulta molto piccolo rispetto ai gradi di libertà del fit. Ciò è dovuto all'elevata incertezza associata alle misure a causa sempre del condensatore C_F . Per quanto riguarda invece il valore dei parametri ci aspettavamo di avere:

$$\tau_{F, \text{att}} = R_F C_F = 99.9 \pm 5, \quad [\mu\text{s}] \quad V_{\text{thr}} C_F = 74 \pm 4 \quad [\text{pC}],$$

che risultano compatibili con quelli trovati tramite fit.

La tensione di ingresso non è stata fatta diminuire ulteriormente poichè il circuito non l'avrebbe rivelata. Avvicinandoci troppo al valore limite imposto dalla V_{thr} infatti si aveva un'onda quadra fortemente distorta e rimpicciolita. Una volta scesi sotto la tensione di soglia non si aveva praticamente più alcuna rivelazione del segnale, rimanendo la tensione di uscita fissa al valore di V_{OL} (9).

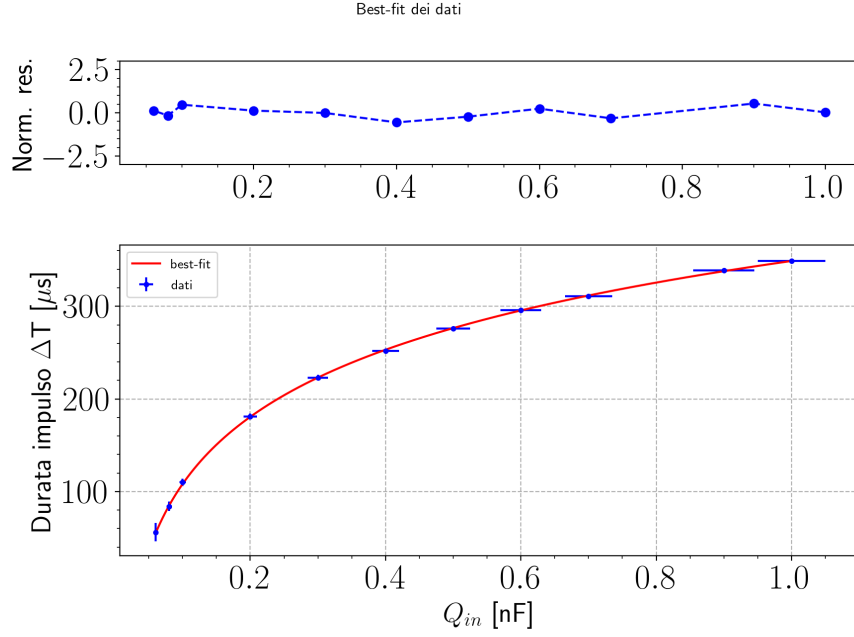


Figura 8: Best-fit durata impulso carica Q_{in}

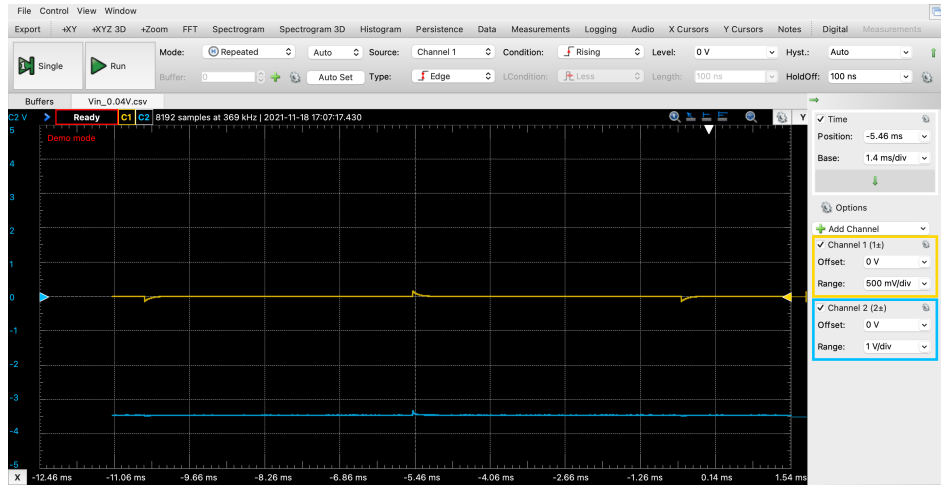


Figura 9: $V_s = 80$ [mV] picco-picco. Siamo praticamente in assenza di segnale. Si rivela solo un piccolo

2 Multivibratore astabile

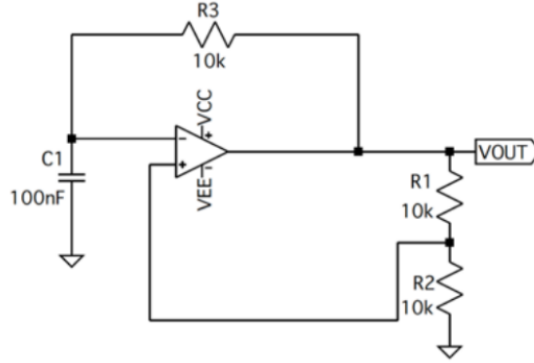
Anche in questa sezione si riportano inizialmente i valori dei componenti circuitali misurati mediante tester digitale.

Circuito 1: $C_1 = (93 \pm 4)$ [nF], $R_1 = (9.98 \pm 0.08)$ [kΩ], $R_2 = (9.92 \pm 0.08)$ [kΩ], $R_3 = (9.95 \pm 0.08)$ [kΩ];

Circuito 2: $C_1 = (96 \pm 4)$ [nF], $R_1 = (9.95 \pm 0.08)$ [kΩ], $R_2 = (9.97 \pm 0.08)$ [kΩ], $R_3 = (9.97 \pm 0.08)$ [kΩ];

Circuito 3: $C_1 = (97 \pm 4)$ [nF], $R_1 = (9.91 \pm 0.08)$ [kΩ], $R_2 = (9.95 \pm 0.08)$ [kΩ], $R_3 = (9.97 \pm 0.08)$ [kΩ].

2.1 Analisi del circuito



Il circuito multivibratore astabile impiegato si ottiene collegando ingresso e uscita di un trigger di Schmitt invertente a rispettivamente uscita e ingresso di un filtro passa basso RC. Non c'è un segnale in ingresso al circuito e il segnale V_{OUT} oscilla periodicamente tra gli stati di saturazione positiva e negativa $V_{OUT} = V_{OH}$ e $V_{OUT} = V_{OL}$.

Determiniamo quindi ora le espressioni di T_+ e T_- , tempi di permanenza di V_{OUT} negli stati di saturazione positiva e negativa, e di conseguenza il suo periodo T . Nell'approssimazione di resistenza d'ingresso dell'amplificatore operazionale infinita possiamo scrivere l'equazione differenziale che regola l'andamento della tensione ai capi del condensatore C_1 :

$$V_{OUT} = \tau \frac{dV_-}{dt} + V_-$$

con $\tau = R_3 C_1$. Risolvendo con le appropriate condizioni iniziali si ottiene:

$$\beta V_{OH} = V_{OH} + (\beta V_{OL} - V_{OH}) \exp(-T_+/\tau)$$

con $\beta = R_2/(R_1 + R_2)$. Esplicitando T_+ :

$$T_+ = \tau \ln \frac{1 - \beta \frac{V_{OL}}{V_{OH}}}{1 - \beta}$$

Analogamente aggiustando le condizioni iniziali si ottiene:

$$T_- = \tau \ln \frac{1 - \beta \frac{V_{OH}}{V_{OL}}}{1 - \beta}$$

Si ha quindi in uscita dal circuito multivibratore astabile un'onda quadra di periodo $T = T_+ + T_-$ e duty cycle pari a T_+/T . Se $V_{OH} = V_{OL}$, come ci si aspetta per tensioni di alimentazione simmetriche, si ottiene $T_+ = T_-$ e allora si ha un'onda con duty cycle del 50%.

2.2 Andamento in funzione del tempo

Riportiamo inizialmente le immagini relative alla visualizzazione su oscilloscopio del Circuito 1, con al canale 2 (in blu) l'onda quadra generata dal circuito astabile V_{OUT} ed al canale 1 (in giallo) i segnali V_+ e V_- .

Riportiamo ora i valori misurati di V_{OUT} , V_- e V_+ per le quali è stata misurata mediante cursori l'ampiezza picco picco associando come incertezza di misura lo 0.5 % della misura.

Per quanto riguarda la misura di $V_{OUT,pp}$, causa le deformazioni presenti sui valori massimi e minimi dell'onda quadra che non è quindi perfetta, si è scelto di misurarla posizionando i cursori a circa metà dell'onda quadra come si riporta nella Figura 14.

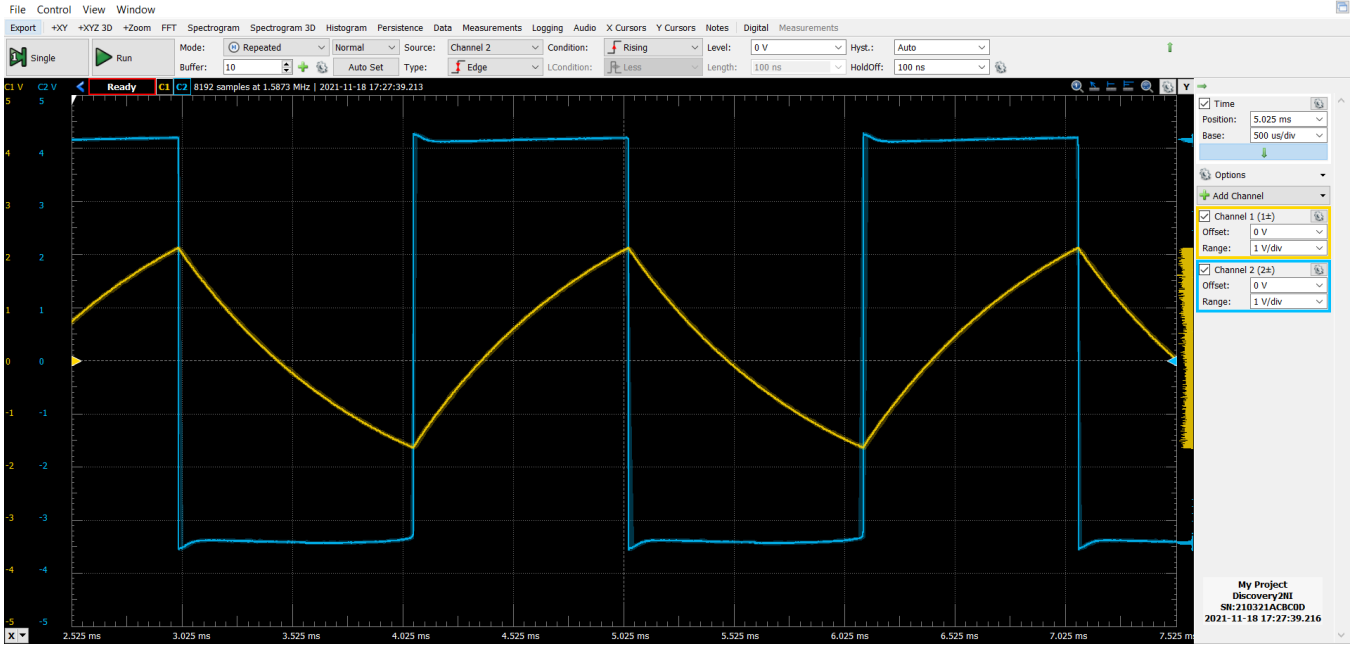


Figura 10: Visualizzazione di V_{OUT} e V_- .

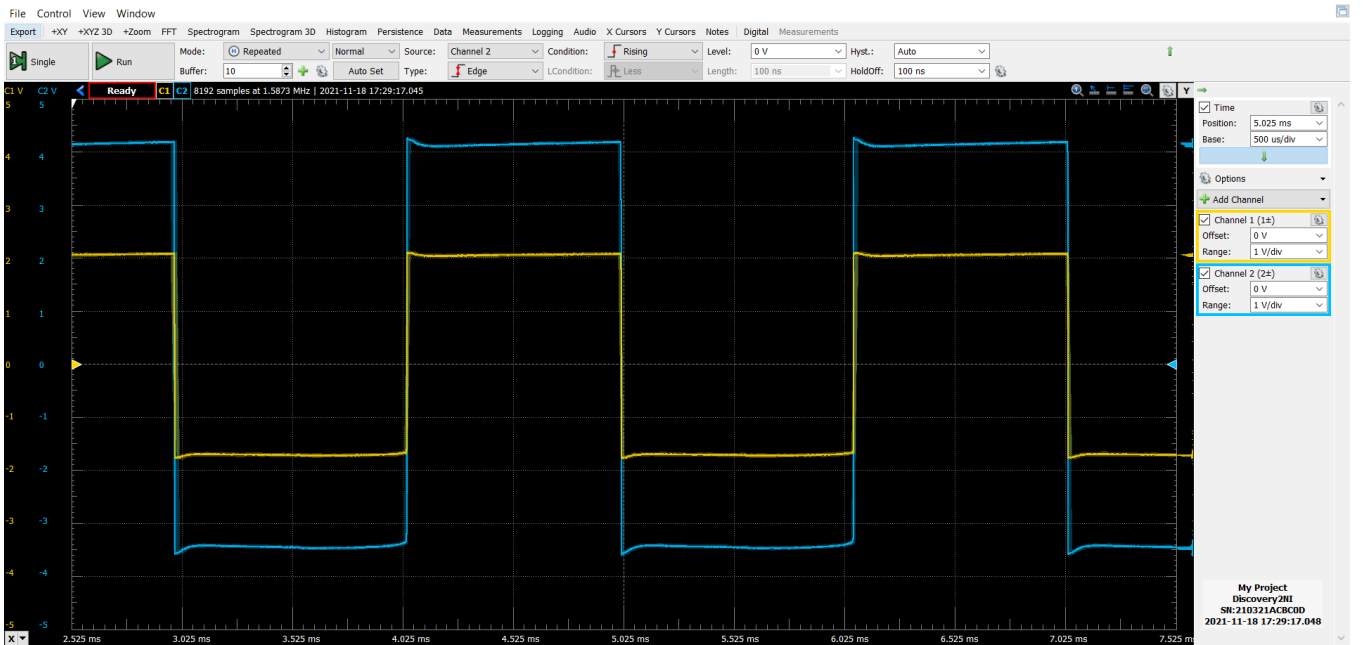


Figura 11: Visualizzazione di V_{OUT} e V_+ .

Circuito 1: $V_{OUT,pp} = (7.58 \pm 0.04) [V]$, $V_{-,pp} = (3.77 \pm 0.02) [V]$ e $V_{+,pp} = (3.76 \pm 0.02) [V]$;

Circuito 2: $V_{OUT,pp} = (7.75 \pm 0.05) [V]$, $V_{-,pp} = (3.87 \pm 0.02) [V]$ e $V_{+,pp} = (3.84 \pm 0.02) [V]$;

Circuito 3: $V_{OUT,pp} = (7.52 \pm 0.04) [V]$, $V_{-,pp} = (3.77 \pm 0.02) [V]$ e $V_{+,pp} = (3.76 \pm 0.02) [V]$.

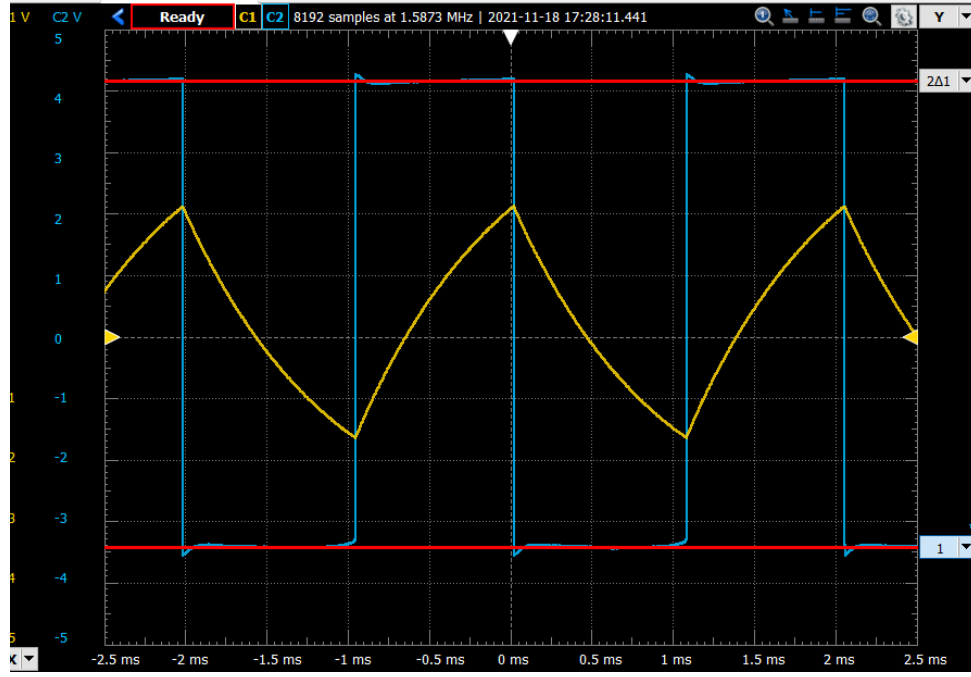


Figura 12: Esempio di misura per $V_{OUT,pp}$.

Come atteso dall'analisi del circuito si ha che: V_{OUT} è un'onda quadra che oscilla tra le tensioni di saturazione positiva V_{OH} e negativa V_{OL} ; V_- ha una forma d'onda a "pinna di squalo" dovuta alle fasi di carica e scarica del condensatore C_1 , che è compresa nel range definito dalle due tensioni di soglia positiva $V_{TH} = \beta V_{OH}$ e negativa $V_{TL} = \beta V_{OL}$; infine V_+ è un'onda quadra ottenuta a partire da V_{OUT} tramite il partitore di tensione costituito dalle resistenze R_1 e R_2 . Si hanno però anche alcune discrepanze rispetto a quanto atteso. I valori delle tensioni V_{OH} e V_{OL} sono minori (in modulo) delle tensioni di alimentazione V_{CC} e V_{EE} , indicando la presenza di una caduta di potenziale all'interno del amplificatore operazionale. Si ha inoltre che $|V_{OH}| > |V_{OL}|$, in quanto dalle misure si ottiene (usando le misure del circuito 3): $V_{OH} = (4.11 \pm 0.02)$ [V] e $V_{OL} = (-3.42 \pm 0.02)$ [V]. Questo porta poi anche ad duty cycle diverso da quello atteso, come discusso nel punto 2.4. Per quanto riguarda le tensioni di soglia positiva V_{TH} e negativa V_{TL} , le misure sono compatibili con i valori attesi dal modello sulla base della misura di V_{OH} e V_{OL} . Infatti $V_{TH,atteso} = (2.05 \pm 0.01)$ [V] e $V_{TL,atteso} = (-1.71 \pm 0.01)$ [V], avendo preso $\beta = 0.5$. Mentre misurando i valori massimi e minimi raggiunti da V_- si è ottenuto (sempre usando le acquisizioni del circuito 3): $V_{TH,misurato} = 2.07 \pm 0.02$ [V] $V_{TL,misurato} = -1.71 \pm 0.02$ [V].

2.3 Periodo e duty cycle

Questa asimmetria si traduce in un duty cycle leggermente minore del 50%, che era quanto ci si aspettava sulla base delle tensioni di alimentazione impiegate

Per misurare il periodo ed il duty cycle, per tutti i circuiti, si è misurato mediante cursori il periodo dell'onda quadra a partire da tre passaggi dallo zero successivi così da misurare due intervalli temporali dai quali si ottiene il periodo sommandoli tra loro ed il duty cycle facendo il rapporto tra l'intervallo temporale della durata della semi onda positiva con il periodo. Alla misura mediante cursori si è associato come incertezza di misura, l'errore di lettura dovuto al loro utilizzo in quanto preponderante rispetto a quello dovuto all'oscilloscopio.

Circuito 1: $T = (2.020 \pm 0.007)$ [ms], duty cycle = $(48.2 \pm 0.3)\%$

Circuito 2: $T = (2.104 \pm 0.006)$ [ms], duty cycle = $(48.3 \pm 0.3)\%$

Circuito 3: $T = (2.131 \pm 0.006) \text{ [ms]}$, duty cycle = $(48.1 \pm 0.3)\%$

Il periodo e gli intervalli temporali T_+ e T_- attesi possono essere calcolati con le espressioni ricavate nel punto 2.1. Utilizzando i valori nominali di C_1 , R_3 e β , e le misure di V_{OH} V_{OH} del punto 2.3 si ottiene:

Circuito 1: $T_{atteso} = (2.04 \pm 0.02) \text{ [ms]}$, duty cycle = $(46.8 \pm 0.6)\%$

Circuito 2: $T_{atteso} = (2.11 \pm 0.02) \text{ [ms]}$, duty cycle = $(46.8 \pm 0.6)\%$

Circuito 3: $T_{atteso} = (2.13 \pm 0.02) \text{ [ms]}$, duty cycle = $(46.8 \pm 0.6)\%$

2.4 Discussione sulla massima frequenza producibile

La frequenza dell'onda quadra dipende dai parametri circuitali utilizzati e (idealmente) può essere elevata a piacere. Il fatto che risulti limitata superiormente potrebbe però essere dovuto al fatto che, essendo l'OpAmp non ideale e con slew rate finito a 13 [V/\mu s] (come da datasheet), aumentando la frequenza diminuendo i valori dei parametri circuitali R_3 , C_1 , la risposta dell'amplificatore operazionale non sia abbastanza veloce: lo slew rate finito comporta che una volta superato il valore massimo f_{max} , la commutazione tra V_{OH} e V_{OL} di V_{OUT} diventi troppo lenta e la forma d'onda visualizzata diventi via via (al crescere di f) sempre più triangolare. Utilizzando infatti $C_1 = 1 \text{ [nF]}$ e $R_3 = 10 \text{ [k}\Omega\text{]}$ (nominali) si ha una frequenza misurata con i cursori pari a $f_1 = 37.8 \text{ [kHz]}$ (nominali in quanto si riportano risultati qualitativi).

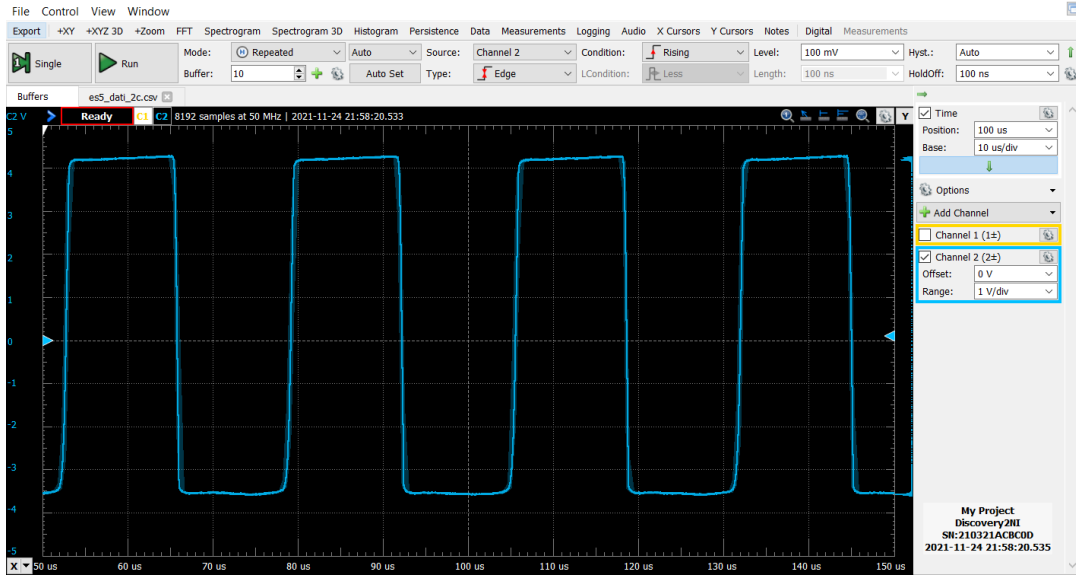


Figura 13: V_{OUT} con $C_1 = 1 \text{ [nF]}$ e $R_3 = 10 \text{ [k}\Omega\text{]}$.

Si nota come in questo caso l'onda sia leggermente deformata, con i fronti di salita e di discesa leggermente inclinati verso destra: il valore massimo della frequenza quindi sia minore circa di f_1 .

Sostituendo infatti la resistenza R_3 con una da $1 \text{ [k}\Omega\text{]}$ nominale, si ha $f_2 = 220 \text{ [kHz]}$.

In questo caso si nota, come anticipato, che la forma d'onda in uscita sia molto deformata con i fronti di salita e di discesa sempre più tendenti ad unirsi (come accadrebbe con una forma triangolare).

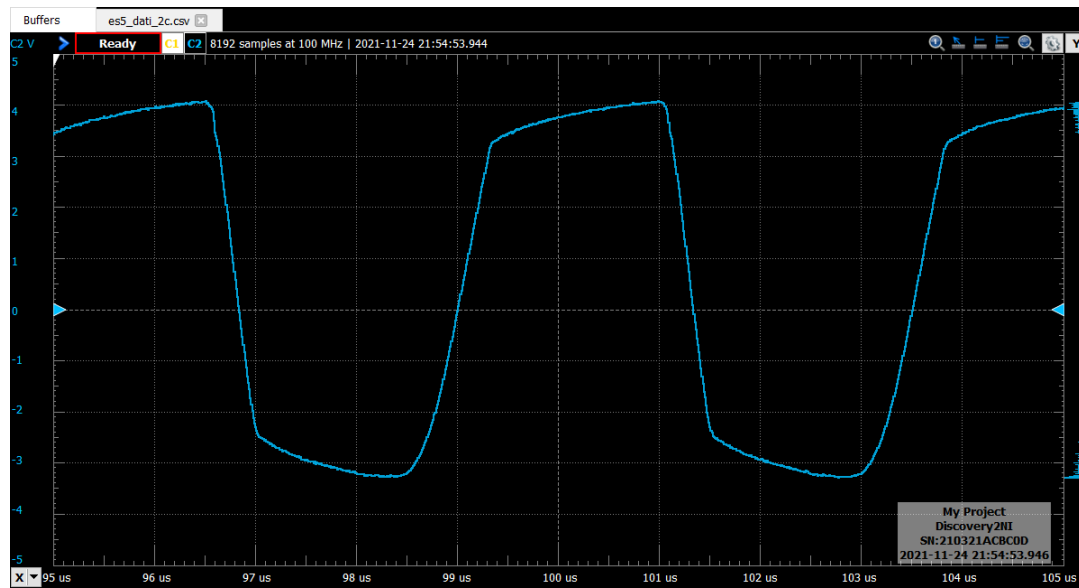


Figura 14: V_{OUT} con $C_1 = 1$ [nF] e $R_3 = 1$ [k Ω].

Dichiarazione

I firmatari di questa relazione dichiarano che il contenuto della relazione è originale, con misure effettuate dai membri del gruppo, e che tutti i firmatari hanno contribuito alla elaborazione della relazione stessa.