

# Esperienza di laboratorio

## Generatori di segnale basati su operazionali

Gruppo A6  
Giacomo Calabria - 2007964  
Daniele Venturini - 1195858

17 March 2023

### Contents

<b>1</b>	<b>Primo esperimento</b>	<b>3</b>
1.1	Definizione dei valori di $R_1 = R_2$ . . . . .	3
1.2	Assemblaggi e settaggi . . . . .	4
1.3	Risultati . . . . .	5
1.4	Risultati in configurazione Zener back-to-back . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Secondo esperimento</b>	<b>7</b>
2.1	PRELAB . . . . .	7
2.2	Risultati . . . . .	8
2.3	Generatore onda sinusoidale . . . . .	9
2.3.1	Scelta dei valori di $R_3$ e $R_4$ - prelab . . . . .	9
2.3.2	Risultati . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Multivibratore astabile basato su BJT</b>	<b>11</b>
3.1	Risultati . . . . .	12
3.2	Funzionamento del circuito . . . . .	13
3.3	Periodo della forma d'onda . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Oscillatore a rilassamento</b>	<b>15</b>
4.1	Descrizione del funzionamento del circuito . . . . .	15
4.2	Dimensionamento del circuito . . . . .	16
4.3	Risultati . . . . .	16
4.4	Elaborazione dati con MATLAB® . . . . .	18

## INTRODUZIONE

Lo scopo dell'esperienza di laboratorio è progettare e realizzare un generatore di forme d'onda basato su amplificatori operazionali e quindi studiarne il funzionamento e il dimensionamento.

### Strumentazione necessaria:

- Generatore di forma d'onda arbitraria
- Oscilloscopio a 2 canali
- Alimentatore da banco
- 1 connettore BNC a "T"
- 2 connettore BNC maschio/banana femmina
- 1 connettore BNC femmina-femmina
- 1 cavo BNC
- Cavo 1 mm
- Spellafili

### Componenti specifici utilizzati:

- 2 amplificatori operazionali a doppia uscita, codice TL082CP
- Diodi Zener 4.3V, codice 1N5229BTR
- Resistenze con valore da determinare
- Condensatori da  $100nF$ ,  $220nF$ ,  $1\mu F$  in dotazione

## 1 Primo esperimento

In questo primo esperimento si vuole valutare la caratteristica di trasferimento del circuito bistabile mostrato in Figura 1. In cui il segnale  $v_i$  è applicato mediante il generatore di funzione e l'uscita  $v_o$  è connessa all'oscilloscopio.

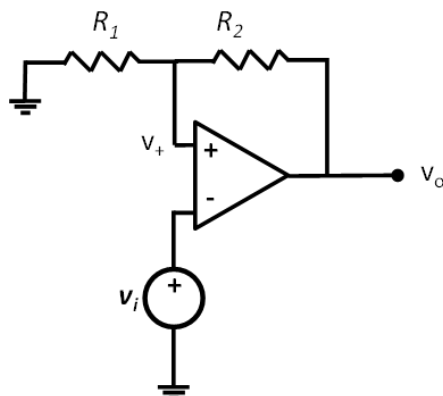


Figure 1: Schema circuito

Il circuito è alimentato dalla tensione duale:  $\pm V_{CC} = \pm 10V$ . L'integrato TL082 contiene due amplificatori operazionali e i pinout dell'integrato sono stati ricavati dal datasheet e sono riportati in Figura 2

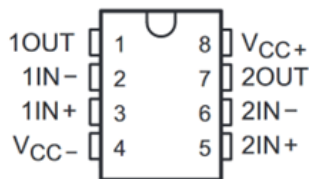


Figure 2: Pinout dell'integrato TL082

### 1.1 Definizione dei valori di $R_1 = R_2$

Tenendo conto delle resistenze di ingresso e uscita dell'integrato; si è scelto il seguente valore per le resistenze della rete di retroazione positiva

$$R_1 = R_2 = 10k\Omega$$

Con tali valori si prevedono le seguenti soglie per il circuito bistabile

$V_{TH} =$	4,5V
$V_{TL} =$	-4,5V

I valori delle soglie sono stati calcolati sulla base della relazione

$$V_{TH} = L_+ \beta, \quad V_{TL} = L_- \beta, \quad \text{con } \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

In cui  $L_+$  e  $L_-$  sono stati ricavati dal datasheet, applicando sempre una proporzione con l'alimentazione scelta.

## 1.2 Assemblaggi e settaggi

L'uscita del generatore di segnale è stato collegato mediante il "BNC T" sia al canale 1 dell'oscilloscopio, sia al morsetto invertente dell'amplificatore operazionale. In seguito è stato connesso il canale 2 dell'oscilloscopio all'uscita dell'operazionale, prestando particolare attenzione al raggruppamento delle varie masse. In Figura 3 si può vedere lo schema dei collegamenti

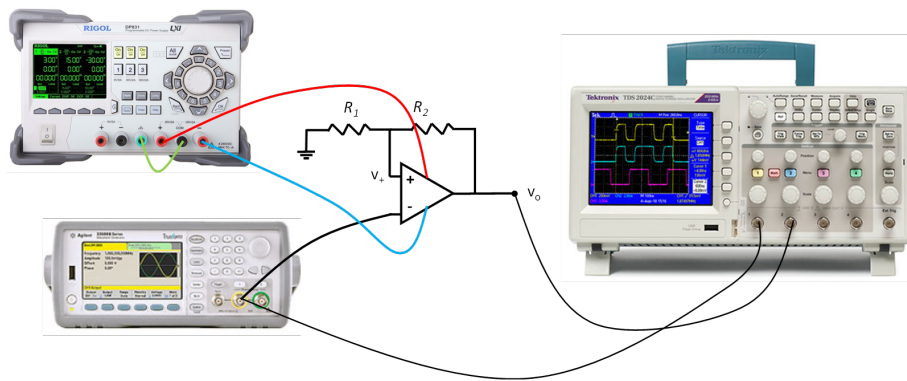


Figure 3: Schema dei collegamenti

Il generatore di funzione è stato impostato in modo da erogare un segnale come segue:

- Forma d'onda: triangolare
- Frequenza: 100Hz
- Ampiezza: 15V picco-picco
- Valor medio nullo
- Simmetria: 50%

### 1.3 Risultati

Si riporta in Figura 4 la schermata prodotta dall'oscilloscopio che visualizza le forme d'onda in ingresso e in uscita all'operazionale

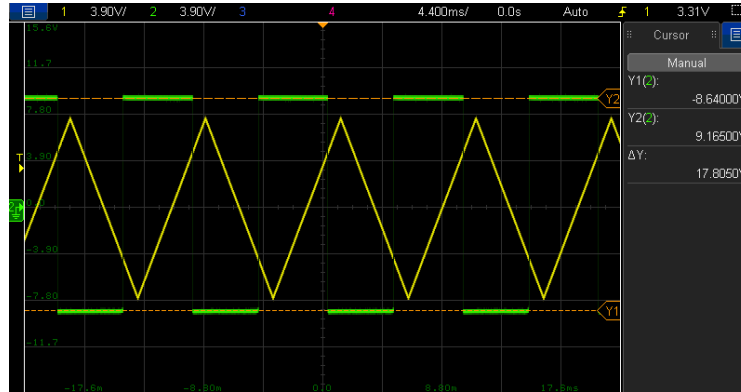


Figure 4: Forme d'onda di ingresso e uscita

Dall'analisi dell'oscilloscopio si ricavano i valori di massimo e minimo della tensione di uscita e le soglie  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  misurate, riportati in Tabella 1.

$L_+ =$	9.165V
$L_- =$	-8.64V
$V_{TH} =$	4.66125V
$V_{TL} =$	-4.224V

Table 1: Misurazioni della tensione di uscita e valori di soglia

La misura delle soglie  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  è stata fatta in modalità **xy**. In Figura 5 è riportata la caratteristica di trasferimento, usando l'oscilloscopio in modalità **xy**

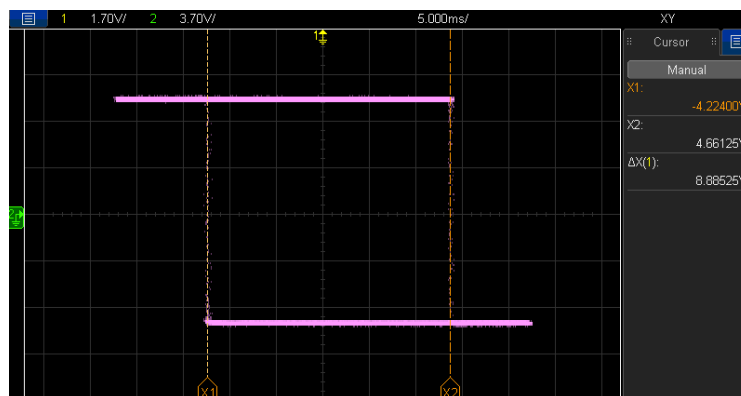


Figure 5: Caratteristica di trasferimento del circuito

### 1.4 Risultati in configurazione Zener back-to-back

Al fine di limitare la corrente sui diodi al valore di  $3mA$ , sono stati collegati due diodi Zener back-to-back all'uscita ed è stata aggiunta una resistenza  $R_3$ . Il circuito è riportato in Figura 6.

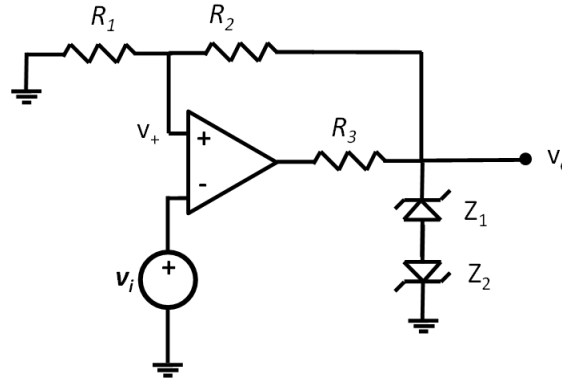


Figure 6: Schema circuito con diodi Zener

Per la resistenza  $R_3$  si è utilizzata la formula  $\frac{L_+ - V_o}{R_3} = 3mA$ , con  $L_+ = V_{Z_1} + V_D$ , che ha fornito il valore  $R_3 = 1.388k\Omega$  arrotondato al valore più vicino disponibile in laboratorio  $R_3 = 1.5k\Omega$ , in questo modo ci si aspetta in uscita la tensione di

$L_+ =$	+5V
$L_- =$	-5V

Infine viene riportata in Figura 7 la caratteristica di trasferimento, catturata utilizzando l'oscilloscopio in modalità **xy**

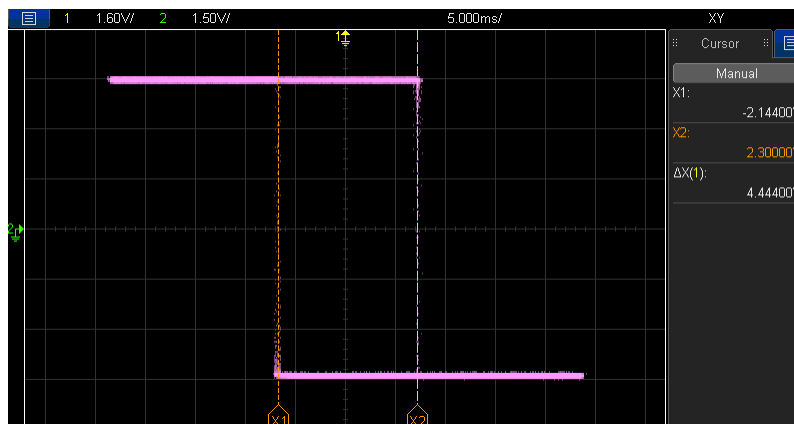


Figure 7: Caratteristica di trasferimento del circuito

## 2 Secondo esperimento

Lo scopo di questa seconda esperienza è realizzare un generatore di onda triangolare, quadra e sinusoidale basato su un multi vibratore astabile, secondo lo schema riportato in Figura 8. Sono stati utilizzati i seguenti componenti:

- Amplificatore operazionale, codice TL082CP
- Resistenze  $R_1 = 10k\Omega$ , da 0.25W
- Resistenze  $R_2 = 39k\Omega$ , da 0.25W
- Resistenza  $R$ , da calcolare
- Condensatore  $C$ , da scegliere tra i disponibili.

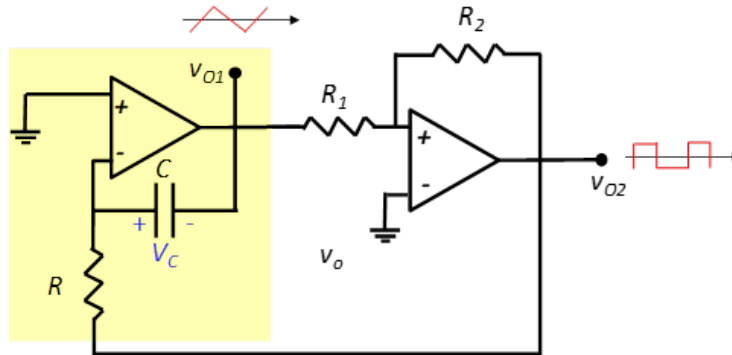


Figure 8: Schema circuito

Il circuito è alimentato dalla tensione duale:  $\pm V_{CC} = \pm 10V$ .

### 2.1 PRELAB

Sono stati determinati i valori delle soglie  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  dalle condizioni operative determinate nel primo esperimento

$V_{TH} =$	$-L_-(R_1/R_2) = 2.2154V$
$V_{TL} =$	$-L_+(R_1/R_2) = -2.35V$

In seguito sono stati scelti i valori di  $R$  e  $C$  in modo da ottenere frequenza di oscillazione pari a  $f = 1kHz \pm 10\%$

$R =$	$10k\Omega$
$C =$	$100nF$

I valori di  $R$  e  $C$  sono stati ottenuti con la seguente formula

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2RC(V_{TH} - V_{TL})}{L_+} \quad (2)$$

## 2.2 Risultati

Si realizza il circuito in Figura 8 connettendo l'oscilloscopio alle uscite  $v_{01}$  e  $v_{02}$  e si accendono le uscite dell'alimentatore  $\pm V_{CC} = \pm 10V$ . L'oscilloscopio è stato impostato in modo tale da visualizzare simultaneamente i segnali  $v_{01}$  e  $v_{02}$ , come è stato riportato in Figura 9.

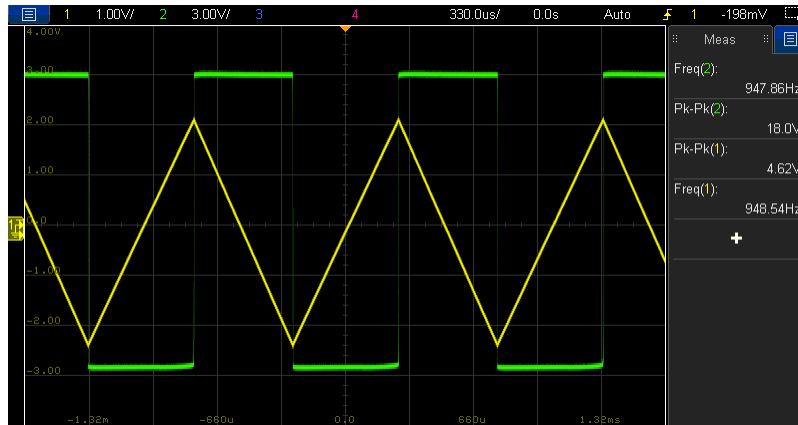


Figure 9: Forme d'onda dei segnali  $v_{01}$  e  $v_{02}$

Successivamente sono state misurati i parametri delle forme d'onda  $v_{01}$  e  $v_{02}$  e riportati in Tabella 2

Segnale	Ampiezza picco-picco	Frequenza
$v_{01}$	$Pk - Pk(1) = 4.47V$	$F(1) = 947.98Hz$
$v_{02}$	$Pk - Pk(2) = 17.58V$	$F(2) = 947.83Hz$

Table 2: Misure delle forme d'onda  $v_{01}$  e  $v_{02}$



### 2.3 Generatore onda sinusoidale

Volendo generare anche un'onda sinusoidale, viene collegato un filtro passa-basso all'uscita  $v_{01}$ , come riportato in Figura 10.

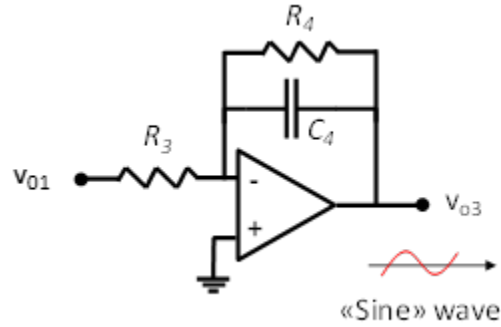


Figure 10: Schema circuito

#### 2.3.1 Scelta dei valori di $R_3$ e $R_4$ - prelab

Sono stati scelti i valori delle resistenze, usando  $C = 100nF$  in modo da ottenere frequenza di taglio pari a  $100Hz$  e guadagno unitario in bassa frequenza

$R_3 =$	$16k\Omega$
$R_4 =$	$16k\Omega$
$C =$	$100nF$

Il dimensionamento delle resistenze del circuito affinché il filtro passa-basso abbia guadagno unitario in bassa frequenza e frequenza di taglio pari a  $100Hz$  è il seguente. Dalla funzione di trasferimento del filtro si ottiene

$$A_0 = \frac{R_3}{R_4} = 1 \implies R_3 = R_4 \quad (3)$$

Dalla frequenza di taglio si ricava il valore delle resistenze

$$F = \frac{1}{2\pi R_4 C} = 100Hz \implies R_3 = R_4 = \frac{1}{2\pi C F} \approx 16k\Omega \quad (4)$$

### 2.3.2 Risultati

Dopo aver realizzato il circuito e collegato l'ingresso all'uscita  $v_{01}$ . Sull'oscilloscopio sono state visualizzate le forme d'onda  $v_{01}$  e  $v_{03}$ , che sono riportate in Figura 11.

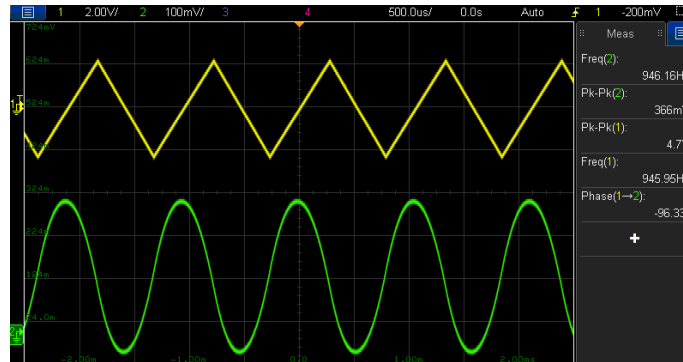


Figure 11: Forme d'onda  $v_{01}$  e  $v_{03}$

Inoltre sono stati misurati l'ampiezza picco-picco della sinusoide generata e lo sfasamento rispetto all'onda triangolare generata, riportata in Tabella 3

Ampiezza picco-picco	303mV
Fase	-95.686°

Table 3: Misurazioni sulle forme d'onda  $v_{01}$  e  $v_{03}$

Infine è stata messa a confronto l'onda sinusoidale generata dal circuito con quella generata dal generatore di funzione impostato sugli stessi parametri. In Figura 12 sono riportate le due forme d'onda

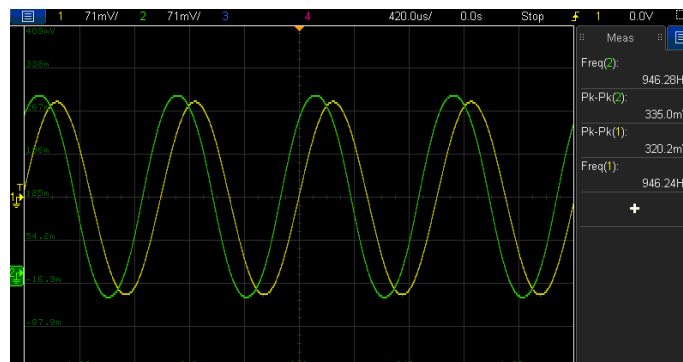


Figure 12: Forma d'onda generata dal circuito e "pura"

Possiamo notare che le due forme d'onda sono pressoché identiche in frequenza e in ampiezza picco-picco (a meno di un offset).

### 3 Multivibratore astabile basato su BJT

In questo esperimento facoltativo si vuole realizzare un multi vibratore astabile basato su BJT che fa accendere alternativamente due diodi LED, ponendo particolare attenzione a comprenderne e descriverne il funzionamento. Il circuito è riportato in Figura 13. Sono stati utilizzati i seguenti componenti:

- 2 transistor bipolari NPN, codice BC548
- Resistenze:  $R_1 = R_4 = 470\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 47k\Omega$
- Condensatori:  $C_1 = C_2 = 10\mu F$
- LED rossi, codice CREE C503B-RCS-CW0Z0AA1

Il circuito è alimentato da una tensione  $V_{CC} = +12V$  e in Figura 14 si è riportato il package del transistor e del led

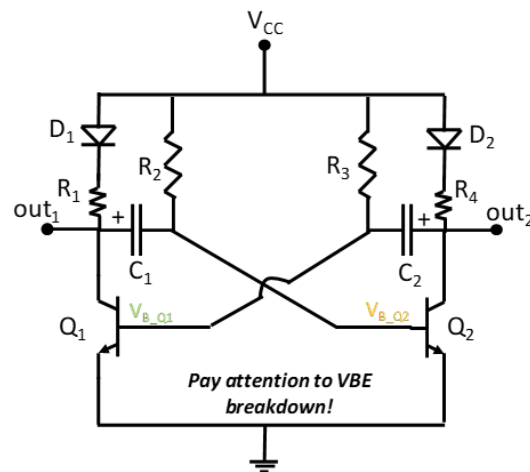


Figure 13: Schema circuito



Figure 14: Package del BJT BC548 e del LED

### 3.1 Risultati

Misurare le forme d'onda alla base e al collettore del transistor  $Q_1$  e riportarle in relazione

Con l'utilizzo dell'oscilloscopio è stato campionato il segnale e ottenuto le seguenti forme d'onda, riportate in Figura 15 per la misura alla base e in Figura 16 per la misura al collettore.

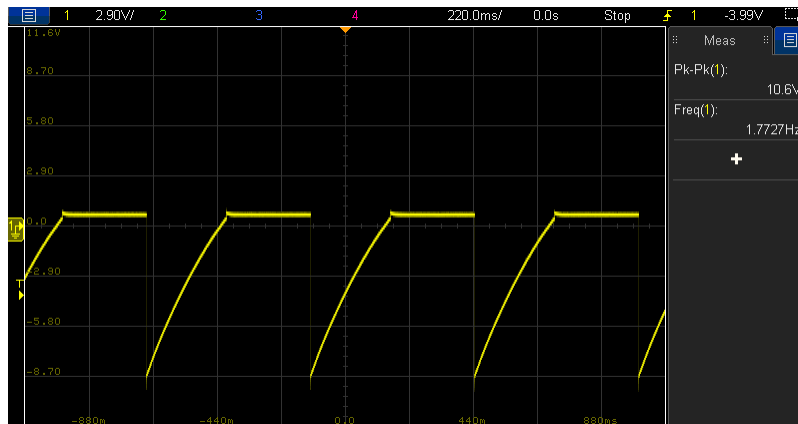


Figure 15: Forma d'onda campionata alla base di  $Q_1$

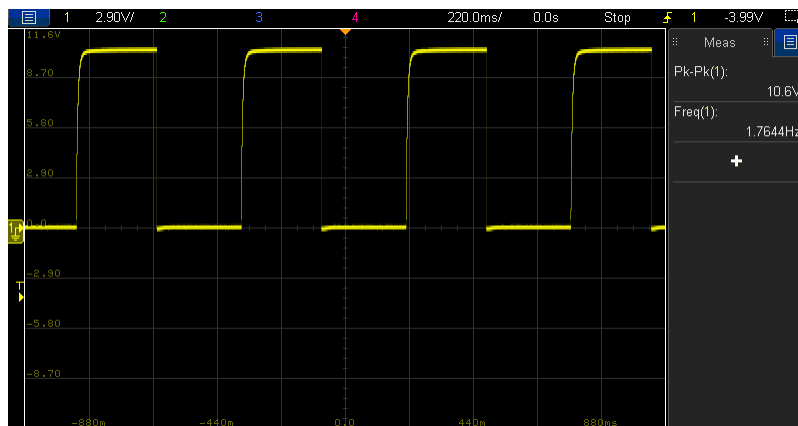
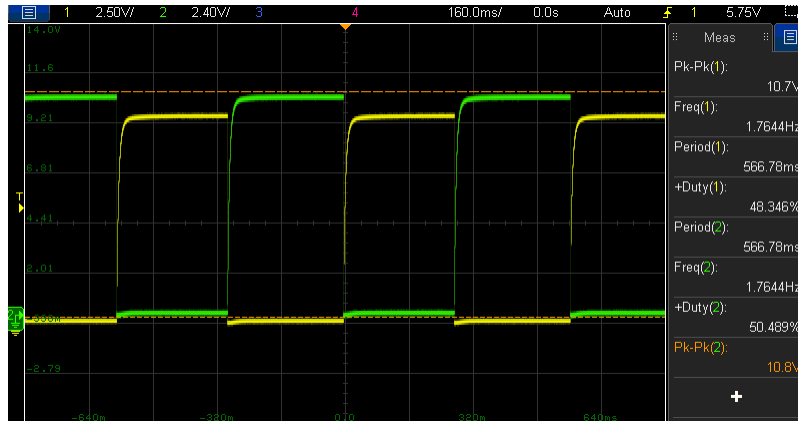


Figure 16: Forma d'onda campionata al collettore di  $Q_1$

Riportare il confronto della forma d'onda  $out_1$  e  $out_2$  in relazione

Sempre con l'utilizzo dell'oscilloscopio è stato campionato il canale di entrambe le uscite per poi metterle a confronto in Figura 17

Figure 17: Confronto della forma d'onda  $out_1$  e  $out_2$ 

**Valutare il periodo, frequenza e duty cycle della forma d'onda generata all'uscita  $out_1$  e  $out_2$**

L'oscilloscopio fornisce i seguenti parametri delle forme d'onda generate dal circuito, riassunti nella Tabella 4

Uscita	Vpp	Periodo	Frequenza	Duty cycle
$out_1$	10.7V	566.78ms	1.7644Hz	48.346%
$out_2$	10.8V	566.78ms	1.7644Hz	50.489%

Table 4: Valutazione dei segnali di uscita

### 3.2 Funzionamento del circuito

Un circuito multivibratore astabile basato su transistor BJT è costituito da due BJT, due condensatori, due diodi e quattro resistenze, tali che  $R_1 = R_2 < R_2 = R_3$ . Il circuito funziona in modo che i due transistor si alternino nel loro stato di accensione e spegnimento. Entrambi i transistor sono accoppiati a croce, ciò significa che il collettore di un transistor è connesso alla base dell'altro transistor attraverso una capacità. Nel momento in cui viene fornita l'alimentazione, uno dei due transistor si accende più rapidamente dell'altro a causa di piccole differenze tra i dispositivi. Supponendo che  $Q_1$  vada in saturazione per primo, la tensione base-emettitore di  $Q_1$  si porta al valore di  $0.7V$  e la tensione al collettore di  $Q_2$  si porta al potenziale di massa. Questo comporta che alla base di  $Q_2$  appare l'inverso della tensione ai capi del condensatore  $C_1$ , portandolo nella regione di interdizione (cut-off), di conseguenza al collettore di  $Q_2$  si ha il potenziale  $V_{cc}$ . Si ha  $Q_1$  On e  $Q_2$  Off.

Il condensatore  $C_2$  inizia a caricarsi fino al potenziale  $V_{cc} - V_{be}$ , mentre il condensatore  $C_1$  fino a  $V_{cc}$ . Dato  $R_1 < R_2$  si ha che  $C_2$  si carica più rapidamente di  $C_1$ . Appena la tensione ai capi di  $C_1$  (e quindi alla base di  $C_2$ ) diventa  $0.7V$  il transistor  $Q_2$  inizia a condurre fino a entrare in saturazione. Di conseguenza la tensione al collettore di  $Q_2$  si porta al potenziale di massa. La tensione alla base di  $Q_1$  si porta all'inverso del valore ai capi di  $C_2$ , quindi a  $-(V_{cc} - V_{be})$  e  $Q_1$

entra in interdizione. Si ha  $Q_1$  Off e  $Q_2$  On.

Da qui in poi il circuito continuerà a cambiare tra i due stati fino alla rimozione dell'alimentazione.

### 3.3 Periodo della forma d'onda

Il periodo  $T$  della forma d'onda dipende dalle resistenze  $R_2$  e  $R_3$  e dai condensatori  $C_1$  e  $C_2$  utilizzati nel circuito, secondo la formula:

$$T = \ln 2(R_2C_1 + R_3C_2) \quad (5)$$

## 4 Oscillatore a rilassamento

In questa esperimento facoltativo è stato descritto e in seguito analizzato il funzionamento dell'oscillatore a rilassamento. Il circuito è rappresentato in Figura 18. Sono stati utilizzati i seguenti componenti:

- Amplificatore operazionale a doppia uscita, codice TL082CP
- Resistenze  $R_1, R_2, R$  a valori da determinare
- Condensatore da  $100nF, 220nF, 1\mu F$  in dotazione

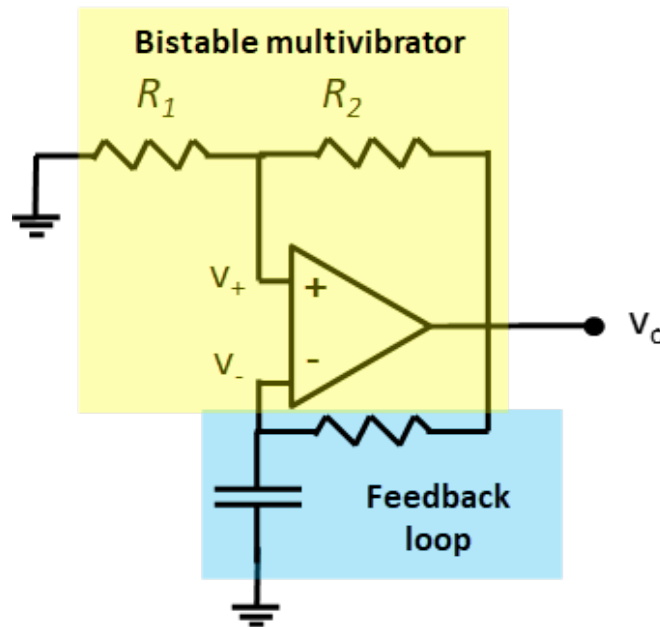


Figure 18: Schema circuito

Il circuito è alimentato dalla tensione duale:  $\pm V_{CC} = \pm 10V$

### 4.1 Descrizione del funzionamento del circuito

Un modo semplice per generare onde quadre è forzare un circuito bistabile a cambiare stato periodicamente. Questo può essere ottenuto connettendo un circuito bistabile a una rete di retroazione RC. Questo circuito non ha stati stabili, ed è detto multivibratore astabile.

Si noti che non sono presenti ingressi, ciò comporta che all'accensione dell'alimentazione l'uscita  $V_o$  si porta a uno dei due valori di saturazione  $L_+$  o  $L_-$ . Se per ipotesi l'uscita si trova al valore  $L_+$ , si ha  $V_+ = \beta L_+$  (con  $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ ), mentre il condensatore  $C$  si carica verso  $L_+$  attraverso la resistenza  $R$ . Quando la tensione ai capi del condensatore raggiunge  $V_{th} = \beta L_+$ , l'uscita  $V_o$  commuta verso l'altro stato stabile in cui  $V_o = L_-$  e  $V_+ = \beta L_-$ . Il condensatore inizia a scaricarsi fino a  $V_{tl} = \beta L_-$ , dove avviene la successiva commutazione. Da qui in poi il circuito continua a commutare tra i due stati fino allo spegnimento dell'alimentazione.

## 4.2 Dimensionamento del circuito

Si vuole dimensionare i componenti  $R_1, R_2, R, C$ , in modo tale che il circuito risultante abbia frequenza di oscillazione pari a  $100\text{Hz}$ .

Il periodo  $T$  dell'onda quadra in uscita vale

$$T = 2\tau \ln \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \quad (6)$$

Dove  $\beta = R_1/R_1 + R_2$  e  $\tau = RC$  costante di tempo. I valori di  $R_1, R_2$  sono quelli scelti nel primo esperimento, quindi

$$R_1 = R_2 = 10k\Omega \implies \frac{1 + \beta}{1 - \beta} = 3$$

Scelto un valore di capacità tra quelli disponibili, è stato ricavato il valore della resistenza  $R$  da

$$R = \frac{1}{f2C \ln 3} \quad (7)$$

Quindi ponendo  $C = 100\text{nF}$  si è ottenuto

$$R = 45511.96\Omega \approx 47k\Omega$$

Riassumiamo nella tabella sotto il dimensionamento del circuito scelto.

$R_1$	$10k\Omega$
$R_2$	$10k\Omega$
$R$	$47k\Omega$
$C$	$100\text{nF}$

## 4.3 Risultati

Sono riportate di seguito le forme d'onda di  $v_0, v_-, v_+$ , rispettivamente in Figura 19,20,21.

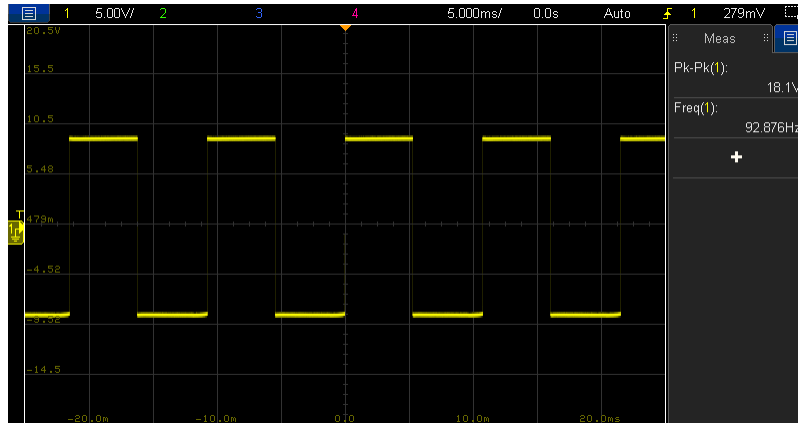
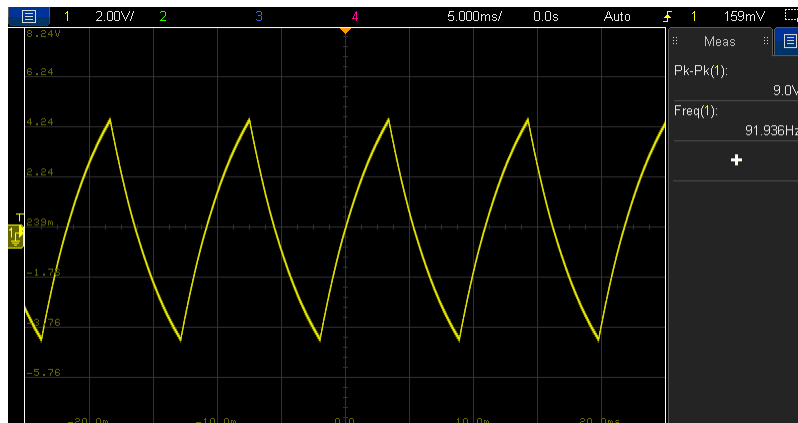
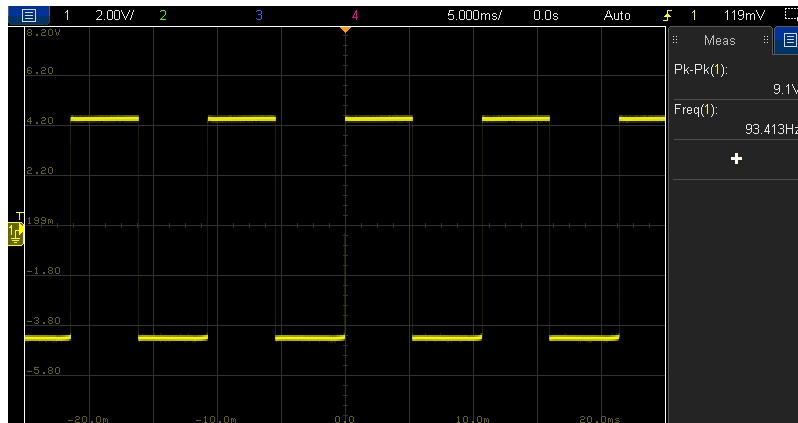


Figure 19: Forma d'onda presa in  $v_0$



Figure 20: Forma d'onda presa in  $v_-$ Figure 21: Forma d'onda presa in  $v_+$

## 4.4 Elaborazione dati con MATLAB®

Riportiamo in Figura 22 il plotting fatto con MATLAB® dei dati campionati con l'oscilloscopio.

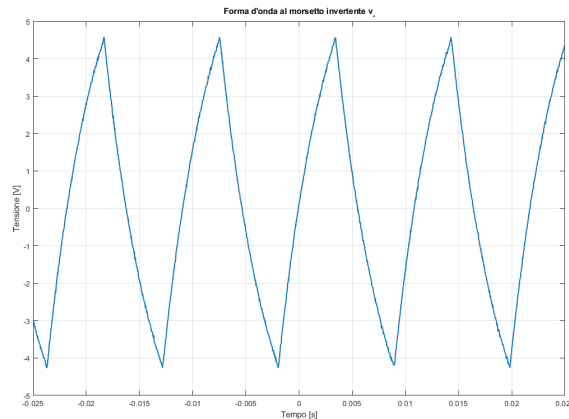


Figure 22: Plot MATLAB®

Il valore di  $\tau$  determinato dal dimensionamento del circuito è

$$\tau = RC = 0.0047 \quad [\Omega F]$$

Tramite la funzione *CurveFitter* di MATLAB® abbiamo ricavato un valore alla variabile  $\tau$ . Il fitting è stato fatto solo su un fronte di salita scelto. Come si vede in Figura 23

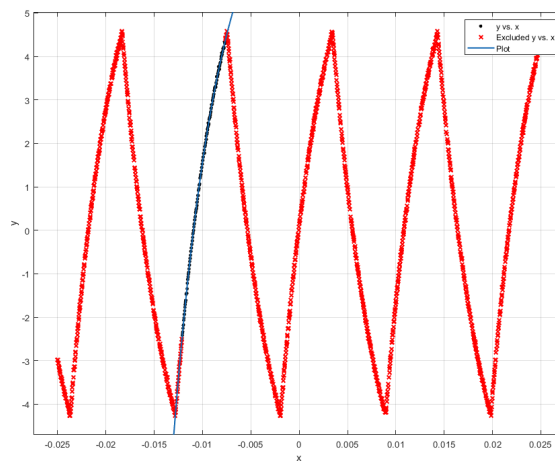


Figure 23: Curve Fitter sui dati campionati

Dal fitting abbiamo ricavato il seguente valore di  $\tau = 0.004707$ .