

Logbook del laboratorio di Elettronica

Data _____

Gruppo n. 27

Tavolo n. 4

Cognome e Nome: Tomassoli Giacomo

Cognome e Nome: Stocco Alberto

Cognome e Nome: Spotti Federico

0) Incertezze del multimetro**1) Misura della costante di tempo di un circuito RC**

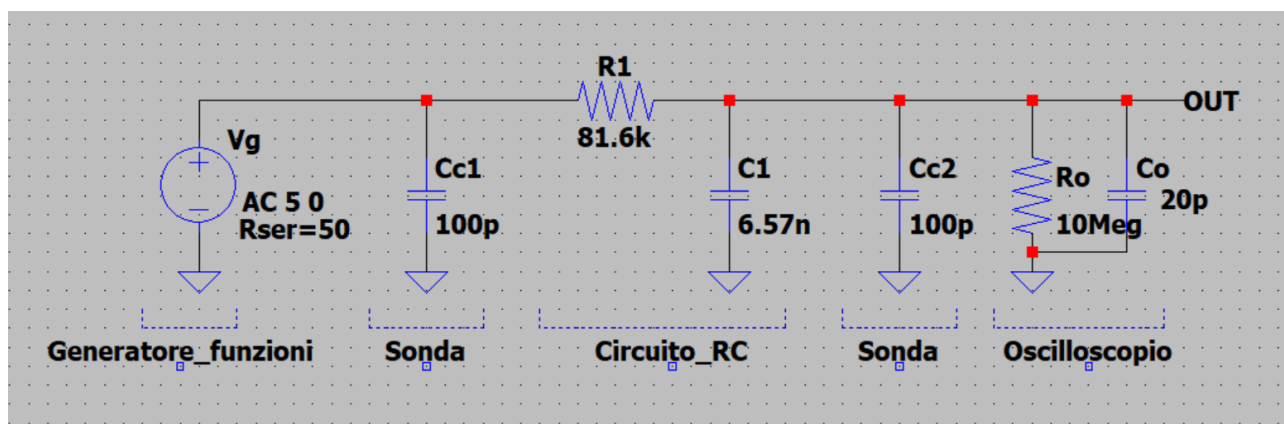
Riportiamo inizialmente le misure con relativa incertezza delle componenti circuitali:

$$R = (81.60 \pm 0.03) \text{ k}\Omega \quad C = (6.57 \pm 0.06) \text{ nF}$$

Inserendo in ingresso un'onda quadra da $V_{in} = 5 \text{ V}$ con frequenza 50 Hz, il valore teorico del τ cioè il tempo necessario durante la fase di scarica del condensatore tale per cui la tensione in uscita è diminuita di un fattore 1/e rispetto a quella di ingresso è pari a con relativa formula di propagazione dell'errore:

$$\tau_{teorico} : (536.09 \pm 4.88) \mu s \quad \varepsilon_r = 0.9\% \quad \sigma_\tau = \tau \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2}$$

Circuito utilizzato nella simulazione di LtSpice

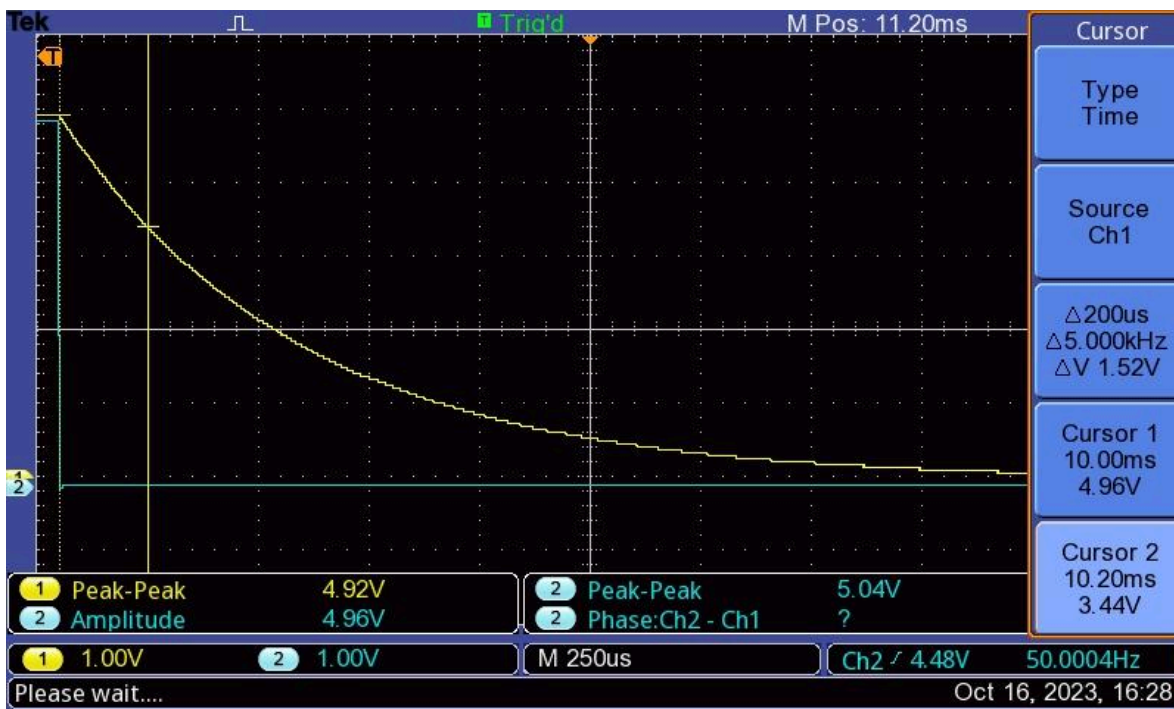


In laboratorio è stata inizialmente effettuata una prima presa dati dei valori della tensione e tempo della curva di scarica del condensatore utilizzando prima il cavo BNC e poi le Sonde:

| cavo BNC | | sonde | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|
| V/div | 1 | V/div | 1 |
| t (ms) | V (V) | t (ms) | V (V) |
| 9.80 ± 0.01 | 3.76 ± 0.09 | 10.10 ± 0.01 | 4.12 ± 0.09 |
| 9.90 ± 0.01 | 3.08 ± 0.08 | 10.20 ± 0.01 | 3.44 ± 0.08 |
| 10.00 ± 0.01 | 2.56 ± 0.07 | 10.30 ± 0.01 | 2.88 ± 0.08 |

| | | | |
|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 10.10 ± 0.01 | 2.12 ± 0.07 | 10.40 ± 0.01 | 2.40 ± 0.07 |
| 10.20 ± 0.01 | 1.72 ± 0.06 | 10.50 ± 0.01 | 2.00 ± 0.07 |
| 10.30 ± 0.01 | 1.44 ± 0.06 | 10.60 ± 0.01 | 1.64 ± 0.06 |
| 10.40 ± 0.01 | 1.20 ± 0.06 | 10.70 ± 0.01 | 1.40 ± 0.06 |
| 10.50 ± 0.01 | 0.96 ± 0.06 | 10.80 ± 0.01 | 1.16 ± 0.06 |
| 10.60 ± 0.01 | 0.8 ± 0.06 | 10.90 ± 0.01 | 0.96 ± 0.06 |
| 10.70 ± 0.01 | 0.68 ± 0.06 | 11.00 ± 0.01 | 0.80 ± 0.06 |
| 10.80 ± 0.01 | 0.56 ± 0.06 | 11.10 ± 0.01 | 0.68 ± 0.06 |

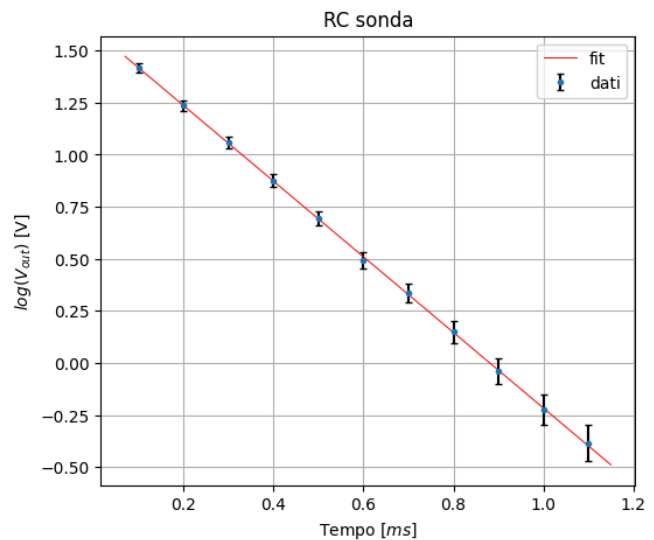
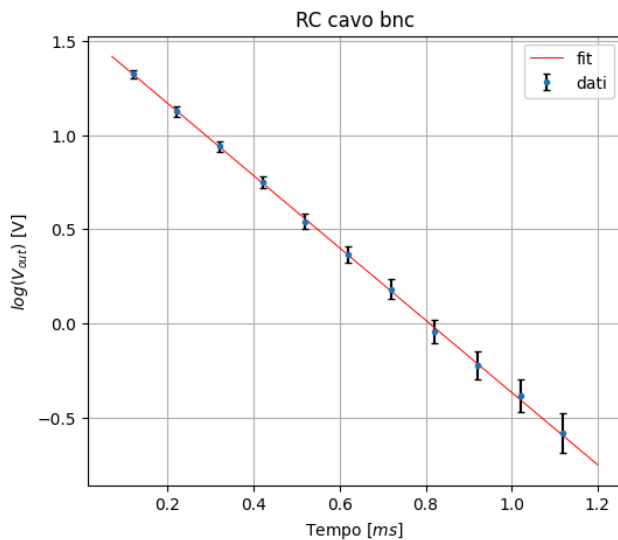
Riportiamo ora lo screenshot dell'oscilloscopio della curva di scarica del circuito RC:



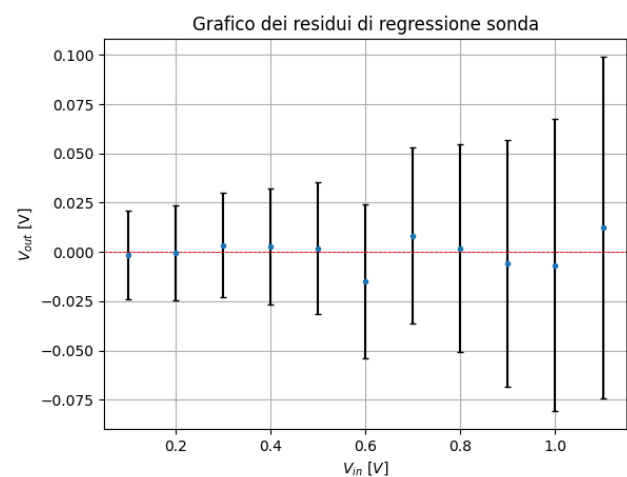
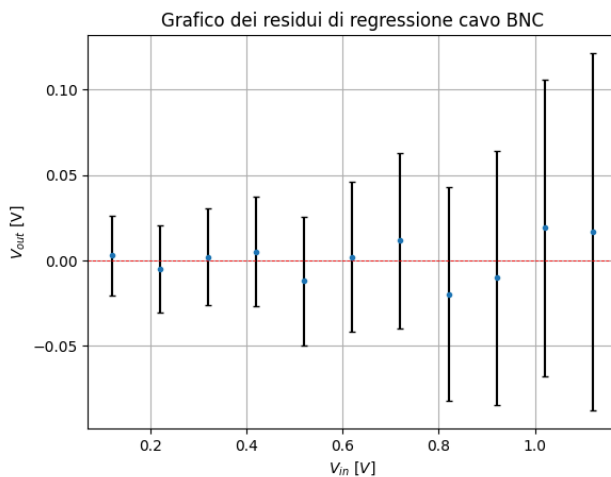
Per ricavare una stima sperimentale della τ è stato eseguito un fit lineare, nello specifico è stata linearizzata la formula che esprime l'andamento della tensione in uscita durante la scarica del circuito RC:

$$V_c(t) = V_0 e^{-t/\tau} \xrightarrow{\text{linearizzando}} \ln V_c(t) = c + mt \quad \text{con} \quad m = -1/\tau \quad c = \ln V_0$$

Riportiamo i grafici dei Fit lineari per le 2 prese dati:



con i relativi grafici dei residui:



I valori stimati sperimentalmente dal Fit lineare del τ con i rispettivi errori del Fit sono i seguenti:

$$\text{cavo BNC} : \tau = (521 \pm 21) \mu\text{s} \quad \text{sonde} : \tau = (551 \pm 21) \mu\text{s}$$

Sono state poi effettuate le compatibilità:

Cavo BNC e il valore teorico $r = 1.01$

Sonda e valore teorico $r = 1.01$

Cavo BNC e sonda $r = 1.66$

Possiamo concludere che le stime del τ effettuate sono in buon accordo sia con il modello teorico, sia nell'uso di 2 strumenti differenti per la rilevazione delle misure, cavo BNC e sonde rispettivamente.

Nella seconda parte dell'esperienza è stata analizzata la risposta in frequenza del circuito imponendo una tensione picco picco pari a $V_{PP} = 5.04$ V.

L'obiettivo era la verifica sperimentale del comportamento del RC come filtro passa-basso e la successiva stima della frequenza di taglio.

Riportiamo il valore teorico con l'incertezza ricavabile dalla propagazione degli errori:

$$f_t = \frac{1}{2\pi RC} \quad \sigma_{f_t} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(-\frac{1}{CR^2}\right)^2 \sigma_R^2 + \left(-\frac{1}{RC^2}\right)^2 \sigma_C^2}$$

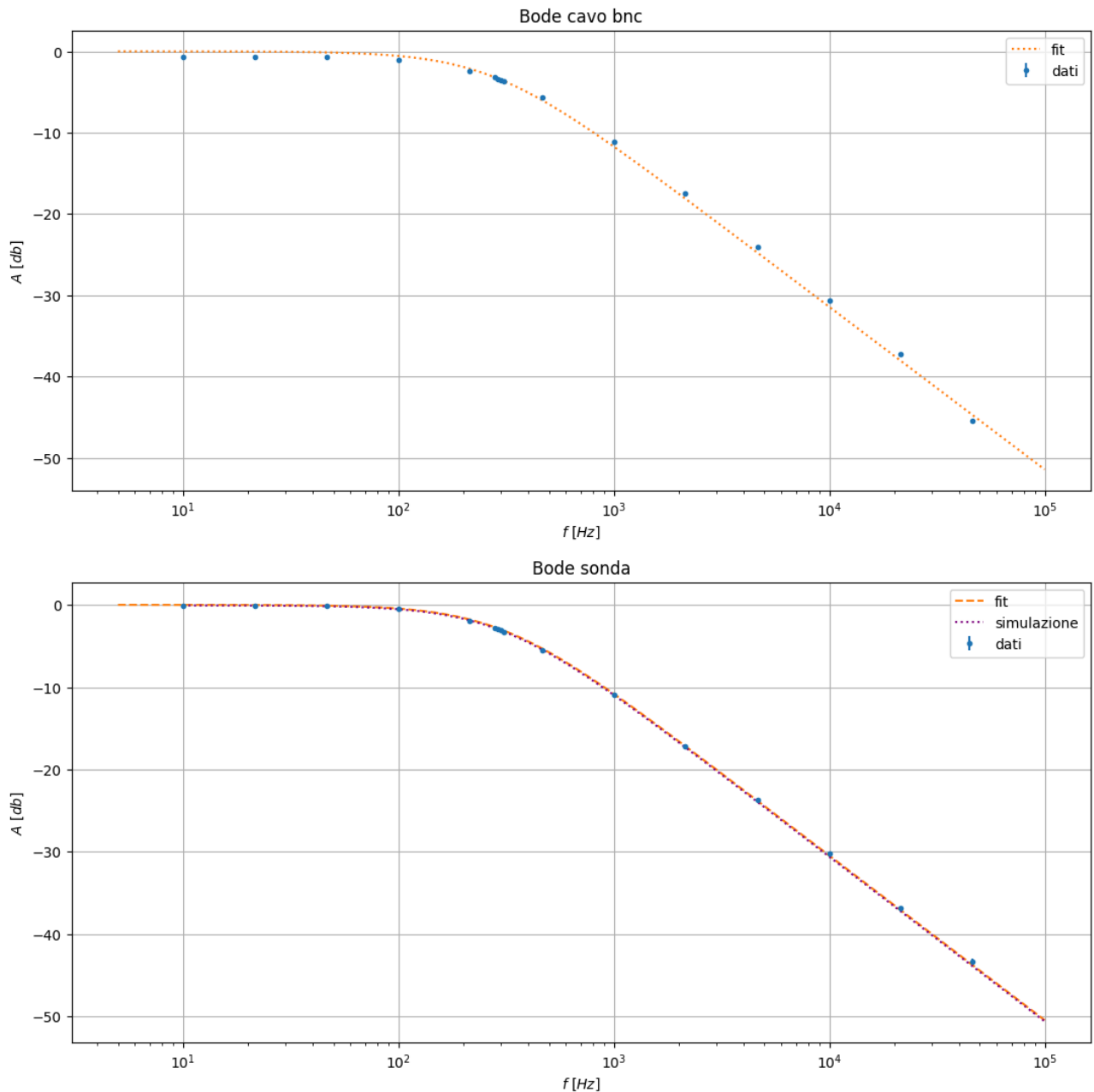
e abbiamo ottenuto il seguente: $f_t = (296.9 \pm 2.7) \text{ Hz}$

Mostriamo ora i dati sperimentali raccolti in laboratorio:

| cavo BNC | | | | sonde | | | |
|-------------------|-------|--------------------|--------------------|-------------------|-------|-------------------|--------------------|
| frequenza (Hz) | V/div | V (V) | A (db) | frequenza (Hz) | V/div | V (V) | A (db) |
| 10 | 1 | 4.680 ± 0.0995 | -0.322 ± 0.26 | 10 | 1 | 5.000 ± 0.104 | -0.035 ± 0.25 |
| 21.5 | 1 | 4.680 ± 0.099 | -0.322 ± 0.26 | 21.5 | 1 | 4.960 ± 0.103 | -0.069 ± 0.25 |
| 46.4 | 1 | 4.680 ± 0.099 | -0.322 ± 0.26 | 46.4 | 1 | 4.960 ± 0.103 | -0.069 ± 0.25 |
| 100 | 1 | 4.440 ± 0.096 | -0.550 ± 0.26 | 100 | 1 | 4.760 ± 0.101 | -0.248 ± 0.25 |
| 215 | 0.5 | 3.840 ± 0.073 | -1.181 ± 0.24 | 215 | 0.5 | 4.040 ± 0.091 | -0.960 ± 0.26 |
| 280 | 0.5 | 3.480 ± 0.067 | -1.608 ± 0.24 | 280 | 0.5 | 3.620 ± 0.069 | -1.437 ± 0.24 |
| 290 | 0.5 | 3.420 ± 0.066 | -1.684 ± 0.24 | 290 | 0.5 | 3.580 ± 0.068 | -1.485 ± 0.24 |
| 300 | 0.5 | 3.360 ± 0.065 | -1.761 ± 0.25 | 300 | 0.5 | 3.520 ± 0.067 | -1.559 ± 0.24 |
| 310 | 0.5 | 3.320 ± 0.065 | -1.813 ± 0.25 | 310 | 0.5 | 3.460 ± 0.066 | -1.634 ± 0.24 |
| 464 | 0.2 | 2.620 ± 0.047 | -2.841 ± 0.24 | 464 | 0.2 | 2.680 ± 0.047 | -2.743 ± 0.24 |
| 1000 | 0.1 | 1.400 ± 0.025 | -5.563 ± 0.24 | 1000 | 0.1 | 1.430 ± 0.025 | -5.471 ± 0.24 |
| 2150 | 0.05 | 0.680 ± 0.012 | -8.699 ± 0.24 | 2150 | 0.05 | 0.696 ± 0.012 | -8.598 ± 0.24 |
| 4640 | 0.02 | 0.316 ± 0.006 | -12.027 ± 0.24 | 4640 | 0.05 | 0.328 ± 0.006 | -11.866 ± 0.25 |

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------------------|--------------------|-------|------|-------------------|--------------------|
| 10000 | 0.02 | 0.148 ± 0.003 | -15.322 ± 0.24 | 10000 | 0.02 | 0.156 ± 0.003 | -15.093 ± 0.24 |
| 21500 | 0.02 | 0.069 ± 0.002 | -18.598 ± 0.27 | 21500 | 0.02 | 0.073 ± 0.002 | -18.403 ± 0.27 |
| 46400 | 0.005 | 0.027 ± 0.001 | -22.711 ± 0.25 | 46400 | 0.02 | 0.034 ± 0.001 | -21.659 ± 0.37 |

Riportiamo ora i grafici di bode dell'analisi in frequenza del circuito,

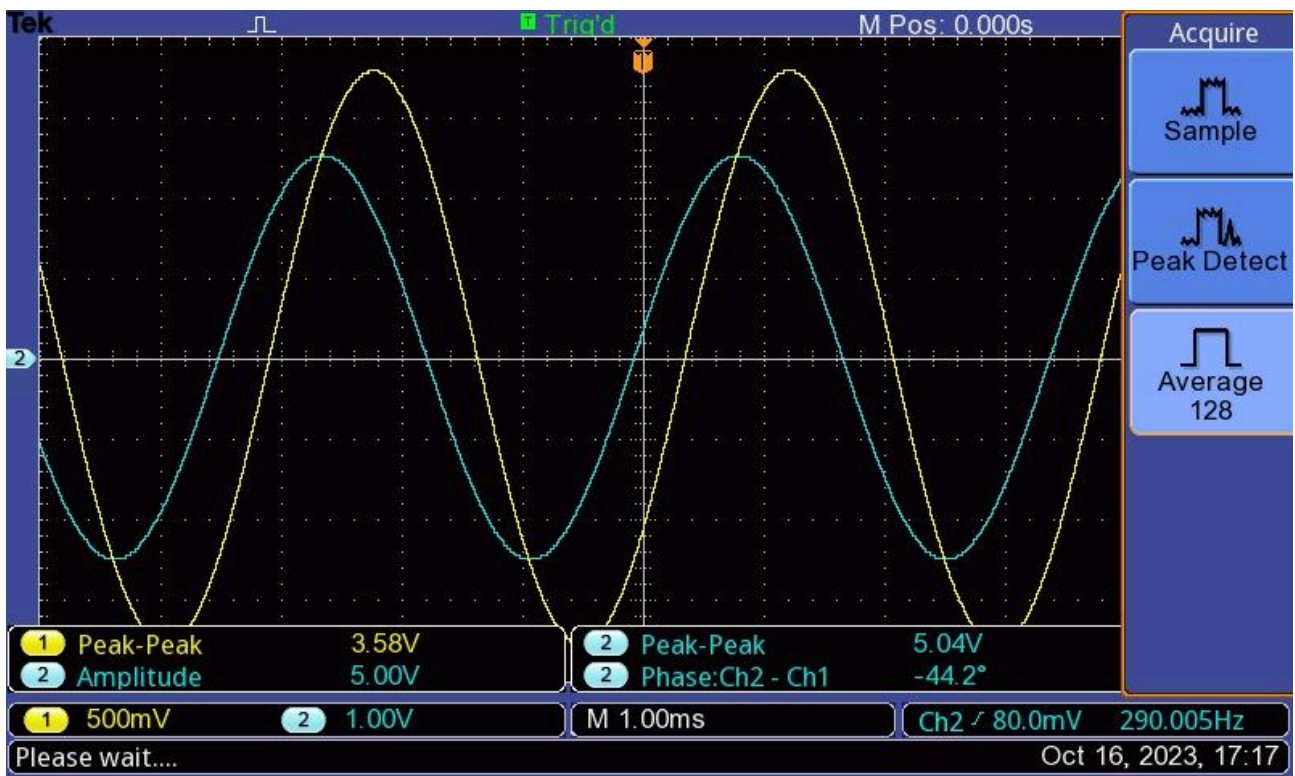


Frequenza di taglio: Cavo BNC (269 ± 9) Hz

Sonda (301 ± 2) Hz

Per valutare l'accuratezza delle misure sperimentali è stata calcolata la compatibilità tra i vari risultati notando che la misura con il cavo BNC si discosta significativamente dalla stima teorica,

infatti la misura è scarsamente compatibile $r = 2.93$. Per quanto riguarda la misura con la sonda essa risulta essere in buona compatibilità con il valore teorico $r = 1.14$



2) Misura della curva di trasferimento VTC (caratteristica V_{in} vs. V_{out}) per un amplificatore invertente

Alimentazioni dell'operazionale:

$$V_+ = 15V / V_{FS} = 20V$$

$$V_- = 15V / V_{FS} = 20V$$

Componenti del circuito:

$$R_1 = (8.170 \pm 0.005) \text{ k}\Omega / R_{FS} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_f = (14.98 \pm 0.01) \text{ k}\Omega / R_{FS} = 100 \text{ k}\Omega$$

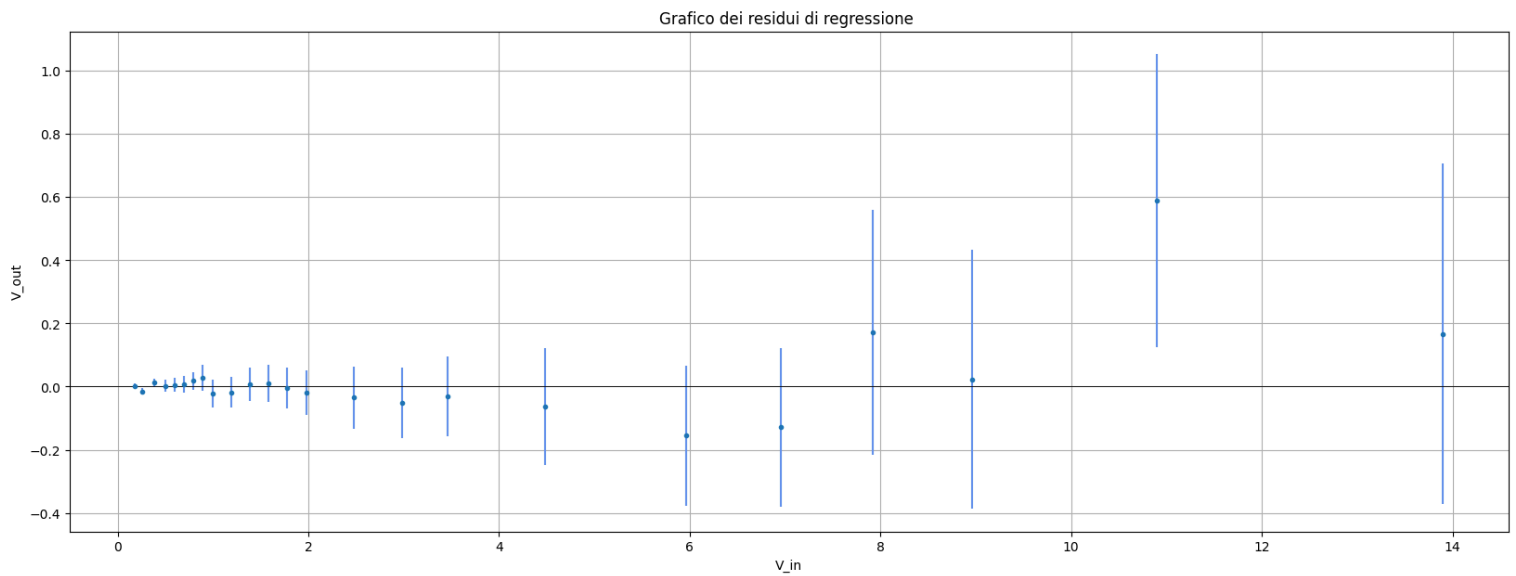
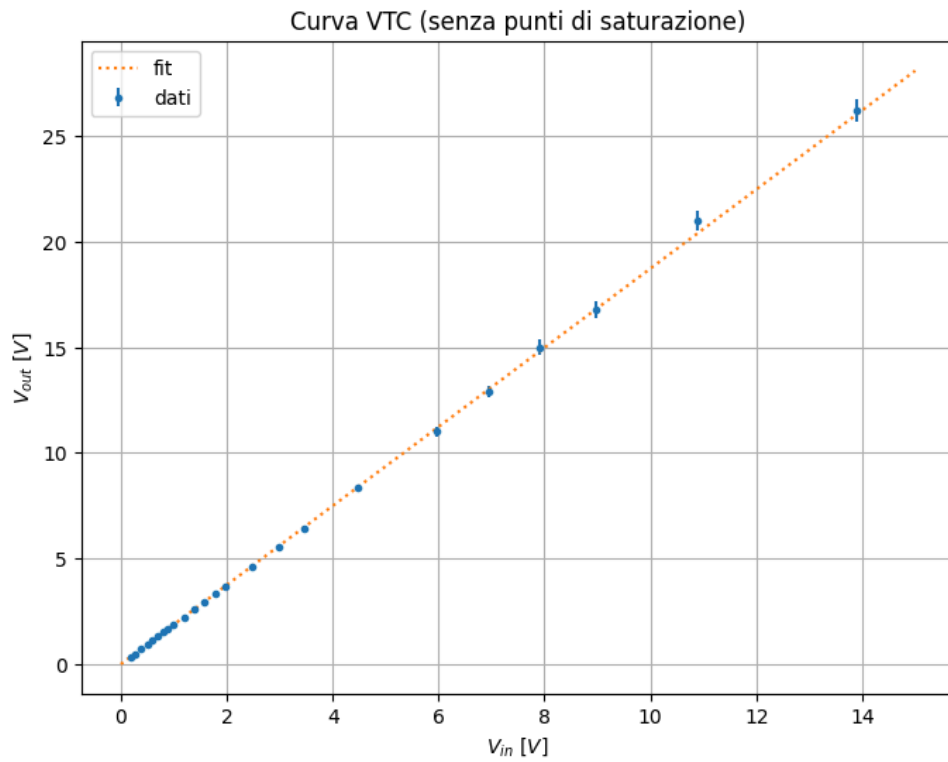
=> A prevista : 1.834 ± 0.002 ($\epsilon = 0.1\%$), dove

$$A = -\frac{R_f}{R_1} \quad \sigma_A = A \sqrt{\left(\frac{\sigma_{R_1}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_f}}{R_f}\right)^2}$$

Curva VTC:

| $V_{pp,IN}$ | V/div | $V_{pp,OUT}$ | V/div |
|-------------------|-------|-------------------|-------|
| 0.182 ± 0.004 | 0.05 | 0.332 ± 0.006 | 0.05 |
| 0.26 ± 0.03 | 0.05 | 0.46 ± 0.01 | 0.1 |
| 0.38 ± 0.03 | 0.05 | 0.72 ± 0.01 | 0.1 |
| 0.50 ± 0.01 | 0.1 | 0.93 ± 0.02 | 0.2 |
| 0.60 ± 0.01 | 0.1 | 1.11 ± 0.02 | 0.2 |

| | | | |
|-----------------|-----|-----------------|-----|
| 0.70 ± 0.01 | 0.1 | 1.30 ± 0.03 | 0.2 |
| 0.79 ± 0.01 | 0.1 | 1.49 ± 0.03 | 0.2 |
| 0.89 ± 0.02 | 0.2 | 1.68 ± 0.04 | 0.5 |
| 1.00 ± 0.02 | 0.2 | 1.84 ± 0.04 | 0.5 |
| 1.19 ± 0.02 | 0.2 | 2.20 ± 0.05 | 0.5 |
| 1.39 ± 0.02 | 0.2 | 2.60 ± 0.05 | 0.5 |
| 1.6 ± 0.1 | 0.2 | 2.96 ± 0.06 | 0.5 |
| 1.78 ± 0.03 | 0.5 | 3.32 ± 0.06 | 0.5 |
| 1.98 ± 0.04 | 0.5 | 3.68 ± 0.07 | 0.5 |
| 2.48 ± 0.05 | 0.5 | 4.6 ± 0.1 | 1 |
| 2.98 ± 0.06 | 0.5 | 5.5 ± 0.1 | 1 |
| 3.46 ± 0.07 | 0.5 | 6.4 ± 0.1 | 1 |
| 4.48 ± 0.08 | 1 | 8.3 ± 0.2 | 2 |
| 6.0 ± 0.1 | 2 | 11.0 ± 0.2 | 2 |
| 7.0 ± 0.2 | 2 | 12.9 ± 0.3 | 2 |
| 7.9 ± 0.2 | 2 | 15.0 ± 0.4 | 5 |
| 9.0 ± 0.2 | 2 | 16.8 ± 0.4 | 5 |
| 10.9 ± 0.2 | 2 | 21.0 ± 0.5 | 5 |
| 13.9 ± 0.3 | 2 | 26.2 ± 0.5 | 5 |
| 16.8 ± 0.3 | 5 | 29.2 ± 0.6 | 5 |
| 19.2 ± 0.4 | 5 | 29.2 ± 0.6 | 5 |
| 20.0 ± 0.5 | 5 | 29.2 ± 0.6 | 5 |

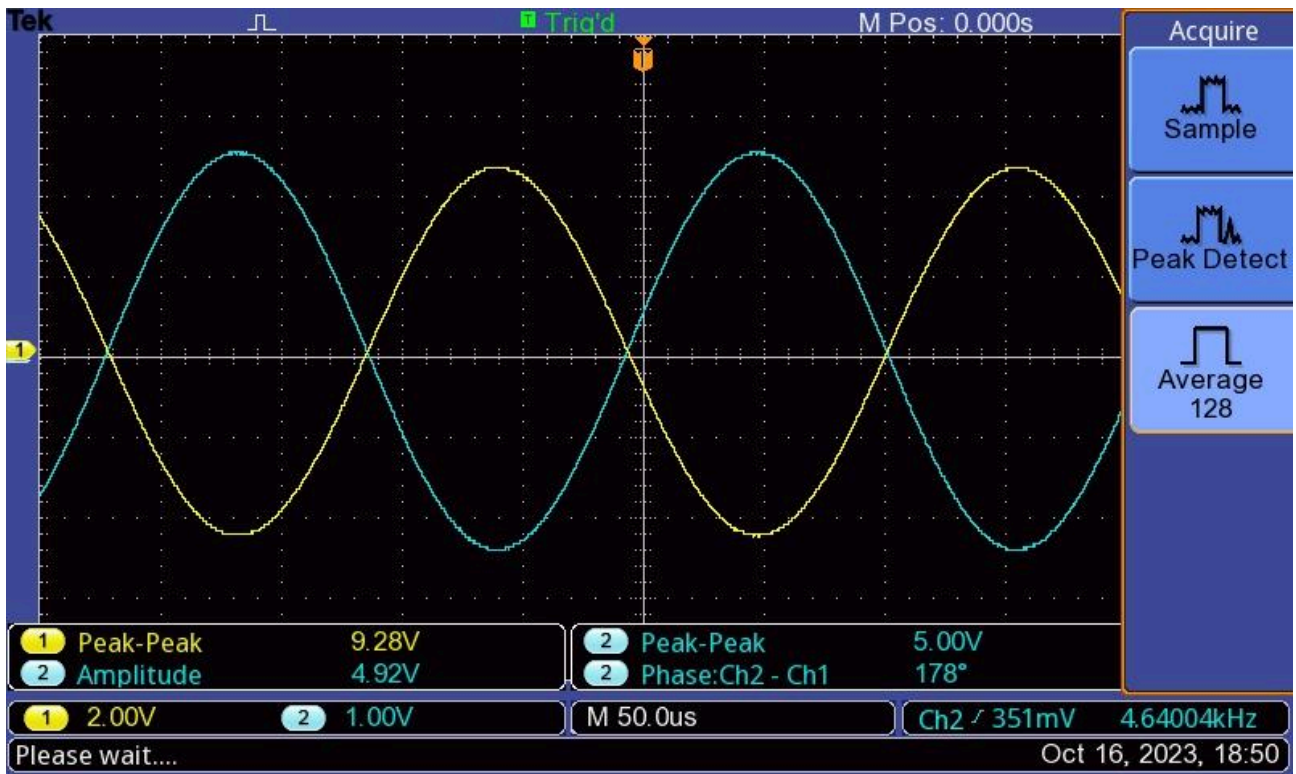


Fit lineare : $V_{OUT} = mV_{IN} + q$

$m = 1.87 \pm 0.01$

$q = -0.12 \pm 0.06$ *fit semplice con errori dati dal programma di fit*

Compatibilità con il valore atteso: $r = 3.5$ (scarsa compatibilità)

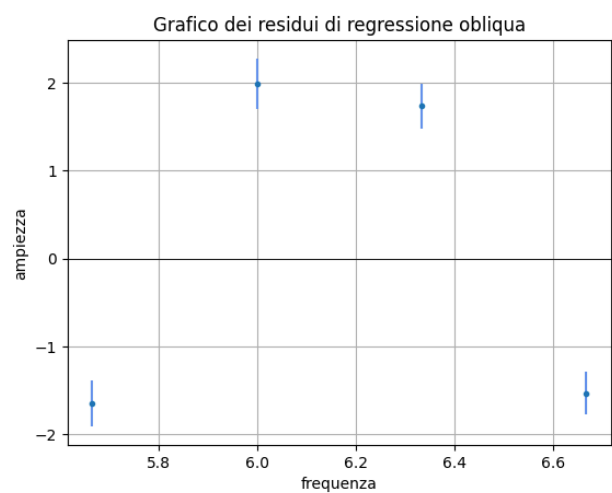
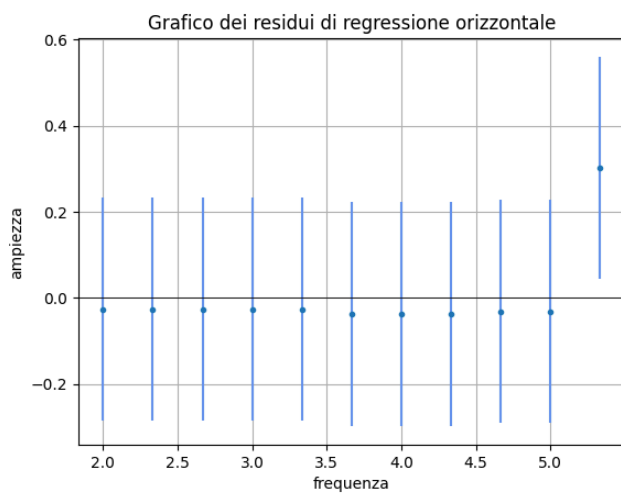
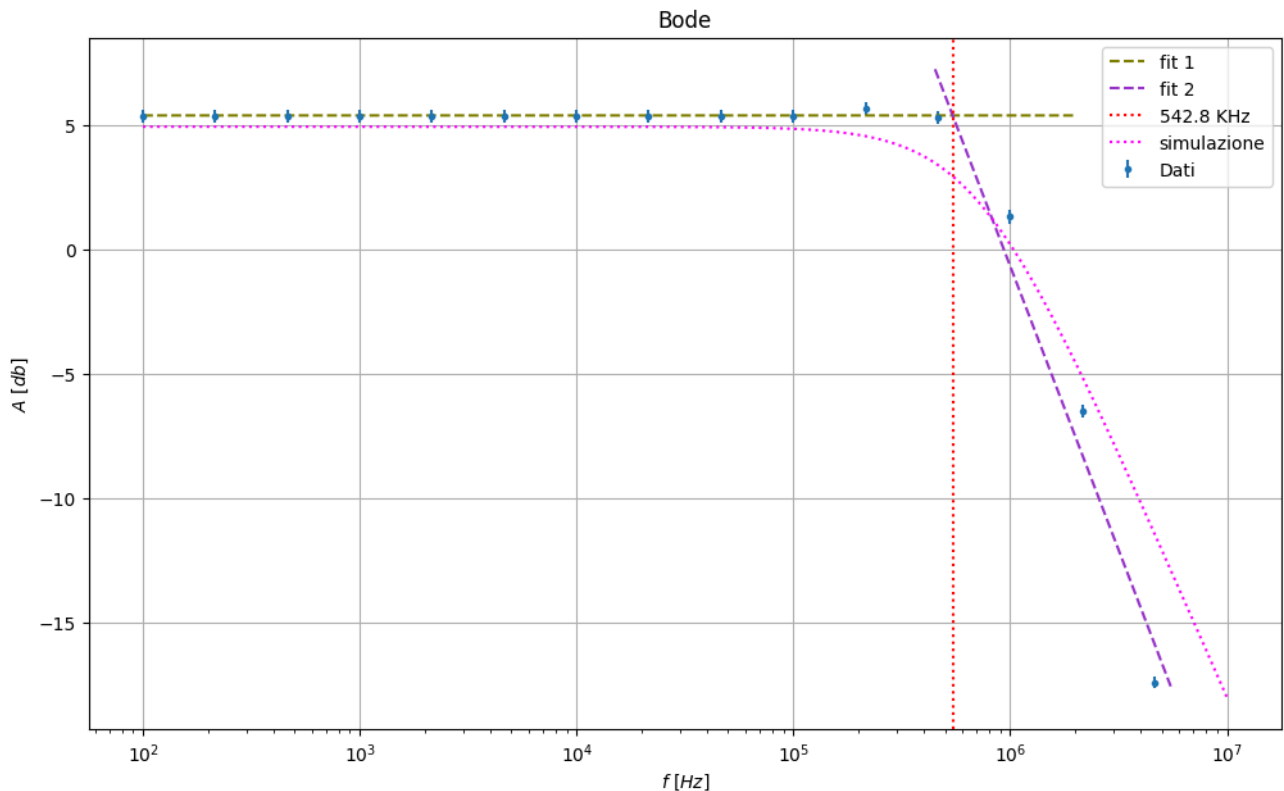


Risposta in frequenza con onda sinusoidale

$$V_{PP} = 5.00 \text{ V}$$

| f (Hz) | V_{IN}^{pp} | V/div | V_{OUT}^{pp} | V/div | A (dB) |
|--------|---------------|-------|----------------|-------|---------------|
| 100 | 5.0 ± 0.1 | 1 | 9.3 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |
| 215 | 5.0 ± 0.1 | 1 | 9.3 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |
| 464 | 5.0 ± 0.1 | 1 | 9.3 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |
| 1000 | 5.0 ± 0.1 | 1 | 9.3 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |
| 2150 | 5.0 ± 0.1 | 1 | 9.3 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |
| 4640 | 4.9 ± 0.1 | 1 | 9.1 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |
| 10000 | 4.9 ± 0.1 | 1 | 9.1 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |
| 21500 | 4.9 ± 0.1 | 1 | 9.1 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |
| 46400 | 5.0 ± 0.1 | 1 | 9.1 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |
| 100000 | 5.0 ± 0.1 | 1 | 9.1 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |

| | | | | | |
|---------|---------------|---|-----------------|-----|-----------------|
| 215000 | 5.0 ± 0.1 | 1 | 9.1 ± 0.2 | 2 | 5.4 ± 0.3 |
| 464000 | 5.0 ± 0.1 | 1 | 9.1 ± 0.2 | 2 | 5.3 ± 0.3 |
| 1000000 | 5.1 ± 0.1 | 1 | 5.9 ± 0.2 | 2 | 1.3 ± 0.3 |
| 2150000 | 5.1 ± 0.1 | 1 | 2.42 ± 0.05 | 0.5 | -6.5 ± 0.3 |
| 4640000 | 5.2 ± 0.1 | 1 | 0.70 ± 0.01 | 0.1 | -17.4 ± 0.2 |



Fit orizzontale ($y = a$):

$$a = (5.40 \pm 0.03) \text{ dB}$$

Fit obliquo ($y = a + bx$):

$$a = (136 \pm 2) \text{ dB}$$

$$b = (-22.8 \pm 0.3) \text{ dB/decade}$$

Le due rette si intersecano nel grafico di Bode in $x_{int} = 6 \pm 3$, quindi:

$$f_t = (0.5 \pm 3.4) \text{ MHz}$$

dove

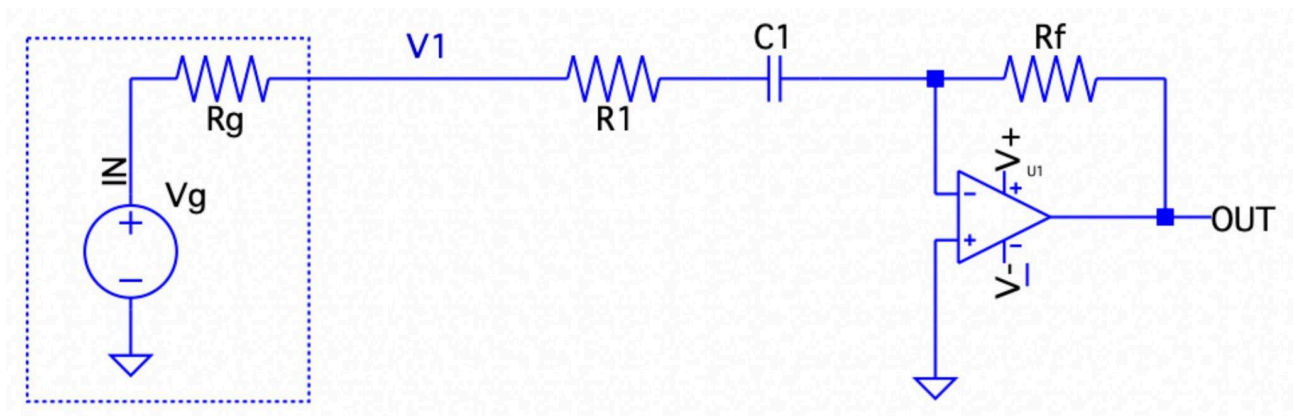
$$x_{int} = \frac{a_{or} - a_{obl}}{b_{obl}} \quad \sigma_{x_{int}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{a_{or}}}{b_{obl}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{a_{obl}}}{b_{obl}}\right)^2 + \left(\frac{a_{or} - a_{obl}}{b_{obl}^2}\right)^2 \sigma_{b_{obl}}^2 + cov[a_{obl}, b_{obl}] \sigma_{a_{obl}} \sigma_{b_{obl}}}$$

$$f_t = 10^{x_{int}} \quad \sigma_{f_t} = f_t (\ln(10) \sigma_{x_{int}})$$

Il motivo di una così elevata incertezza sta nel fatto che, per come è strutturato un asse in scala logaritmica, un'incertezza anche modesta sull'ascissa del grafico di Bode corrisponde a un'enorme incertezza sulla grandezza (anche di qualche ordine di grandezza)

3) Realizzazione di un circuito derivatore

Schema circuito derivatore:



Componenti utilizzate:

- $R_1 = (8.170 \pm 0.005) \text{ K}\Omega$
- $R_f = (14.98 \pm 0.01) \text{ K}\Omega$
- $C_1 = (0.65 \pm 0.02) \text{ nf}$

Frequenza di taglio teorica:

- $f_{teo} = (30.0 \pm 0.2) \text{ KHz}$
- $\mathcal{E} = 0.7 \%$

Dati raccolti:

| f [kHz] | V _{in} [V] | V/div [V] | V _{out} [V] | V/div [V] |
|---------|---------------------|-----------|----------------------|-----------|
| 0.100 | 1.03 ± 0.04 | 0.20 | 0.020 ± 0.002 | 0.02 |
| 0.215 | 1.04 ± 0.04 | 0.20 | 0.020 ± 0.002 | 0.02 |
| 0.464 | 1.01 ± 0.04 | 0.20 | 0.020 ± 0.002 | 0.02 |

| | | | | |
|------|-----------------|------|-------------------|------|
| 1 | 1.01 ± 0.04 | 0.20 | 0.061 ± 0.003 | 0.02 |
| 2.15 | 1.01 ± 0.04 | 0.20 | 0.132 ± 0.004 | 0.02 |
| 4.64 | 1.01 ± 0.04 | 0.20 | 0.28 ± 0.01 | 0.05 |
| 10 | 0.99 ± 0.04 | 0.20 | 0.56 ± 0.02 | 0.1 |
| 18.2 | 1.00 ± 0.04 | 0.20 | 0.93 ± 0.03 | 0.2 |
| 18.5 | 1.00 ± 0.04 | 0.20 | 0.94 ± 0.03 | 0.2 |
| 18.8 | 1.03 ± 0.04 | 0.20 | 0.95 ± 0.03 | 0.2 |
| 19.1 | 1.00 ± 0.04 | 0.20 | 0.96 ± 0.04 | 0.2 |
| 19.4 | 1.02 ± 0.04 | 0.20 | 0.98 ± 0.04 | 0.2 |
| 21.5 | 1.02 ± 0.04 | 0.20 | 1.06 ± 0.04 | 0.2 |
| 46.4 | 1.00 ± 0.04 | 0.20 | 1.56 ± 0.07 | 0.5 |
| 100 | 1.00 ± 0.04 | 0.20 | 1.80 ± 0.07 | 0.5 |
| 215 | 1.00 ± 0.04 | 0.20 | 1.88 ± 0.08 | 0.5 |
| 464 | 1.00 ± 0.04 | 0.20 | 1.88 ± 0.08 | 0.5 |
| 1000 | 1.00 ± 0.04 | 0.20 | 1.52 ± 0.07 | 0.5 |

Verifica qualitativa (tramite oscilloscopio) della corretta costruzione di un circuito derivatore:

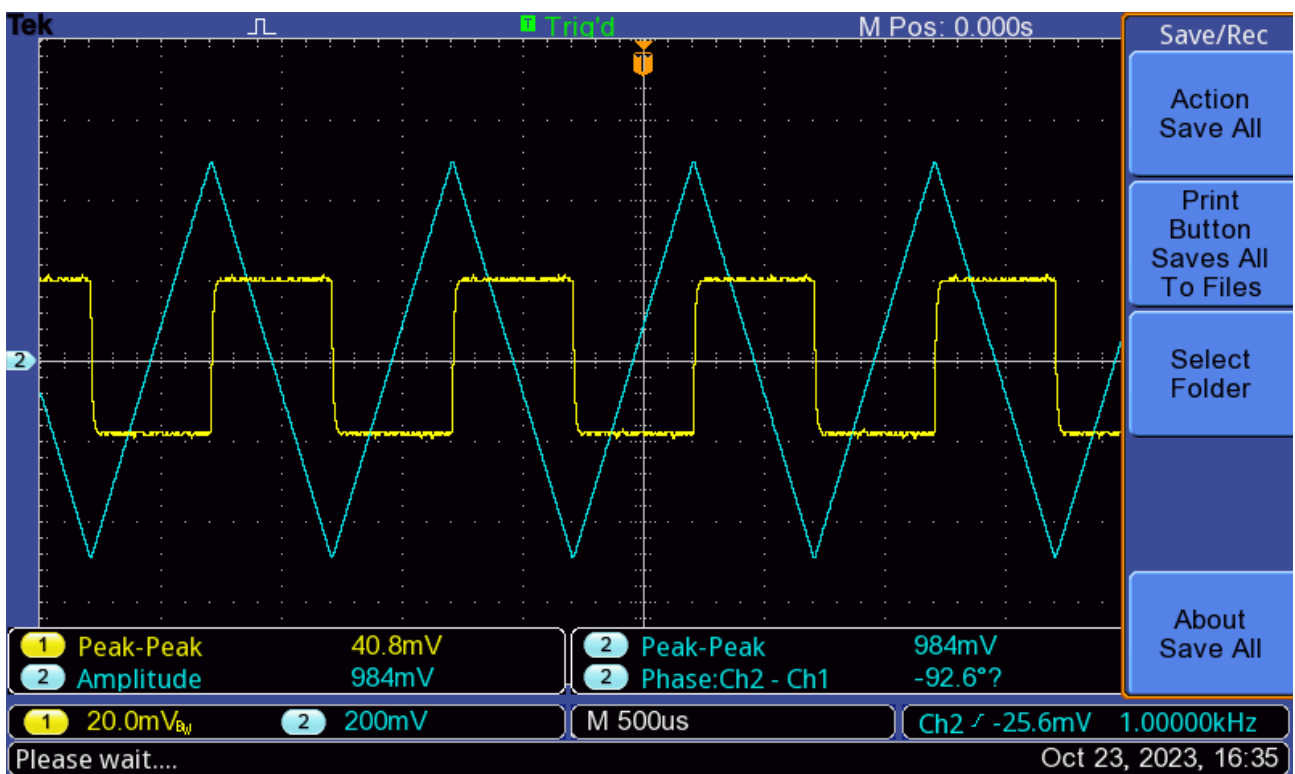
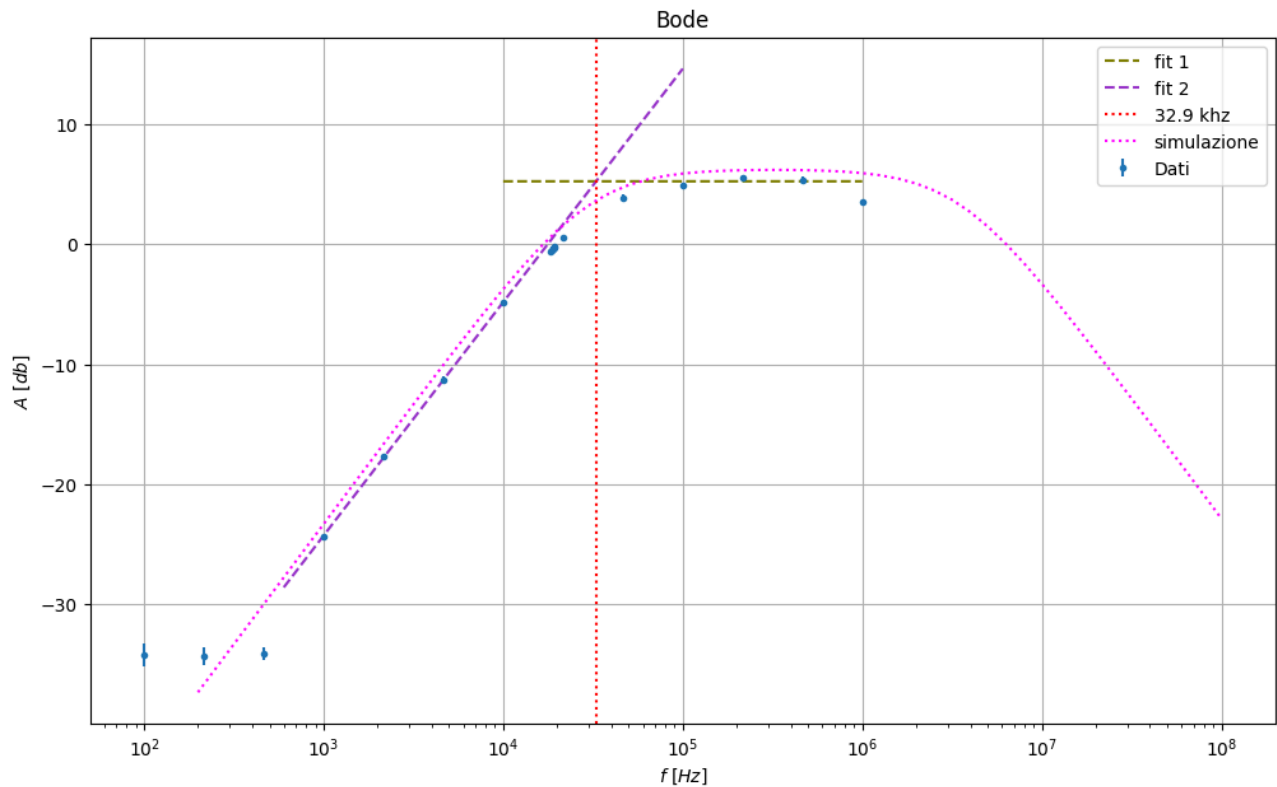


Grafico di Bode:



Fit obliquo ($y = a + bx$) :

- $a = (-82.5 \pm 0.6) \text{ dB}$
- $b = (19.4 \pm 0.2) \text{ dB / decade}$

Fit orizzontale ($y = a$) :

- $a = (5.2 \pm 0.2) \text{ dB}$

Intersezione:

$$4.5 \pm 0.1$$

da cui ricaviamo che la seguente frequenza di taglio:

- $f_{\text{taglio}} = (33 \pm 7) \text{ KHz}$

Per la simulazione otteniamo invece:

Fit obliquo ($y = a + bx$) :

- $a = (-83.06 \pm 0.06) \text{ dB}$
- $b = (19.91 \pm 0.02) \text{ dB / decade}$

Fit orizzontale ($y = a$) :

- $a = (6.11 \pm 0.02) \text{ dB}$

Intersezione:

$$4.47 \pm 0.08$$

da cui ricaviamo che la seguente frequenza di taglio:

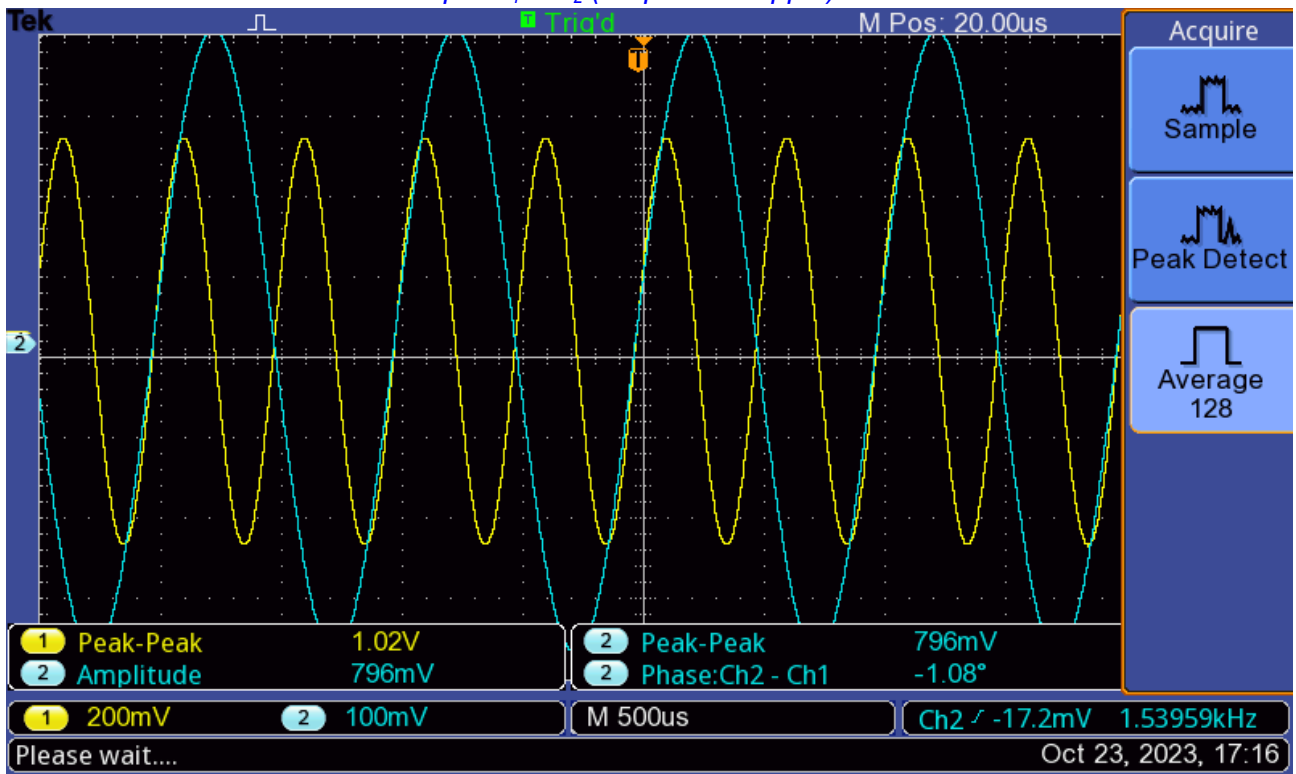
$$- f_{\text{taglio}} = (30 \pm 6) \text{ KHz}$$

Compatibilità delle misure:

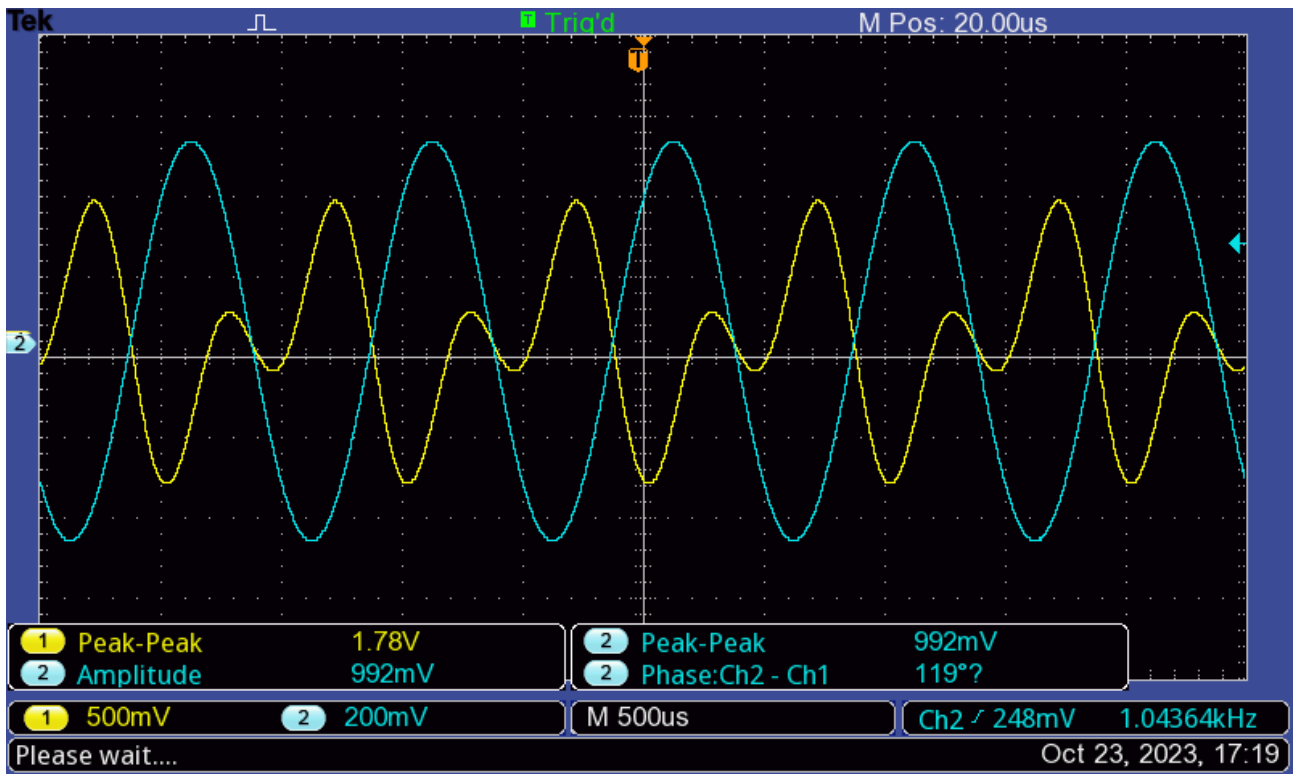
- teorico - bode: 31
- teorico - simulazione: 1

4) Circuito sommatore invertente

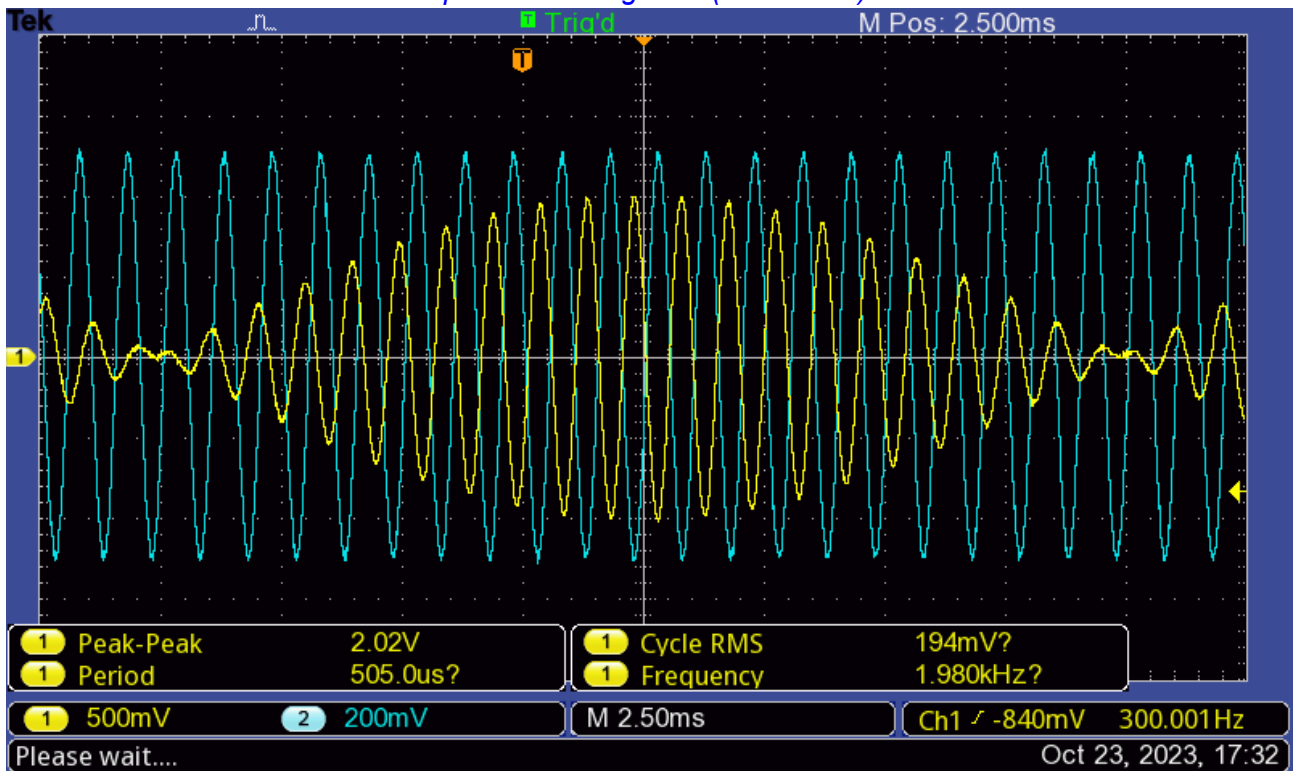
Inserire screenshot/foto oscilloscopio V_1 e V_2 (frequenza doppia)



Inserire screenshot/foto oscilloscopio V_1 e V_{out} (frequenza doppia)



Inserire screenshot/foto oscilloscopio onda triangolare (battimento)

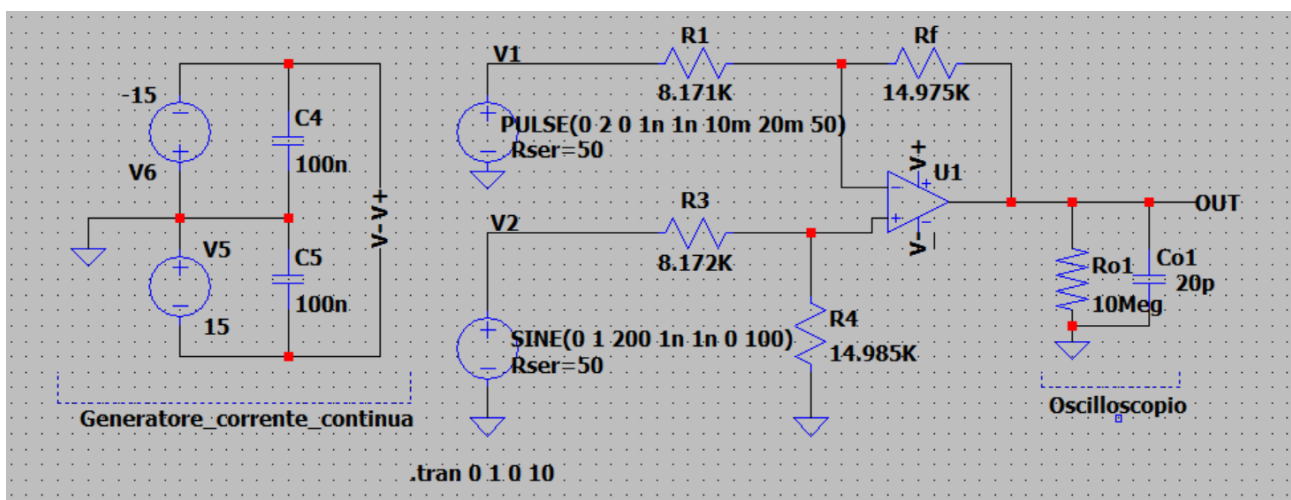


5) Amplificatore delle differenze - amplificatore non-invertente - CMRR

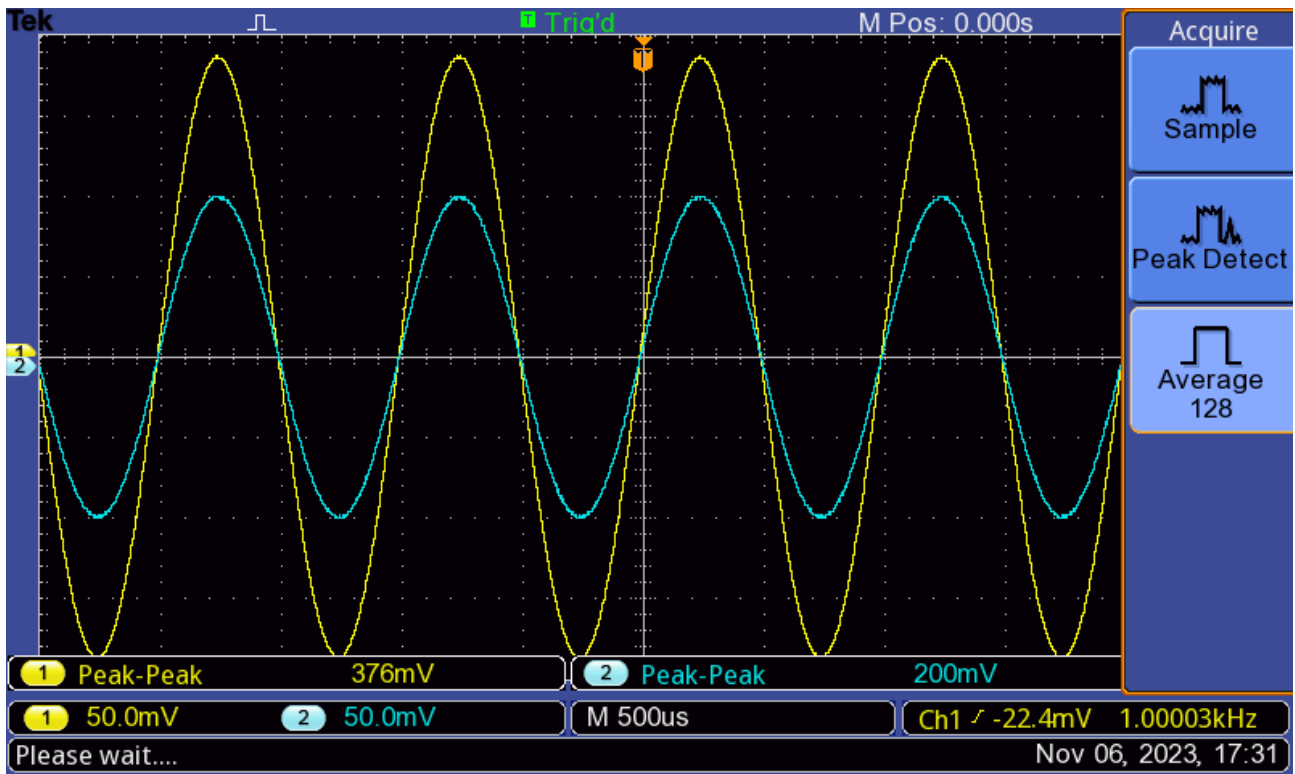
Lo scopo della 5° esperienza è la verifica sperimentale del corretto funzionamento dell'amplificatore non invertente, dell'amplificatore alle differenze e per concludere la stima del CMRR (common mode rejection ratio).

Riportiamo lo schema del circuito con i rispettivi valori dei componenti a costanti concentrate del circuito.

- $R1 = (8.171 \pm 0.006) \text{ k}\Omega$
- $R_f = (14.975 \pm 0.007) \text{ k}\Omega$
- $R3 = (8.172 \pm 0.006) \text{ k}\Omega$
- $R4 = (14.985 \pm 0.07) \text{ k}\Omega$



Inizialmente si costruisce un amplificatore non-invertente mettendo a massa il generatore V1. Il seguente screenshot dell'oscilloscopio raffigura la V_{in} corrispondente all'onda sinusoidale di colore celeste con frequenza 1 kHz e $V_{pp} = 0.2V$ e la V_{out} in giallo.



Verifica configurazione amplificatore non-invertente, $f = 1$ kHz onda sinusoidale

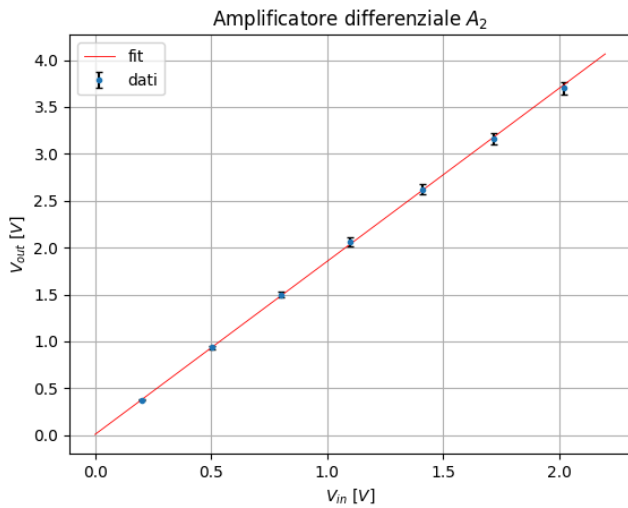
| V_{in} [V] | V/div [V] | V_{out} [V] | V/div [V] |
|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| 0.200 ± 0.004 | 0.050 | 0.113 ± 0.007 | 0.020 |
| 0.504 ± 0.010 | 0.100 | 0.300 ± 0.020 | 0.050 |
| 0.804 ± 0.015 | 0.200 | 0.528 ± 0.028 | 0.100 |
| 1.100 ± 0.022 | 0.200 | 0.720 ± 0.046 | 0.100 |
| 1.410 ± 0.027 | 0.200 | 0.920 ± 0.054 | 0.200 |
| 1.720 ± 0.041 | 0.500 | 1.120 ± 0.062 | 0.200 |
| 2.020 ± 0.045 | 0.500 | 1.310 ± 0.070 | 0.200 |

Grafico del fit lineare

La formula per la stima teorica del guadagno dell'amplificatore con il relativo errore dato dalla propagazione è:

$$A = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \quad \sigma_A = A \sqrt{\left(\frac{\sigma_{R_4}}{R_4} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_3}^2 + \sigma_{R_4}^2}{R_3 + R_4} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_1}^2 + \sigma_{R_f}^2}{R_1 + R_f} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_4}}{R_4} \right)^2}$$

$A_{teorico} = 1.833 \pm 0.002$ $A_{fit} = 1.844 \pm 0.020$ che è l'amplificazione A_2 usata per la stima del CMRR



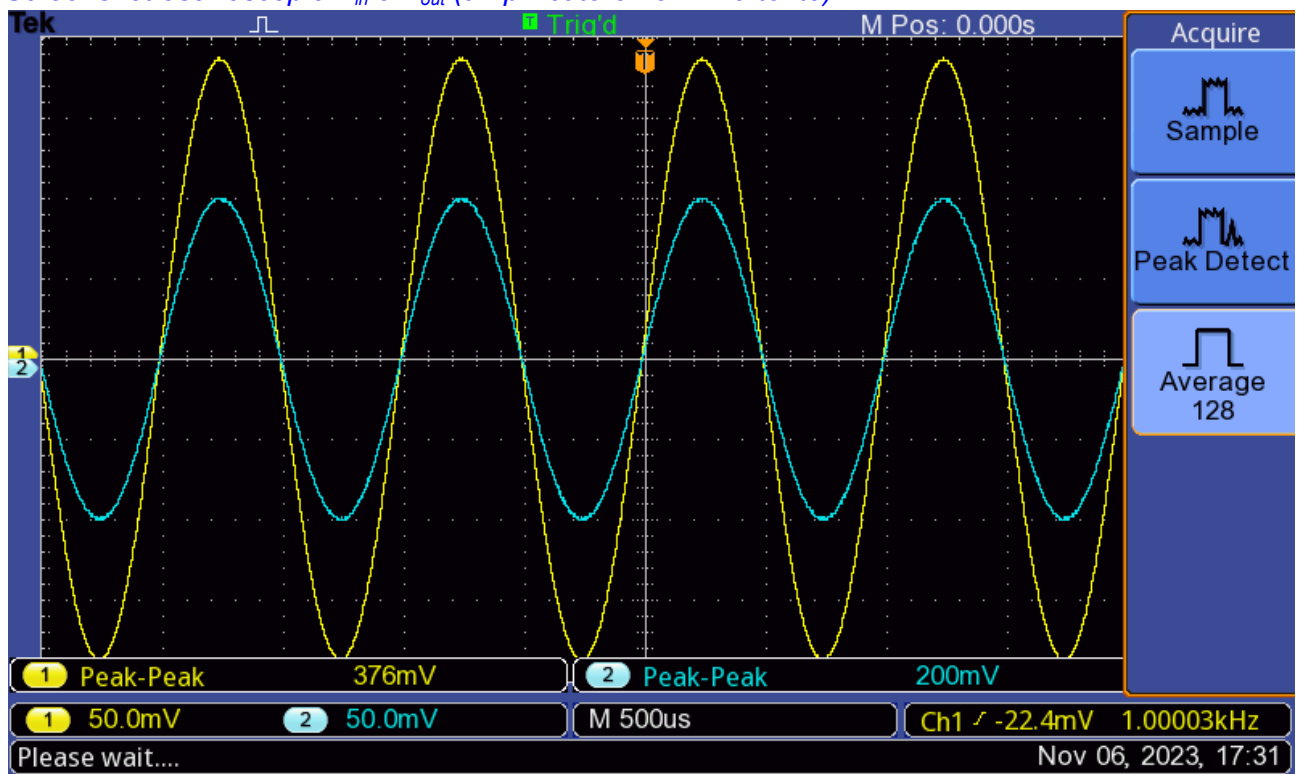
Tali stime risultano avere ottima compatibilità $r = 0.57$

Inoltre il coefficiente di correlazione di pearson mostra il perfetto accordo con l'ipotesi di linearità

$\rho = 0.999$

Infine è stato eseguito anche il test del χ^2 con $NDOF = 5$ $\chi^2 = 0.76$ il quale ci induce a pensare che le incertezze sono state sovrastimate

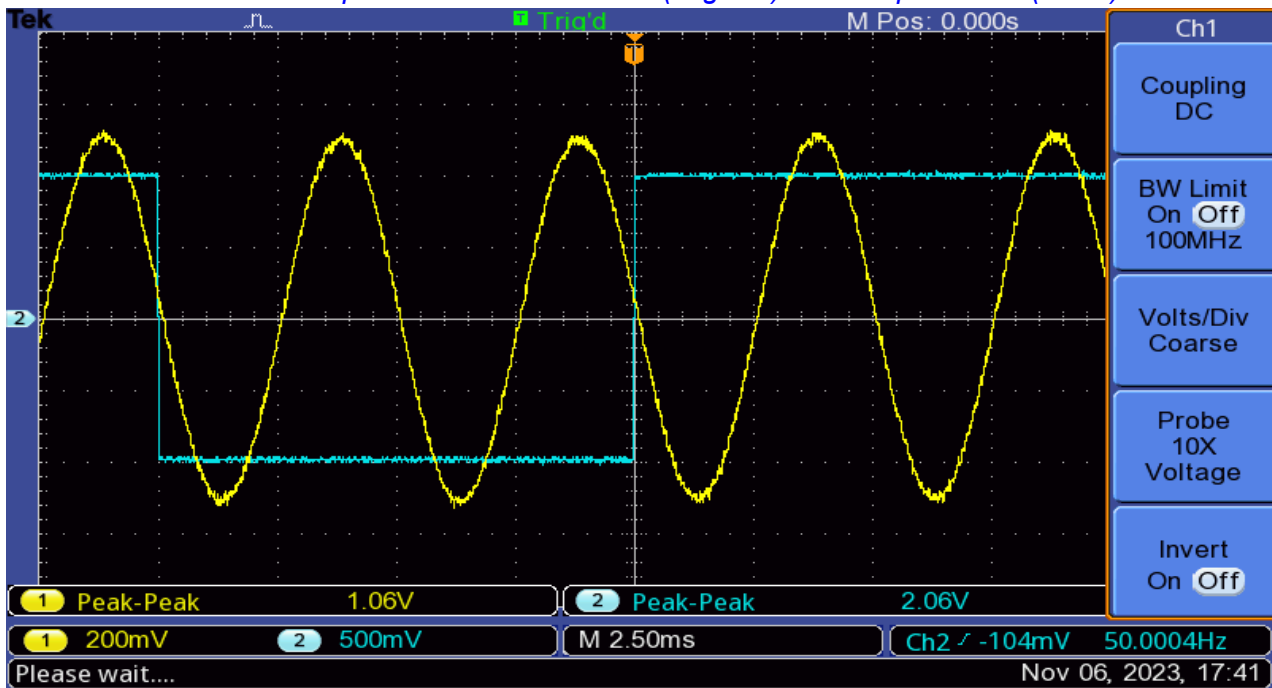
Screenshot oscilloscopio V_{in} e V_{out} (amplificatore non invertente)



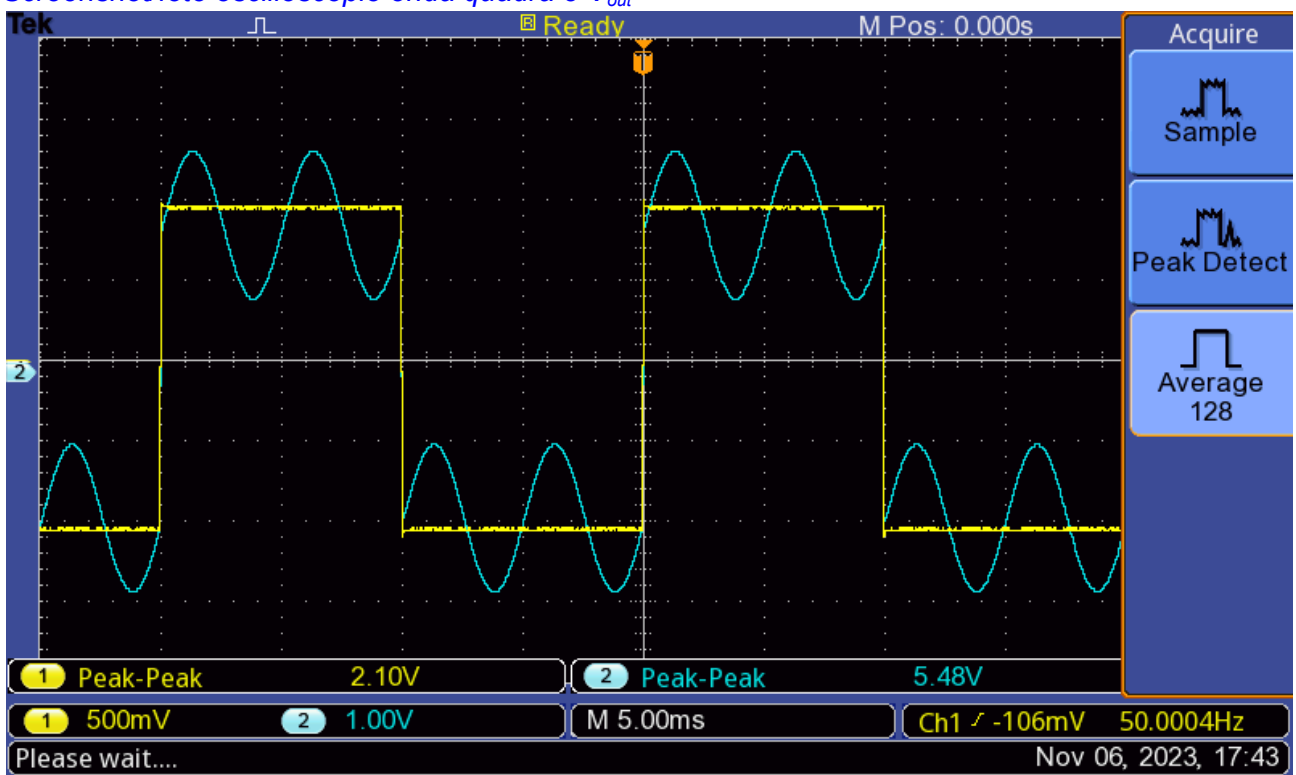
Analisi dell'amplificatore alle differenze

Inizialmente è stata impostata un'onda quadra nel generatore V1 con ampiezza picco-picco $V = 2V$ e frequenza $f = 50Hz$, mentre nel canale 2 è stata scelta un'onda sinusoidale con ampiezza picco-picco $V = 1V$ e frequenza $f = 200Hz$

Screenshot/foto oscilloscopio onde sinusoidale V2 (in giallo) e onda quadra V1 (in blu)



Screenshot/foto oscilloscopio onda quadra e V_{out}

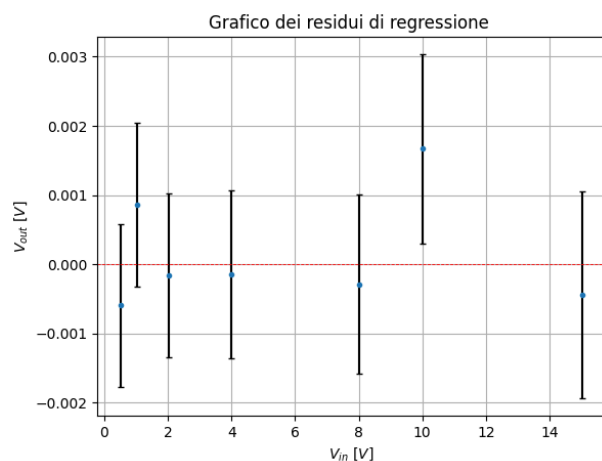
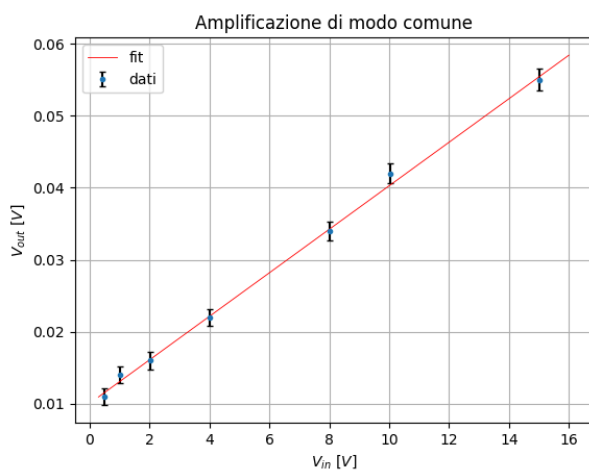


5.1) Misura dell'amplificazione di modo comune A_c

In accordo con il modello teorico sono state impostate le stesse tensioni per entrambi i generatori, onda sinusoidale con frequenza $f = 500 \text{ Hz}$

| $V_{in} \text{ [V]}$ | $V/div \text{ [V]}$ | $V_{out} \text{ [V]}$ | $V/div \text{ [V]}$ |
|----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| 0.510 ± 0.014 | 0.2 | 0.011 ± 0.001 | 0.02 |
| 1.020 ± 0.021 | 0.2 | 0.014 ± 0.001 | 0.02 |
| 2.020 ± 0.045 | 0.2 | 0.016 ± 0.001 | 0.02 |
| 4.000 ± 0.090 | 1 | 0.022 ± 0.001 | 0.02 |
| 8.020 ± 0.181 | 2 | 0.034 ± 0.001 | 0.02 |
| 10.020 ± 0.209 | 2 | 0.042 ± 0.001 | 0.02 |
| 15.020 ± 0.389 | 5 | 0.055 ± 0.001 | 0.02 |

Riportiamo ora il fit lineare e il grafico dei residui che ci ha permesso di ottenere la stima sperimentale dell'amplificazione di modo comune:



Fit lineare: $y = a + bx$

$b = 0.0030 \pm 0.0001$

Coefficiente di correlazione di Pearson $\rho = 0.99 \pm 0.02$

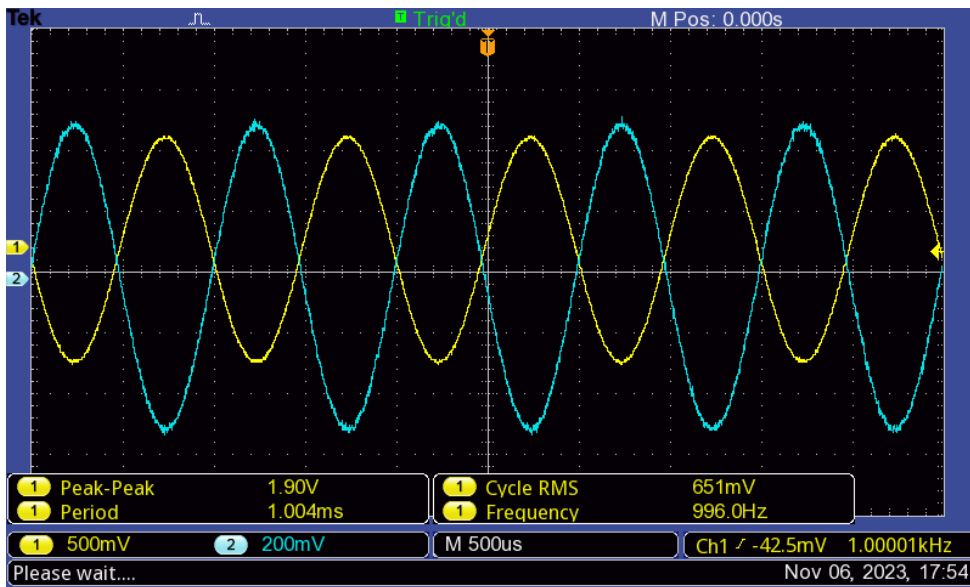
Errore a posteriori $\delta = 0.9 \text{ mV}$

$\chi^2 = 2.5$ con NDOF = 5

Ottima compatibilità tra valore teorico e sperimentale:

$r = 1.08$

Inserire screenshot/foto oscilloscopio V_{in} e V_{out} (misura di A_c)



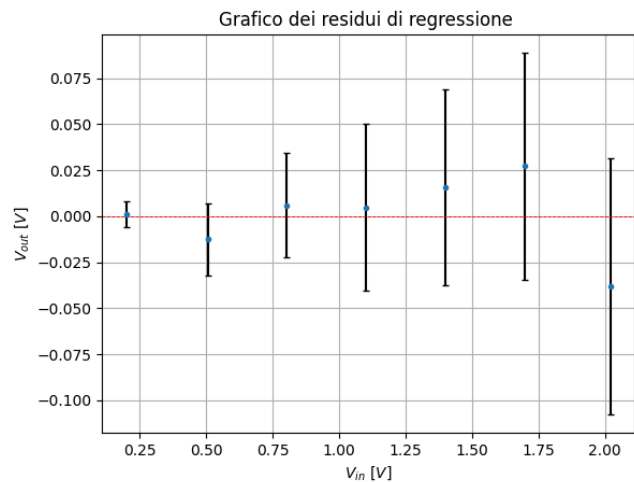
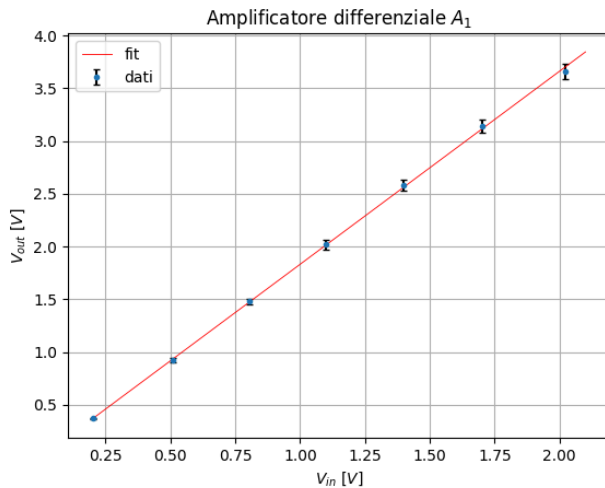
5.2) misura dell'amplificazione differenziale A_D

$f = 1 \text{ kHz}$

Ricaviamo l'amplificazione A_1 mettendo a massa il generatore 2.

| $V_{IN} [V]$ | $V/div [V]$ | $V_{OUT} [V]$ | $V/div [V]$ |
|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| 0.200 ± 0.004 | 0.050 | 0.370 ± 0.007 | 0.05 |
| 0.508 ± 0.010 | 0.100 | 0.920 ± 0.020 | 0.2 |
| 0.804 ± 0.015 | 0.100 | 1.48 ± 0.028 | 0.2 |
| 1.100 ± 0.023 | 0.200 | 2.02 ± 0.045 | 0.5 |
| 1.400 ± 0.027 | 0.200 | 2.58 ± 0.053 | 0.5 |
| 1.700 ± 0.032 | 0.200 | 3.14 ± 0.062 | 0.5 |
| 2.020 ± 0.045 | 0.500 | 3.66 ± 0.069 | 0.5 |

Riportiamo ora il fit lineare e il grafico dei residui che ci ha permesso di ottenere la stima sperimentale dell'amplificazione A_1



Fit lineare: $y = a + bx$

$b = 1.83 \pm 0.02$

Coefficiente di correlazione di Pearson $\rho = 0.999 \pm 0.007$

Errore a posteriori $\delta = 23\text{mV}$

$\chi^2 = 1.06$ con NDOF = 5

Ottima compatibilità tra valore teorico e sperimentale:

$r = 0.18$

5.3) calcolo di CMRR

Stima del CMRR teorica è: $CMRR = 20 \log_{10} \frac{|A_d|}{|A_c|}$

dove si è considerato A_d come la media aritmetica tra A_1 e A_2 .

CMRR teorico = 74 ± 3

CMRR sperim = 55 ± 0.3

La stima risulta incompatibile $r = 6.2$ reputiamo che la causa di tale sottostima sia dovuta alla discrepanza tra le resistenze del circuito perché in linea teorica il A_c dovrebbe tendere a 0, ma la differenza tra il rapporto delle resistenze R_f/R_1 e R_4/R_3 provoca così una sovrastima del A_c e quindi un CMRR minore.

6) Catena elettronica: Generatore dei segnali e preamplificatore di carica

$R_{IN} = (45.97 \pm 0.02) \text{ k}\Omega$

$C_{f_{pre}} = (340 \pm 10) \text{ pF}$ / $R_{f_{pre}} = (558.1 \pm 0.2) \text{ k}\Omega$

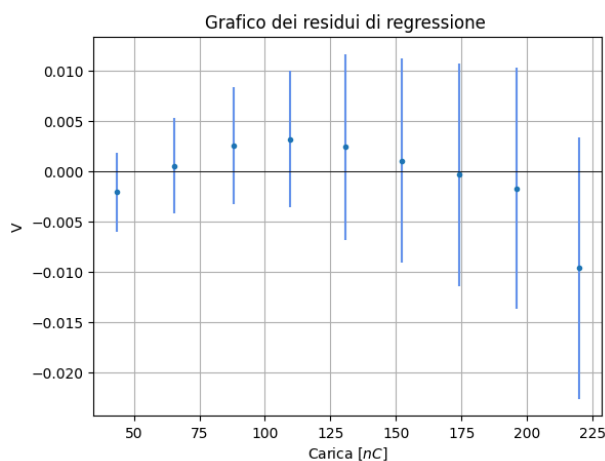
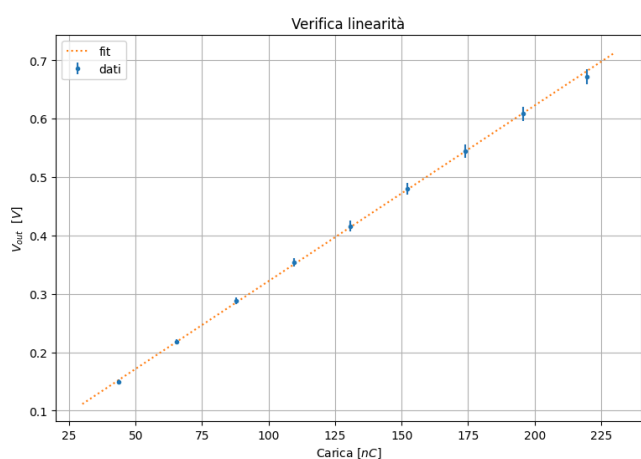
$\tau_{pre} = (191 \pm 6) \mu\text{s}$ / $V_{pre}^{max} = (0.313 \pm 0.003) \text{ V}$

6.1) Verifica della linearità del preamplificatore

T è il periodo impostato sul generatore di frequenze, Δt quello misurato sull'oscilloscopio

| T [μs] | Δt [μs] | V [V] |
|---------------------|------------------------------|-------|
|---------------------|------------------------------|-------|

| | | |
|----|------|-------------------|
| 2 | 2.00 | 0.150 ± 0.004 |
| 3 | 3.00 | 0.218 ± 0.005 |
| 4 | 4.04 | 0.288 ± 0.006 |
| 5 | 5.04 | 0.354 ± 0.007 |
| 6 | 6.00 | 0.416 ± 0.009 |
| 7 | 7.00 | 0.48 ± 0.01 |
| 8 | 8.00 | 0.54 ± 0.01 |
| 9 | 9.00 | 0.61 ± 0.01 |
| 10 | 10.1 | 0.67 ± 0.01 |



Risultati fit ($y = a + bx$):

$a = (21 \pm 5) \text{ mV}$;

$b = (3.00 \pm 0.05) \text{ mV/nC}$;

$\chi^2 = 1.4$ ($NDOF = 7$)

$\rho = 1.000 \pm 0.007$;

$\delta = 4 \text{ mV}$;

Il χ^2 è buono, ρ sembrerebbe giustificare l'ipotesi lineare, e δ è confrontabile con gli errori in ordinata. Tuttavia, i residui sembrano avere un andamento non standard. Ciò significa che, nonostante l'approssimazione lineare sia buona, il processo di carica del condensatore di fatto non segue un modello lineare, ma uno più complesso (per il quale non sono stati fatti ulteriori approfondimenti).

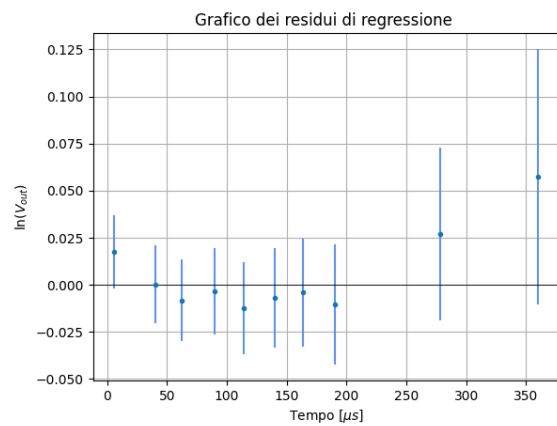
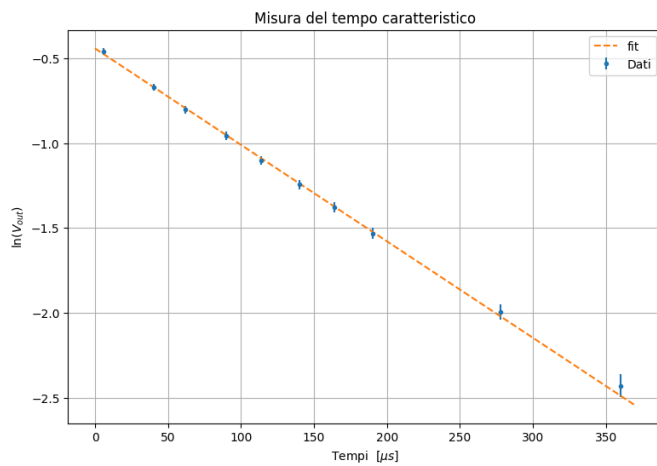
6.2) Tempo caratteristico

$t/\text{div} = 50 \text{ ms}$

I seguenti tempi verranno poi sottratti di $10 \mu\text{s}$ in fase d'analisi (offset dato dal fatto che lo zero dei tempi sull'oscilloscopio non corrisponde all'inizio della curva di scarica)

| $t [\mu\text{s}]$ | $V_{\text{OUT}} [\text{V}]$ | V/div |
|-------------------|-----------------------------|----------------|
|-------------------|-----------------------------|----------------|

| | | |
|-----|-------------------|-----|
| 16 | 0.63 ± 0.01 | 0.1 |
| 50 | 0.51 ± 0.01 | 0.1 |
| 72 | 0.45 ± 0.01 | 0.1 |
| 100 | 0.384 ± 0.009 | 0.1 |
| 124 | 0.332 ± 0.008 | 0.1 |
| 150 | 0.288 ± 0.008 | 0.1 |
| 174 | 0.252 ± 0.007 | 0.1 |
| 200 | 0.216 ± 0.007 | 0.1 |
| 288 | 0.136 ± 0.006 | 0.1 |
| 370 | 0.088 ± 0.006 | 0.1 |



Risultati fit ($y = a + bx$):

$$a = -0.44 \pm 0.01$$

$$b = (-0.0057 \pm 0.0001) \mu s^{-1}$$

$$\chi^2 = 2.5 \quad (NDOF = 8)$$

$$\rho = -1.00 \pm 0.01$$

$$\delta = 0.024$$

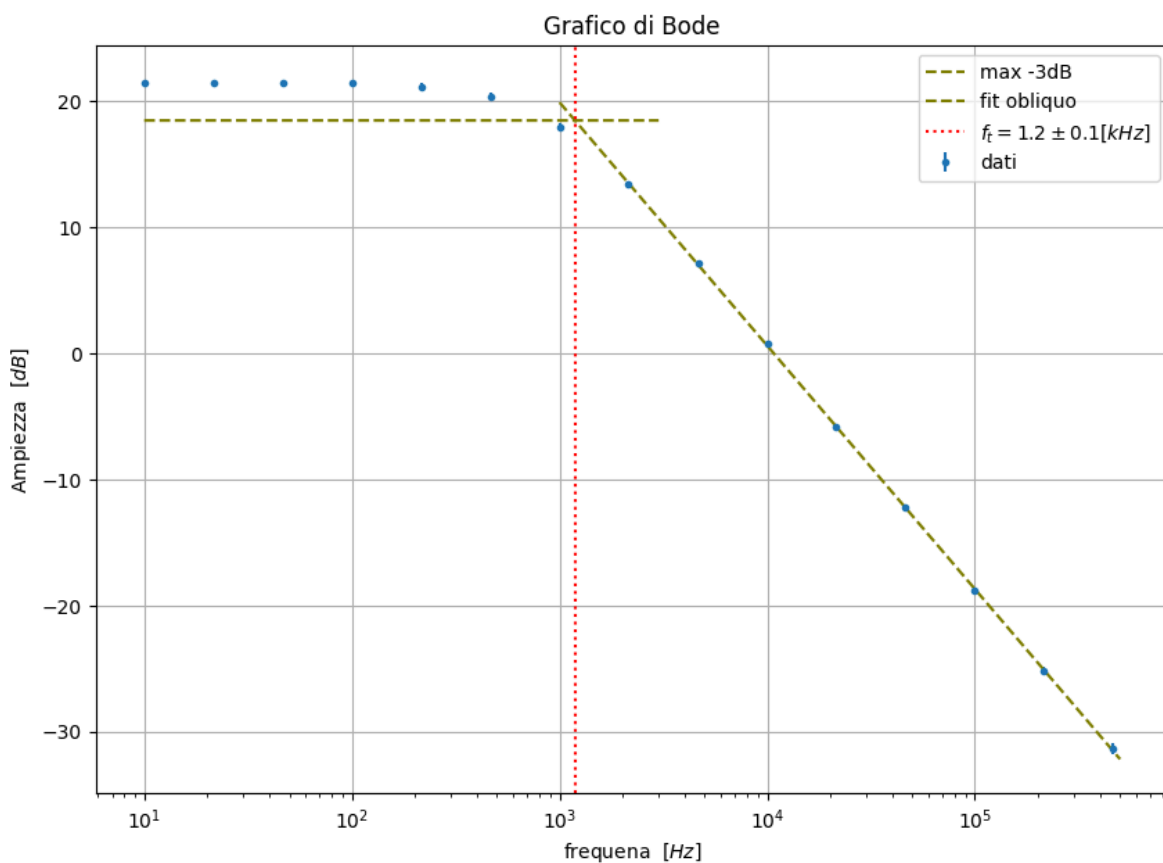
$$\Rightarrow \tau = (176 \pm 3) \mu s$$

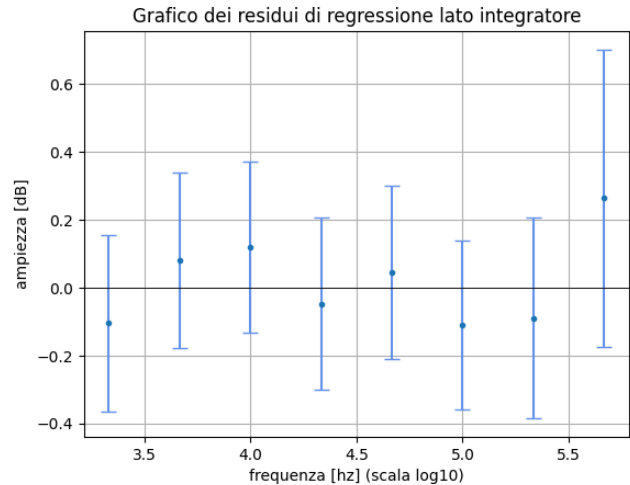
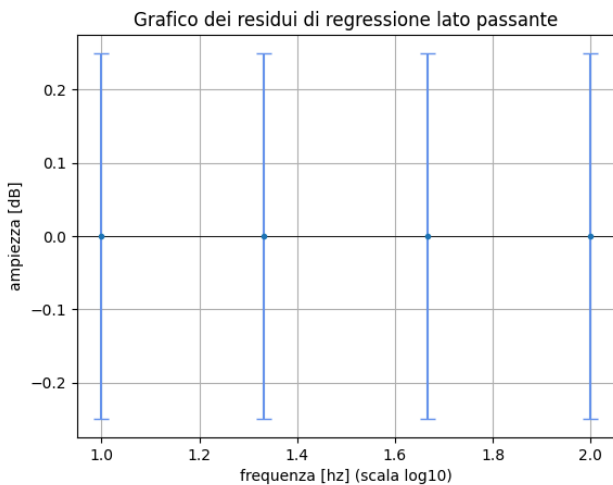
6.3) Risposta in frequenza

| f [kHz] | V_{IN} [V] | V/div | V_{OUT} [V] | V/div [V] | A [dB] |
|---------|-----------------|-------|----------------|-----------|----------------|
| 0.01 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 12.2 ± 0.2 | 2 | 21.6 ± 0.2 |
| 0.0215 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 12.2 ± 0.2 | 2 | 21.6 ± 0.2 |

| | | | | | |
|--------|-----------------|-------|-------------------|-------|-----------------|
| 0.0464 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 12.2 ± 0.2 | 2 | 21.6 ± 0.2 |
| 0.1 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 12.1 ± 0.2 | 2 | 21.6 ± 0.2 |
| 0.215 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 11.8 ± 0.2 | 2 | 21.4 ± 0.3 |
| 0.464 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 10.8 ± 0.2 | 2 | 20.6 ± 0.3 |
| 1 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 8.0 ± 0.2 | 2 | 18.0 ± 0.3 |
| 2.15 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 4.6 ± 0.1 | 1 | 13.2 ± 0.3 |
| 4.64 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 2.26 ± 0.05 | 0.500 | 6.9 ± 0.3 |
| 10 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 1.09 ± 0.02 | 0.200 | 0.6 ± 0.3 |
| 21.5 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 0.51 ± 0.01 | 0.100 | -6.0 ± 0.3 |
| 46.4 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 0.244 ± 0.005 | 0.050 | -12.4 ± 0.3 |
| 100 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 0.115 ± 0.002 | 0.020 | -19.0 ± 0.2 |
| 215 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 0.056 ± 0.002 | 0.020 | -25.2 ± 0.3 |
| 464 | 1.00 ± 0.02 | 0.200 | 0.024 ± 0.001 | 0.020 | -32.0 ± 0.4 |

Per calcolare la frequenza di taglio, si è fatta una regressione lineare orizzontale sui primi 4 punti, una regressione lineare obliqua sugli ultimi 8, e si sono intersecate la prima retta (abbassata di 3 dB) e la seconda





Risultati fit orizzontale ($y = a$)

$$a = (21.6 \pm 0.1) \text{ dB}$$

$$\chi^2 = 1.4 \cdot 10^{-15} \quad (NDOF = 2)$$

Risultati fit obliquo ($y = a + bx$):

$$a = (77.9 \pm 0.6) \text{ dB}$$

$$b = (-19.3 \pm 0.1) \text{ dB/decade}$$

$$\rho = -1.000 \pm 0.003$$

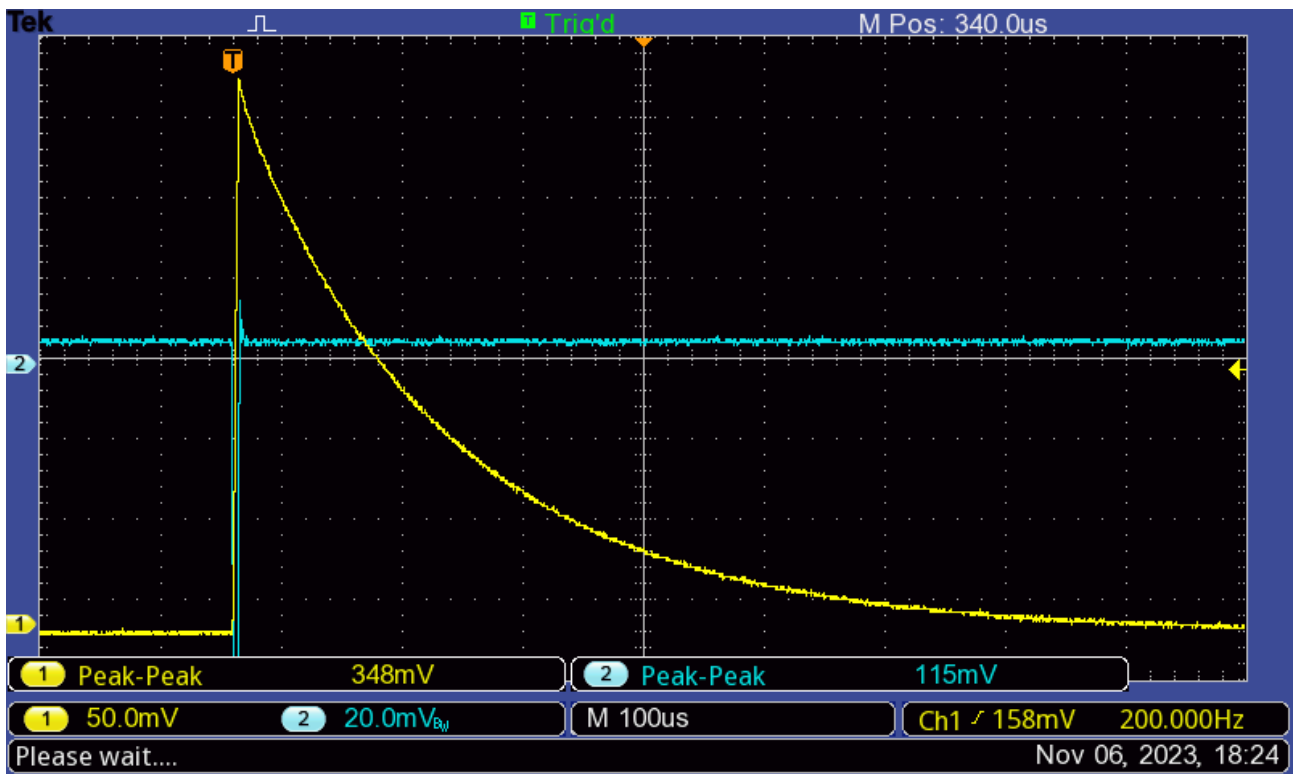
$$\chi^2 = 1.2 \quad (NDOF = 6)$$

$$\delta = 0.1 \text{ dB}$$

Il massimo -3dB e la retta obliqua si intersecano in $x = 3.07 \pm 0.04$, quindi

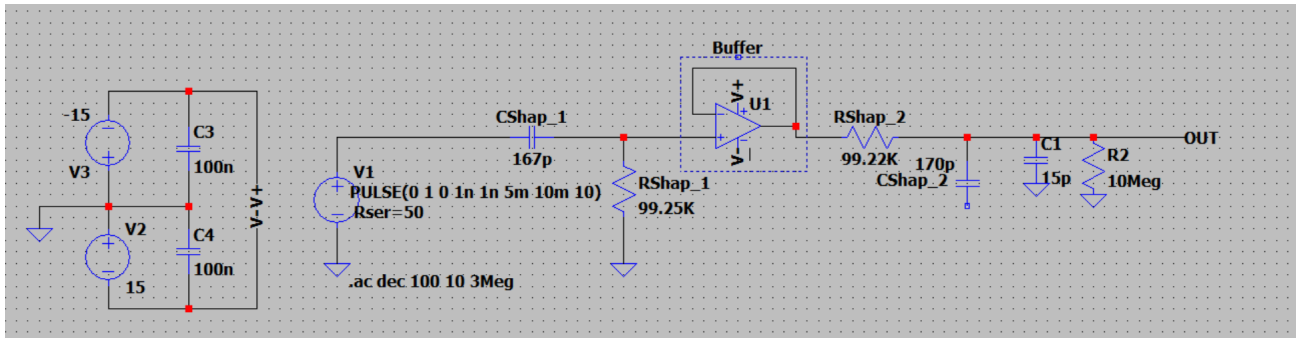
$$f_t = (1.2 \pm 0.1) \text{ kHz}$$

screenshot o foto oscilloscopio V_{IN} e V_{OUT_pre} del punto 1.2



7) Catena elettronica: Circuito formatore

La forma del circuito ed i valori dei componenti circuitali scelti sono riportati nella seguente immagine:



7.1) Shaper base CR-RC

Il tempo caratteristico teorico risulta essere: $\tau_{sh_teo_int} = (16.88 \pm 0.89)\mu s$ per CR (integratore)

$\tau_{sh_teo_der} = (16.66 \pm 0.89)\mu s$ per RC (derivatore)

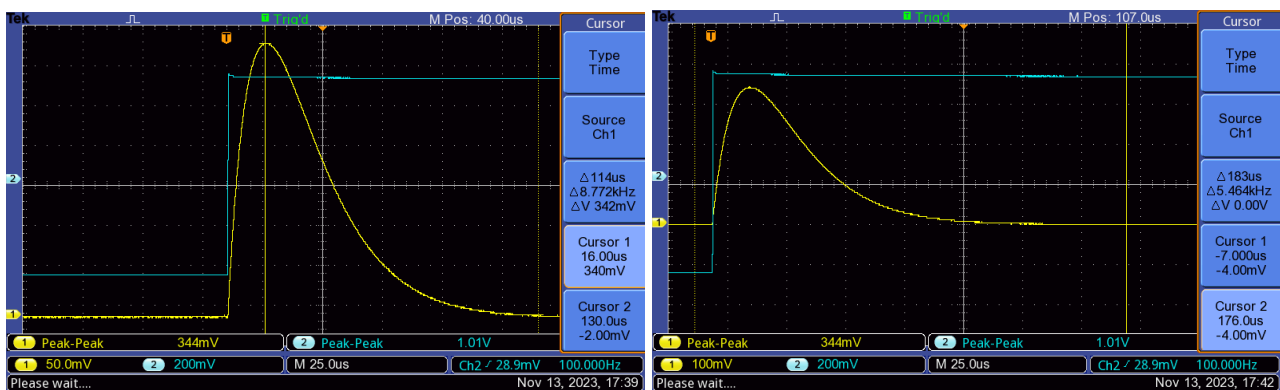
e il $V_{th}^{MAX} = (0.37 \pm 0.02)V$

Con un'onda quadra in ingresso abbiamo misurato le seguenti grandezze caratteristiche:

$V_{sh}^{MAX} = (0.342 \pm 0.008)V$ e $t_{sh}^{MAX} = (16 \pm 1)\mu s$

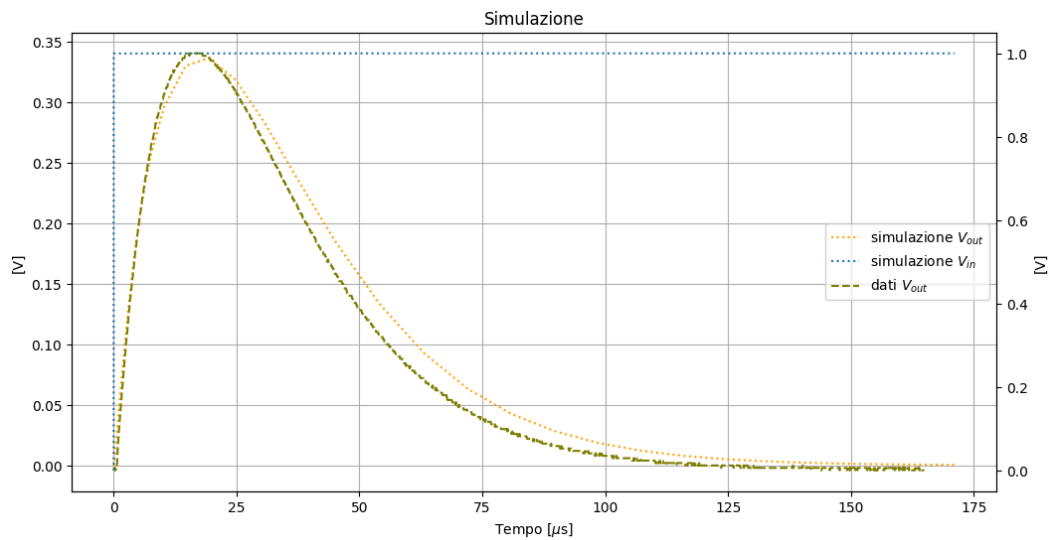
Le 2 stime risultano avere un'ottima compatibilità tra il valore teorico e sperimentale sia per le tensioni, che per i tempi rispettivamente $r = 1.3$ e $r = 0.6$.

Riportiamo ora gli screenshot dell'oscilloscopio che mostrano la tensione nel massimo del segnale e la verifica della baseline dopo $10t_{sh}$. Si discostano al più del 2.5% tra di loro mostrando l'accuratezza della misura.



discostano al più del 2.5% tra di loro mostrando l'accuratezza della misura, misura effettuata con i cursori come si può verificare dagli screenshot riportati.

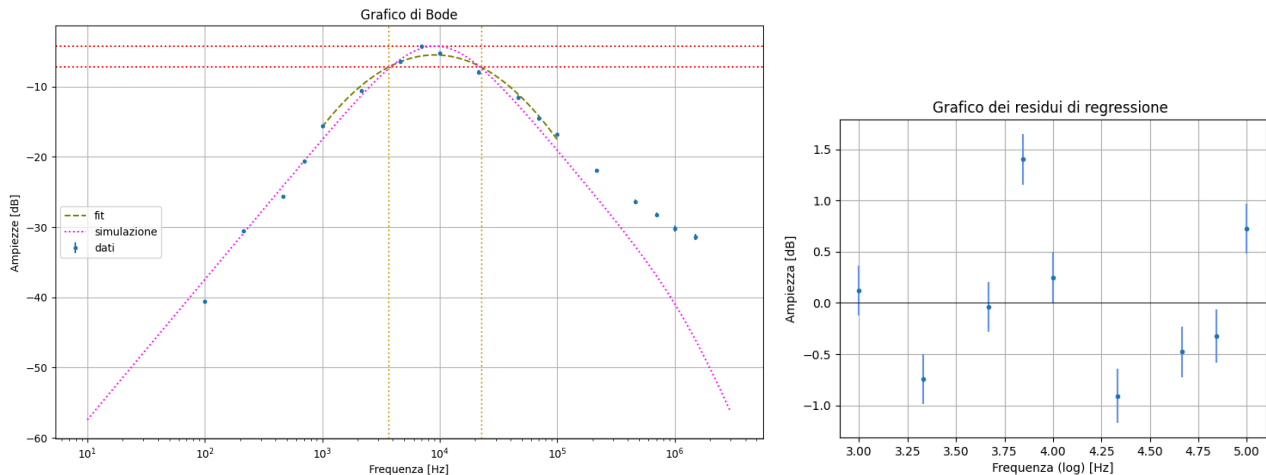
Riportiamo ora il grafico che confronta la simulazione di LTspice con i dati ricavati dall'oscilloscopio



7.2) Risposta in frequenza

| Frequenza [kHz] | V_{IN} [V] | V/div | V_{OUT} [V] | V/div |
|-----------------|-----------------|-------|-------------------|-------|
| 0.1 | 1.04 ± 0.02 | 0.2 | 0.009 ± 0.001 | 0.02 |
| 0.215 | 1.04 ± 0.02 | 0.2 | 0.030 ± 0.001 | 0.02 |
| 0.464 | 1.05 ± 0.02 | 0.2 | 0.052 ± 0.002 | 0.02 |
| 0.7 | 1.05 ± 0.02 | 0.2 | 0.093 ± 0.004 | 0.02 |
| 1 | 1.05 ± 0.02 | 0.2 | 0.166 ± 0.006 | 0.05 |
| 2.15 | 1.05 ± 0.02 | 0.2 | 0.30 ± 0.01 | 0.05 |
| 4.64 | 1.05 ± 0.02 | 0.2 | 0.47 ± 0.01 | 0.1 |
| 7 | 1.05 ± 0.02 | 0.2 | 0.62 ± 0.01 | 0.1 |
| 10 | 1.05 ± 0.02 | 0.2 | 0.54 ± 0.01 | 0.1 |
| 21.5 | 1.05 ± 0.02 | 0.2 | 0.398 ± 0.009 | 0.1 |
| 46.4 | 1.08 ± 0.02 | 0.2 | 0.266 ± 0.006 | 0.05 |
| 70 | 1.10 ± 0.02 | 0.2 | 0.186 ± 0.005 | 0.05 |
| 100 | 1.04 ± 0.02 | 0.2 | 0.145 ± 0.003 | 0.02 |
| 215 | 1.04 ± 0.02 | 0.2 | 0.083 ± 0.002 | 0.02 |
| 464 | 1.04 ± 0.02 | 0.2 | 0.050 ± 0.001 | 0.02 |
| 700 | 1.04 ± 0.02 | 0.2 | 0.040 ± 0.001 | 0.02 |
| 1000 | 1.04 ± 0.02 | 0.2 | 0.032 ± 0.001 | 0.02 |
| 1500 | 1.04 ± 0.02 | 0.2 | 0.028 ± 0.001 | 0.02 |

Riportiamo il Grafico di Bode ottenuto dall'analisi in frequenza e il grafico dei residui:



Con un fit parabolico abbiamo stimato la banda passante del filtro:

Fit: $y = ax^2 + bx + c$:

$a = (-15.1 \pm 0.8) \text{ dB/decade}^2$

$b = (88 \pm 6) \text{ dB/decade}$

$c = (-180 \pm 10) \text{ dB}$

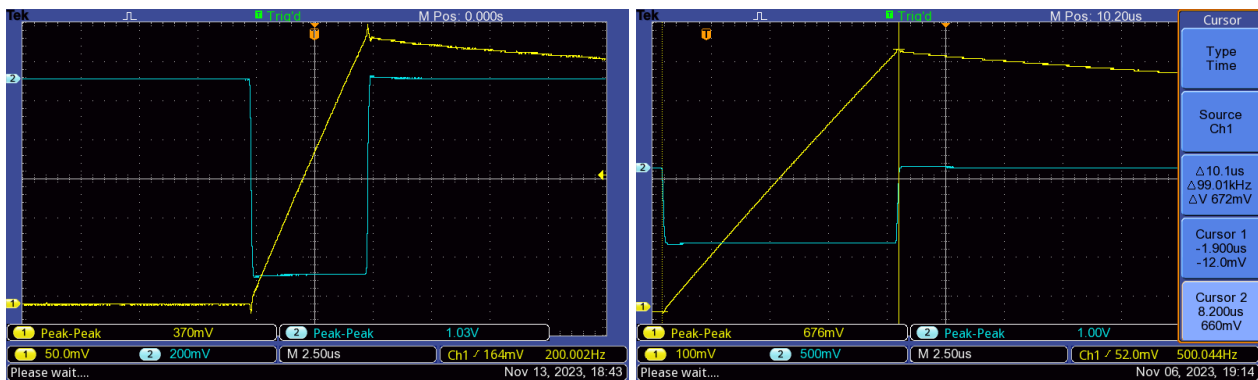
$\chi^2 = 69 \text{ NDOF} = 6$

$\delta = 0.8 \text{ dB}$

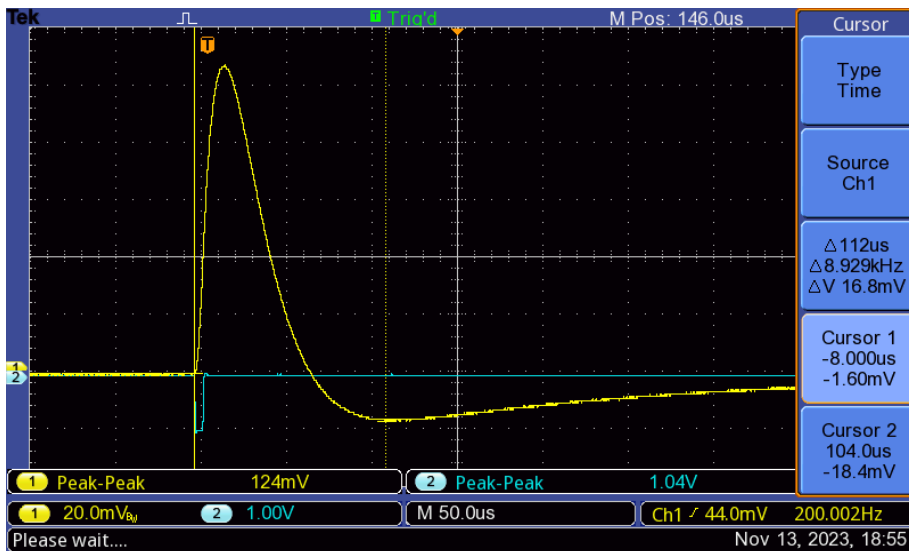
Banda passante: $\Delta f = (19 \pm 11) \text{ kHz}$ ricavata prendendo i 2 punti (frequenza) che intersecano la retta orizzontale a meno -3 dB rispetto al massimo.

7.3) Compensazione Polo-Zero

Riportiamo ora gli screenshot dell'oscilloscopio del segnale in ingresso(screen a sinistra) e in uscita(screen a destra) dallo shaper dove ora è stato collegato l'ingresso dello shaper con il preamplificatore costruito dell'esperienza 6:



Ora riportiamo lo screenshot del segnale in uscita dallo shaper con undershoot, con ampiezza massima del segnale pari $v_{\text{und}}^{\text{max}} = (16.8 \pm 0.2) \text{ mV}$



Per calcolare la compensazione del undershoot o anche chiamata più specificatamente compensazione di Polo-Zero dobbiamo eguagliare i tempi caratteristici del preamplificatore e

$$R_{pz} = \frac{R_f^{pre} * C_f^{pre}}{C_1^{sh}} = (1.13 \pm 0.07) M\Omega$$

dell'integratore CR dello shaper:

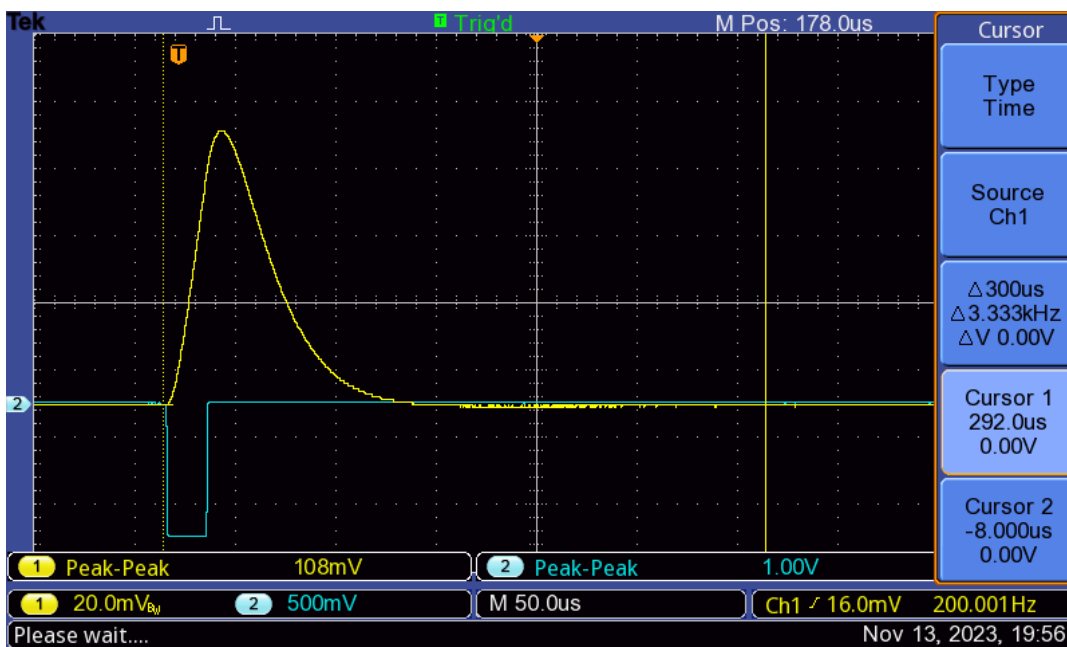
Noi abbiamo messo in serie due resistenze:

$$R_{pz}^1 = (0.2092 \pm 0.0001) M\Omega$$

$$R_{pz}^2 = (0.990 \pm 0.007) M\Omega$$

per un totale di $R_{pz} = (1.199 \pm 0.007) M\Omega$ (compatibile con quella calcolata teoricamente, $r = 1.17$).

• CR-RC modificato con compensazione PZ e ingresso dal preamp



7.4) Effetto dello shaping-time

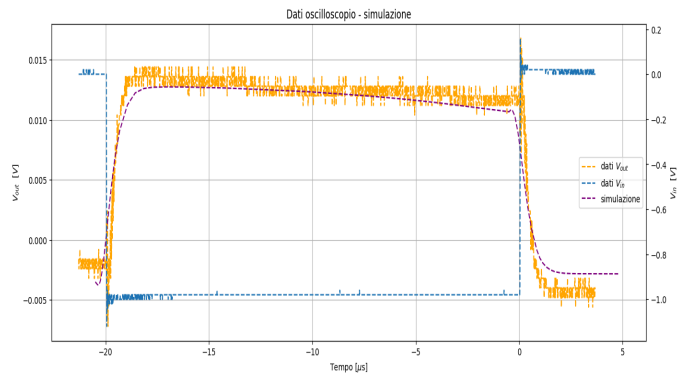
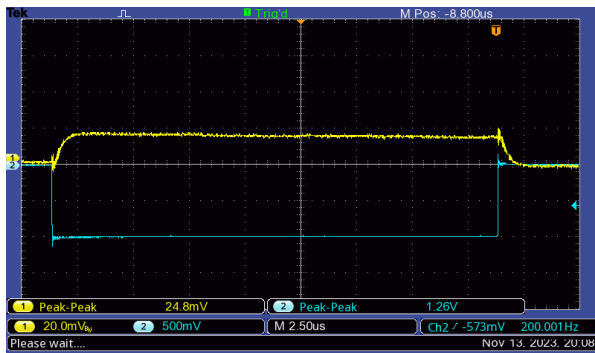
Le nuove resistenze inserite sono:

$$R_1 = (1.4940 \pm 0.0008) k\Omega$$

$$R_2 = (1.4775 \pm 0.0008) k\Omega$$

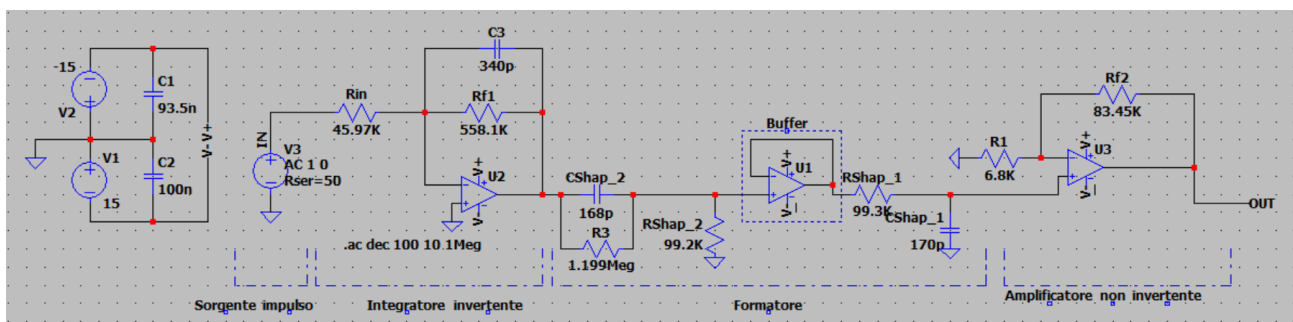
Riportiamo infine lo screenshot dell'oscilloscopio dell'effetto shaping-time e la relativa simulazione

con LTspice.



8) Catena elettronica: Circuito amplificatore in tensione non invertente

Rappresentazione del circuito:



Misura delle componenti:

- Shaper:

$$R1 = (99.20 \pm 0.04) \text{ k}\Omega$$

$$C1 = (168 \pm 9) \text{ pF}$$

$$R2 = (99.30 \pm 0.04) \text{ k}\Omega$$

$$C2 = (170 \pm 9) \text{ pF}$$

- Resistenza di polo zero (serie):

$$R_{pz} = (1.999 \pm 0.007) \text{ M}\Omega$$

data dalle seguenti componenti:

$$R_{pz1} = (219.20 \pm 0.09) \text{ k}\Omega \text{ (scala 1000 k}\Omega\text{)}$$

$$R_{pz2} = (980 \pm 7) \text{ k}\Omega \text{ (scala 10 M}\Omega\text{)}$$

- Amplificatore invertente:

$$R_f = (83.45 \pm 0.03) \text{ k}\Omega \text{ (scala 100 k}\Omega\text{)}$$

$$R_{in} = (6.800 \pm 0.003) \text{ k}\Omega \text{ (scala 10 k}\Omega\text{)}$$

- Preamplificatore:

$$R_{in} = (45.97 \pm 0.02) \text{ k}\Omega \text{ (scala 100 k}\Omega\text{)}$$

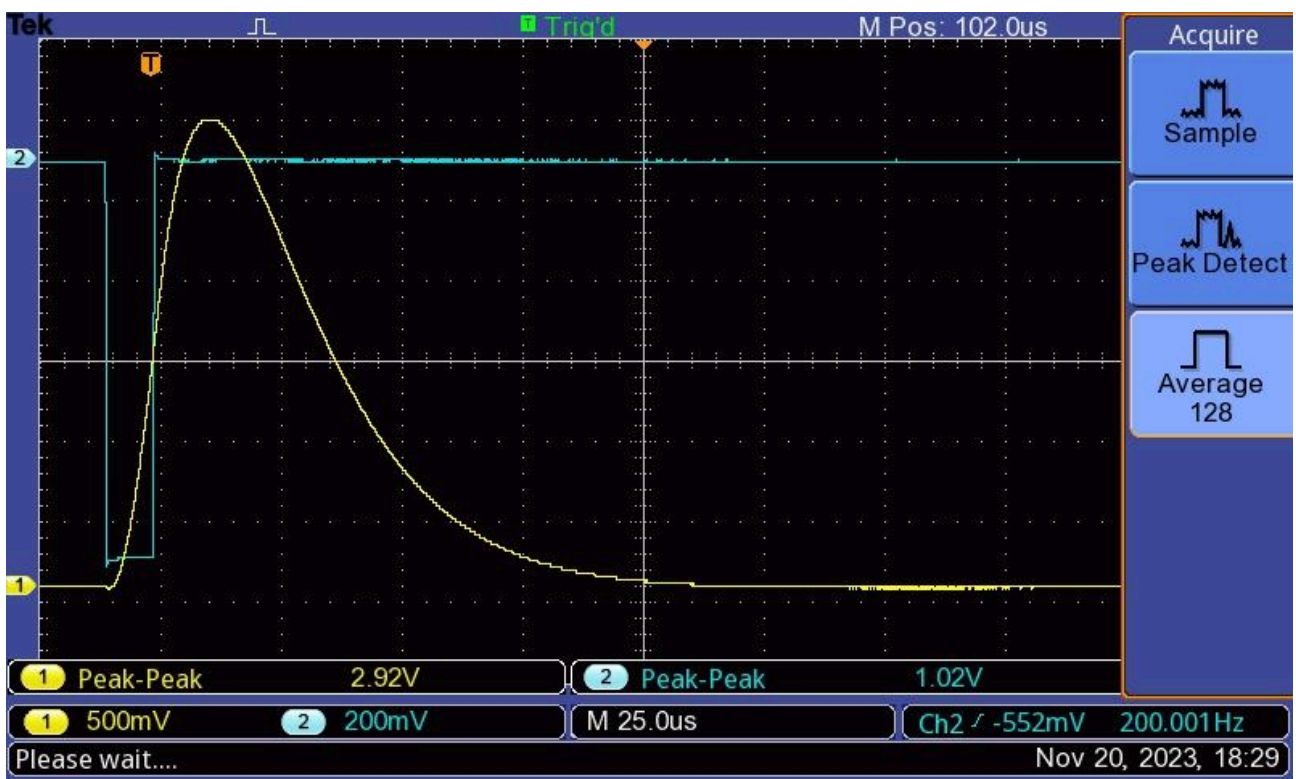
$$R_f = (558.1 \pm 0.2) \text{ k}\Omega$$

$$C_f = (340 \pm 10) \text{ pF}$$

Calcoli teorici:

Amplificazione prevista:

$$13.2720 \pm 0.0006$$



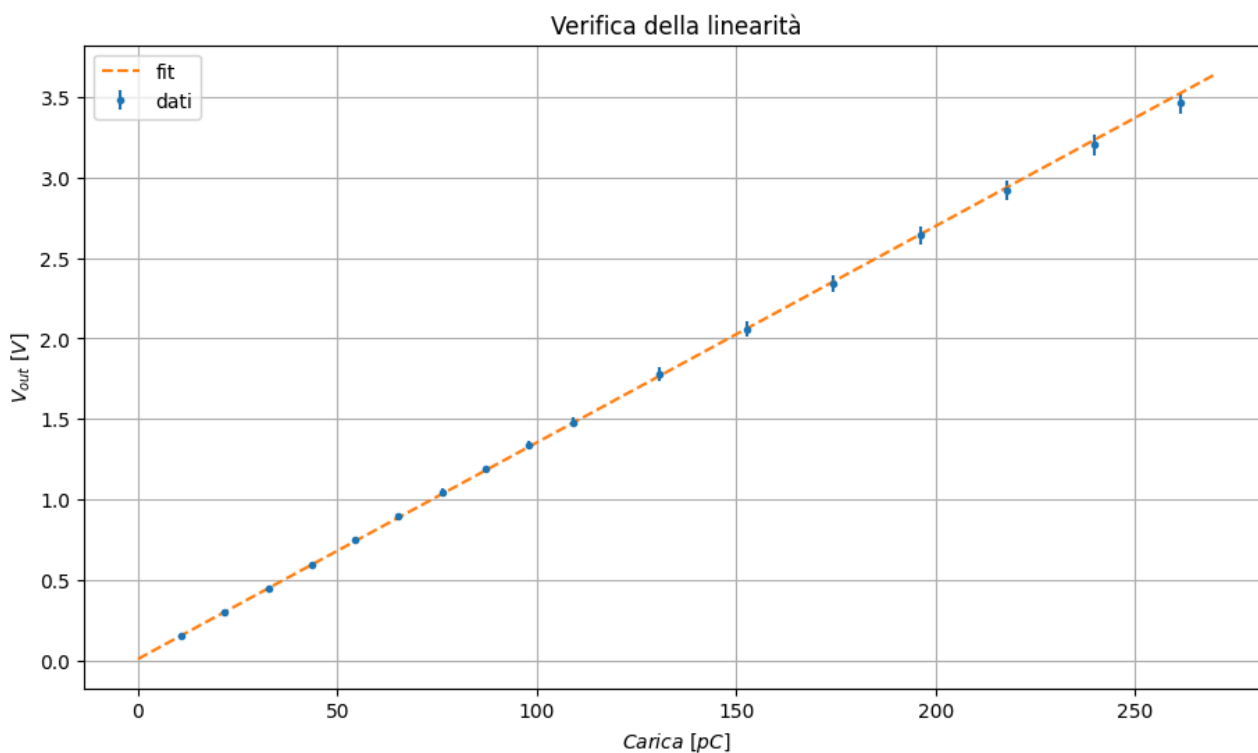
8.1) Verifica della linearità

Frequenza = 2 kHz

| Durata impulso [μ s] | V_{MAX} [V] | V/div |
|---------------------------|-------------------|-------|
| 0.5 | 0.158 ± 0.004 | 0.05 |
| 1.0 | 0.302 ± 0.006 | 0.05 |
| 1.5 | 0.45 ± 0.01 | 0.1 |

| | | |
|------|-----------------|-----|
| 2.0 | 0.60 ± 0.01 | 0.1 |
| 2.5 | 0.75 ± 0.01 | 0.1 |
| 3.0 | 0.90 ± 0.02 | 0.2 |
| 3.5 | 1.05 ± 0.02 | 0.2 |
| 4.0 | 1.19 ± 0.02 | 0.2 |
| 4.5 | 1.34 ± 0.03 | 0.2 |
| 5.0 | 1.48 ± 0.03 | 0.2 |
| 6.0 | 1.78 ± 0.04 | 0.5 |
| 7.0 | 2.06 ± 0.05 | 0.5 |
| 8.0 | 2.34 ± 0.05 | 0.5 |
| 9.0 | 2.64 ± 0.05 | 0.5 |
| 10.0 | 2.92 ± 0.06 | 0.5 |
| 11.0 | 3.20 ± 0.06 | 0.5 |
| 12.0 | 3.46 ± 0.07 | 0.5 |

Grafico di verifica della linearità:



relativi residui di regressione:



Risultati regressione lineare ($y = a+bx$) :

$$a = 0.012 \pm 0.004$$

$$b = 0.01343 \pm 0.00009$$

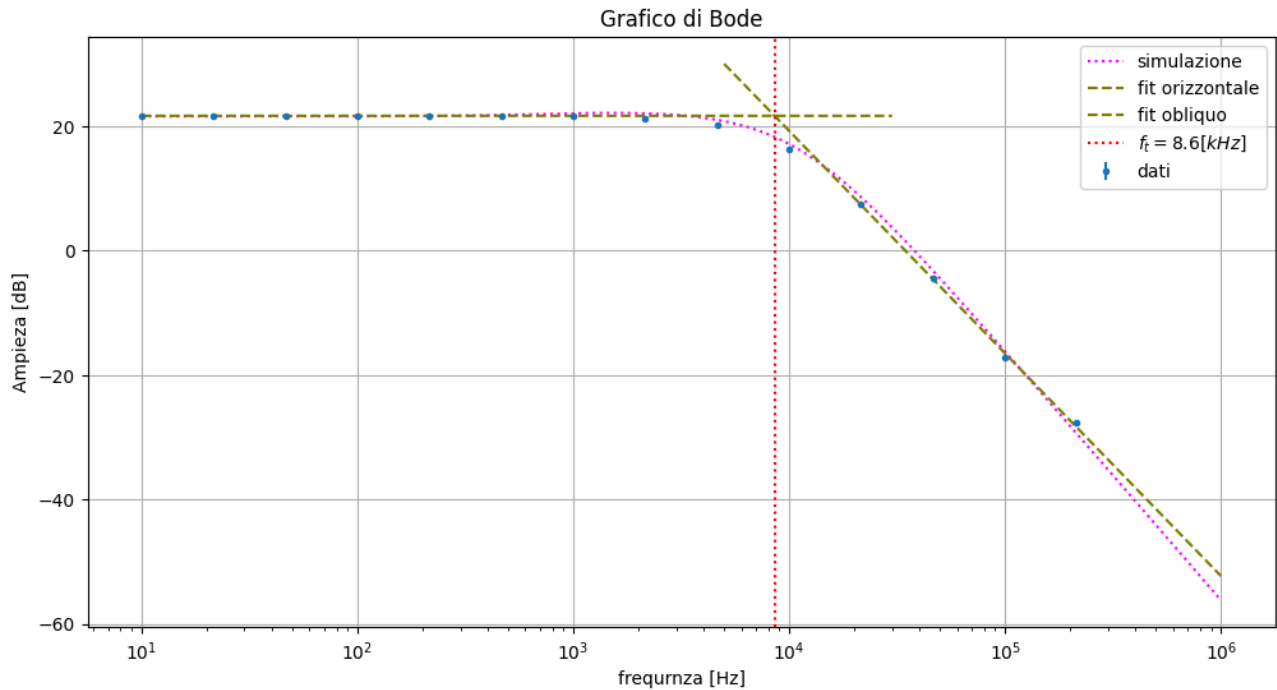
$$\text{Pearson} = 0.999 \pm 0.003$$

8.2) Risposta in frequenza

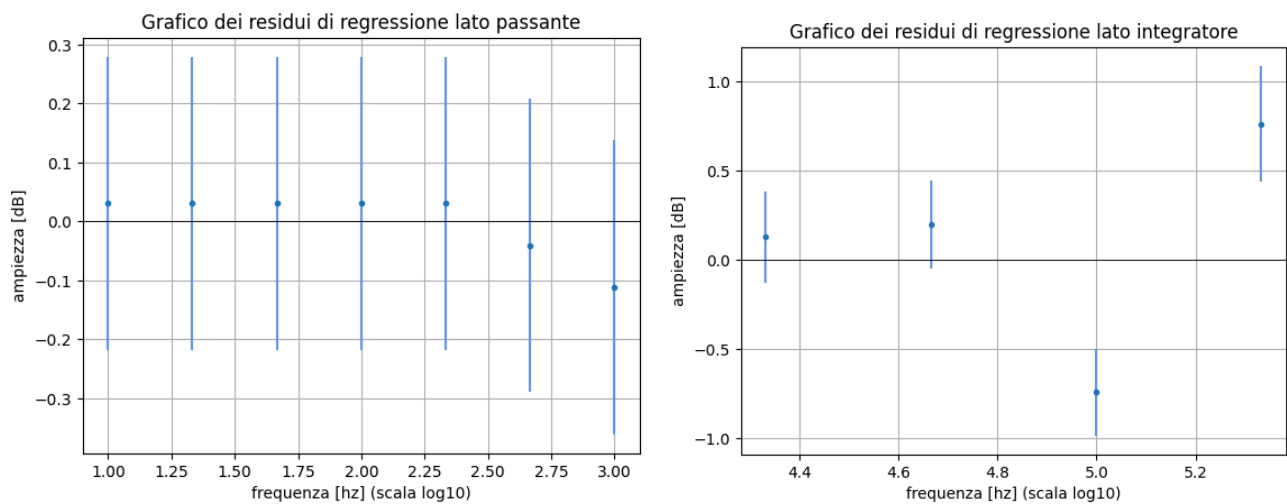
| Frequenza [kHz] | V _{IN} [V] | V/div | V _{OUT} [V] | V/div |
|-----------------|---------------------|-------|----------------------|-------|
| 0.01 | 1.01 ± 0.02 | 0.2 | 12.3 ± 0.2 | 2 |
| 0.0215 | 1.01 ± 0.02 | 0.2 | 12.3 ± 0.2 | 2 |
| 0.0464 | 1.01 ± 0.02 | 0.2 | 12.3 ± 0.2 | 2 |
| 0.1 | 1.01 ± 0.02 | 0.2 | 12.3 ± 0.2 | 2 |
| 0.215 | 1.01 ± 0.02 | 0.2 | 12.3 ± 0.2 | 2 |
| 0.464 | 1.01 ± 0.02 | 0.2 | 12.2 ± 0.2 | 2 |
| 1 | 1.01 ± 0.02 | 0.2 | 12.1 ± 0.2 | 2 |
| 2.15 | 1.01 ± 0.02 | 0.2 | 11.7 ± 0.2 | 2 |
| 4.64 | 1.01 ± 0.02 | 0.2 | 10.4 ± 0.2 | 2 |
| 10 | 1.01 ± 0.02 | 0.2 | 6.6 ± 0.1 | 1 |
| 21.5 | 1.02 ± 0.02 | 0.2 | 2.42 ± 0.05 | 0.5 |

| | | | | |
|------|-----------------|-----|-------------------|------|
| 46.4 | 1.02 ± 0.02 | 0.2 | 0.62 ± 0.01 | 0.1 |
| 100 | 1.02 ± 0.02 | 0.2 | 0.140 ± 0.003 | 0.02 |
| 215 | 1.06 ± 0.02 | 0.2 | 0.044 ± 0.001 | 0.02 |

Grafico di bode:



Residui di regressione:



Risultati di regressione:

- regressione obliqua ($y = a + bx$) :

$$a = 162 \pm 2$$

$$b = -35.8 \pm 0.4$$

$$\text{pearson} = -0.99 \pm 0.03$$

- regressione orizzontale ($y = a$) :

$$a = 21.68 \pm 0.02$$

- Intersezione:

$$4 \pm 5$$

- frequenza di taglio sperimentale:

$$(8.6 \pm 10.5) \text{ kHz}$$

Simulazione:

- intersezione:

$$4.01 \pm 0.03$$

- frequenza di taglio simulazione:

$$(10.3 \pm 0.6) \text{ kHz}$$

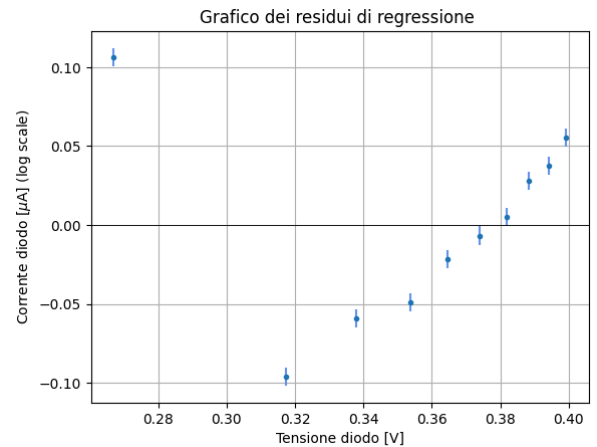
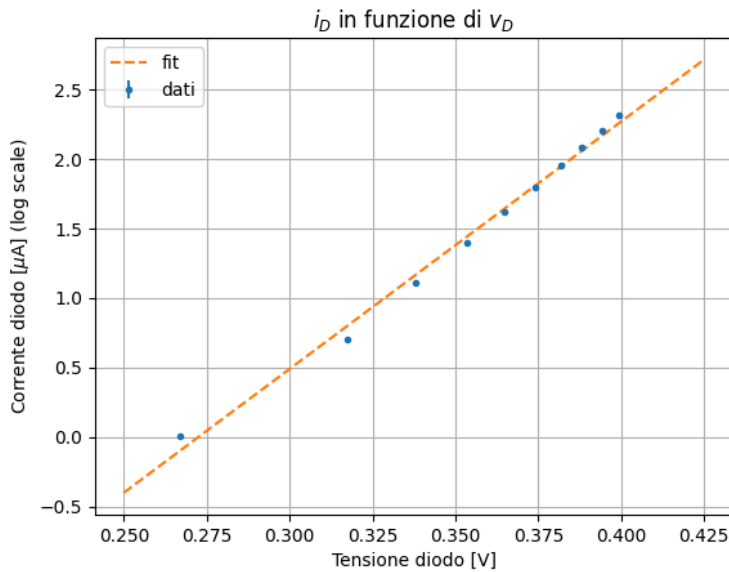
9) Misura dei parametri caratteristici dei diodi

$$R = (0.9925 \pm 0.006) \text{ M}\Omega \text{ (scala } 10 \text{ M}\Omega)$$

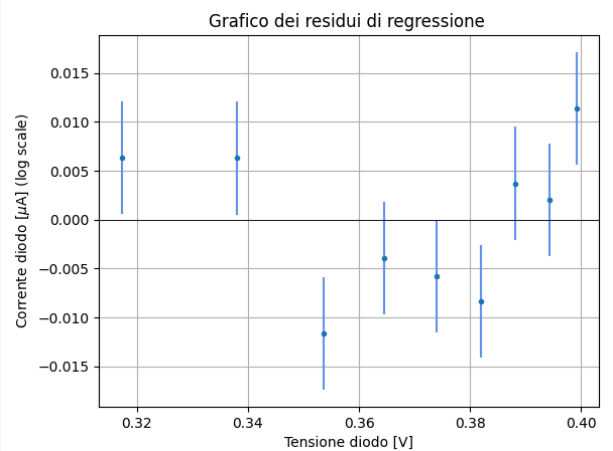
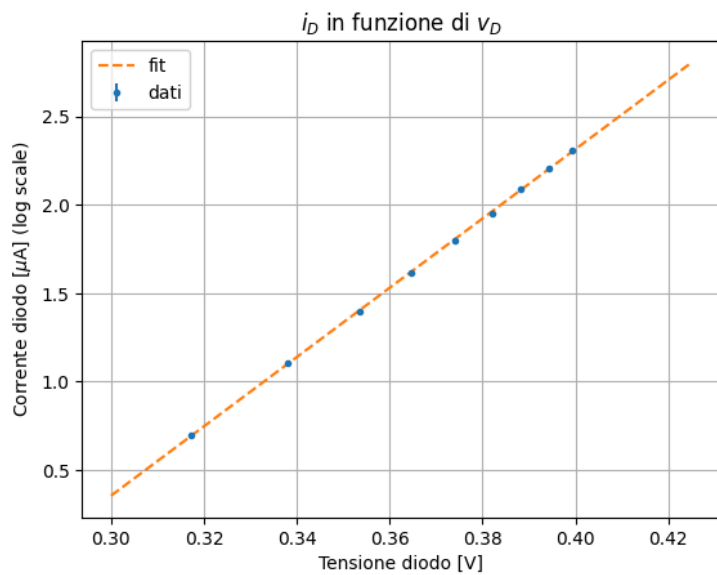
$$\varepsilon_R = 0.6 \%$$

| $V_{IN} [V]$ | $V_d [V]$ |
|--------------|---------------------|
| 1 | 0.2670 ± 0.0005 |
| 2 | 0.3173 ± 0.0005 |
| 3 | 0.3880 ± 0.0005 |
| 4 | 0.3536 ± 0.0005 |
| 5 | 0.3646 ± 0.0005 |
| 6 | 0.3740 ± 0.0005 |
| 7 | 0.3820 ± 0.0005 |
| 8 | 0.3882 ± 0.0005 |
| 9 | 0.3943 ± 0.0005 |
| 10 | 0.3992 ± 0.0005 |

Prima analisi grafica:



Analisi grafica dopo la rimozione del punto anomalo:



Risultati di regressione ($y = a + bx$) :

$$a = -5.52 \pm 0.03$$

$$b = 19.59 \pm 0.07$$

$$\text{pearson} = 0.999 \pm 0.005$$

Calcolo dei parametri che caratterizzano il diodo:

corrente di saturazione:

$$I_s = (0.0040 \pm 0.0001) \mu\text{A}$$

fattore di idealità:

$$n = 1.96$$

10) Circuito con diodo

$C_1 = 500 \text{ nF}$ scala $1 \text{ }\mu\text{F}$

$R_1 = 4.63 \text{ k}\Omega$ (scala $10 \text{ k}\Omega$)

$R_2 = 4.63 \text{ k}\Omega$ (scala $10 \text{ k}\Omega$)

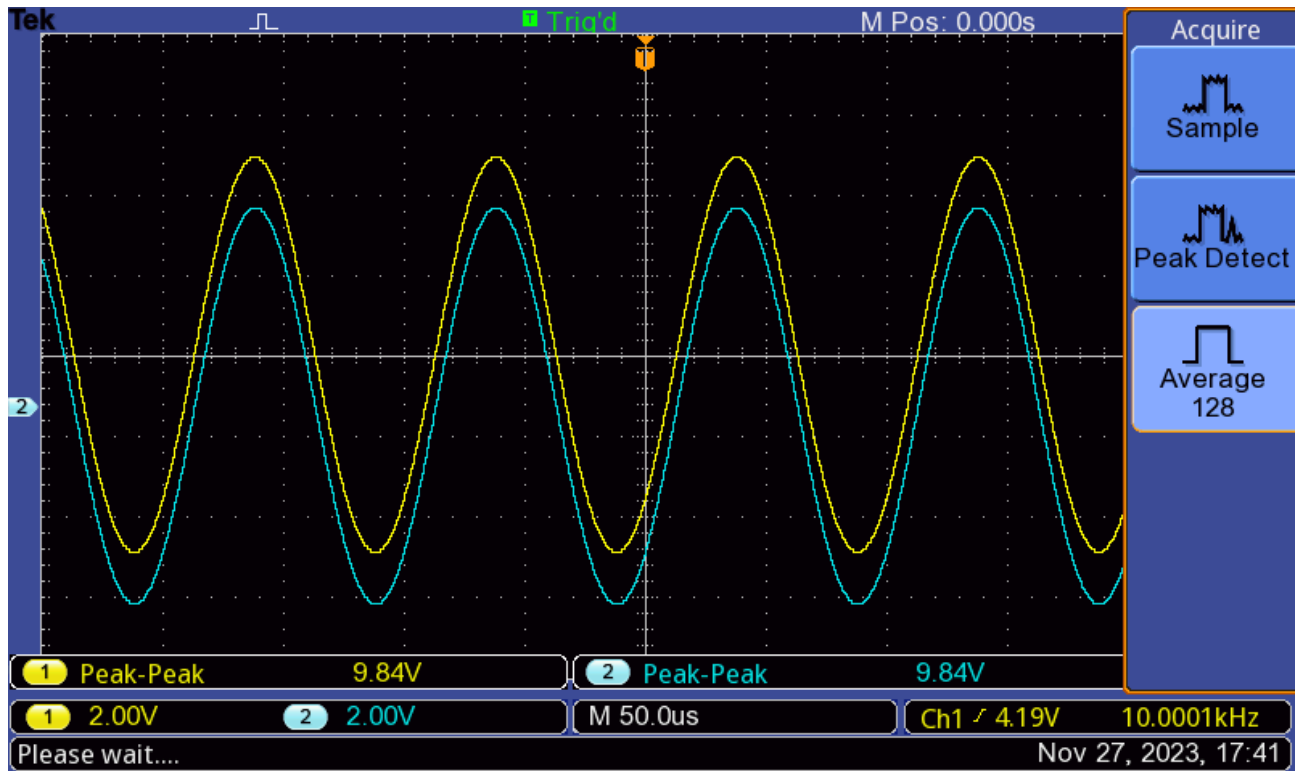
$R_3 = 4.65 \text{ k}\Omega$ (scala $10 \text{ k}\Omega$)

$R_5 = (3.233 \pm 0.005) \text{ k}\Omega$ (scala $10 \text{ k}\Omega$) $\epsilon_r = 0.001\%$

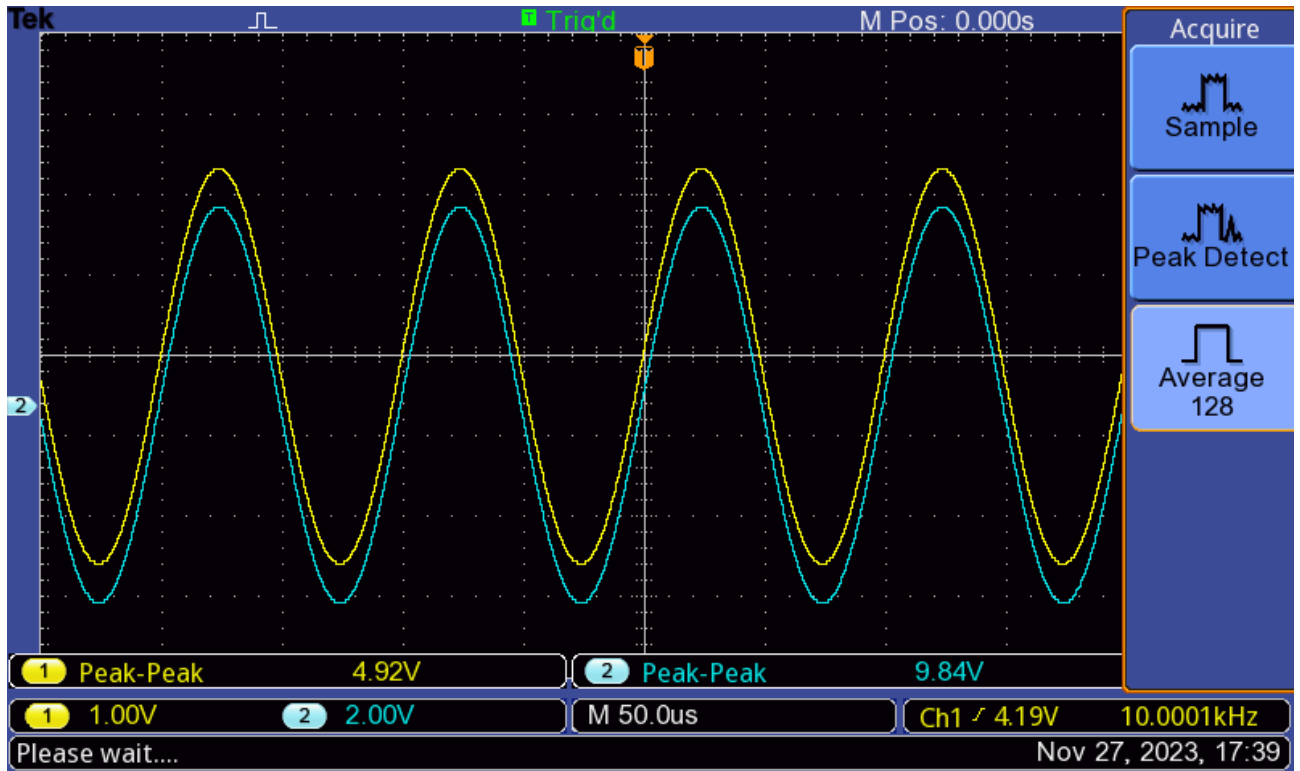
$R_6 = (3.228 \pm 0.005) \text{ k}\Omega$ (scala $10 \text{ k}\Omega$) $\epsilon_r = 0.001\%$

Nei seguenti screenshot sono visualizzate:

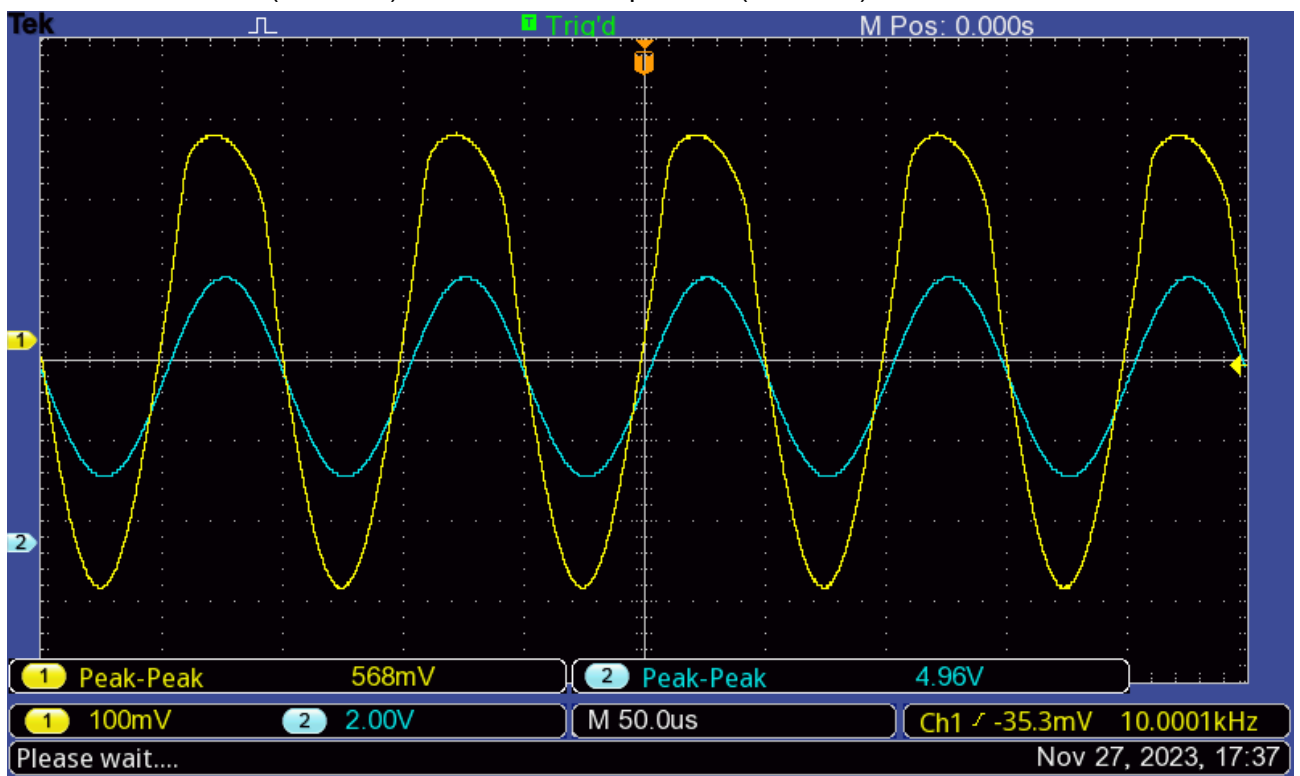
- la tensione in ingresso (canale 2) e la tensione nel punto A (canale 1)



- la tensione in ingresso (canale 2) e la tensione nel punto B (canale 1)

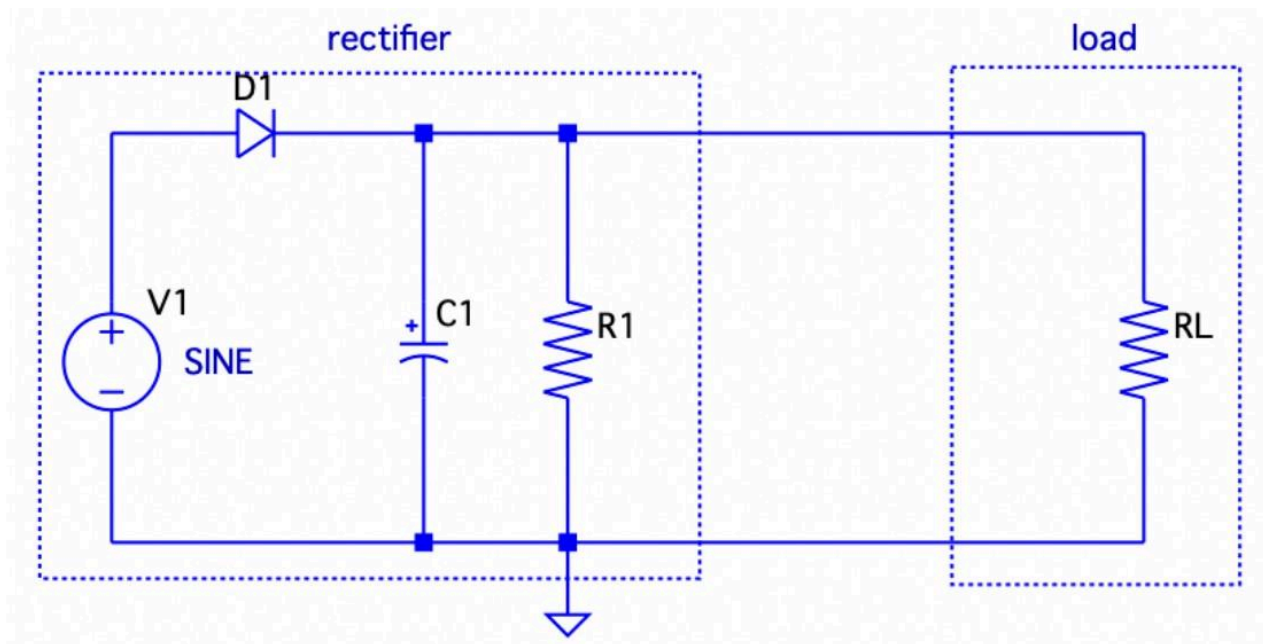


- la tensione in uscita (canale 1) e la tensione nel punto B (canale 2)



11) Raddrizzatore a semionda con carico RC

Rappresentazione del circuito:



Misura delle componenti:

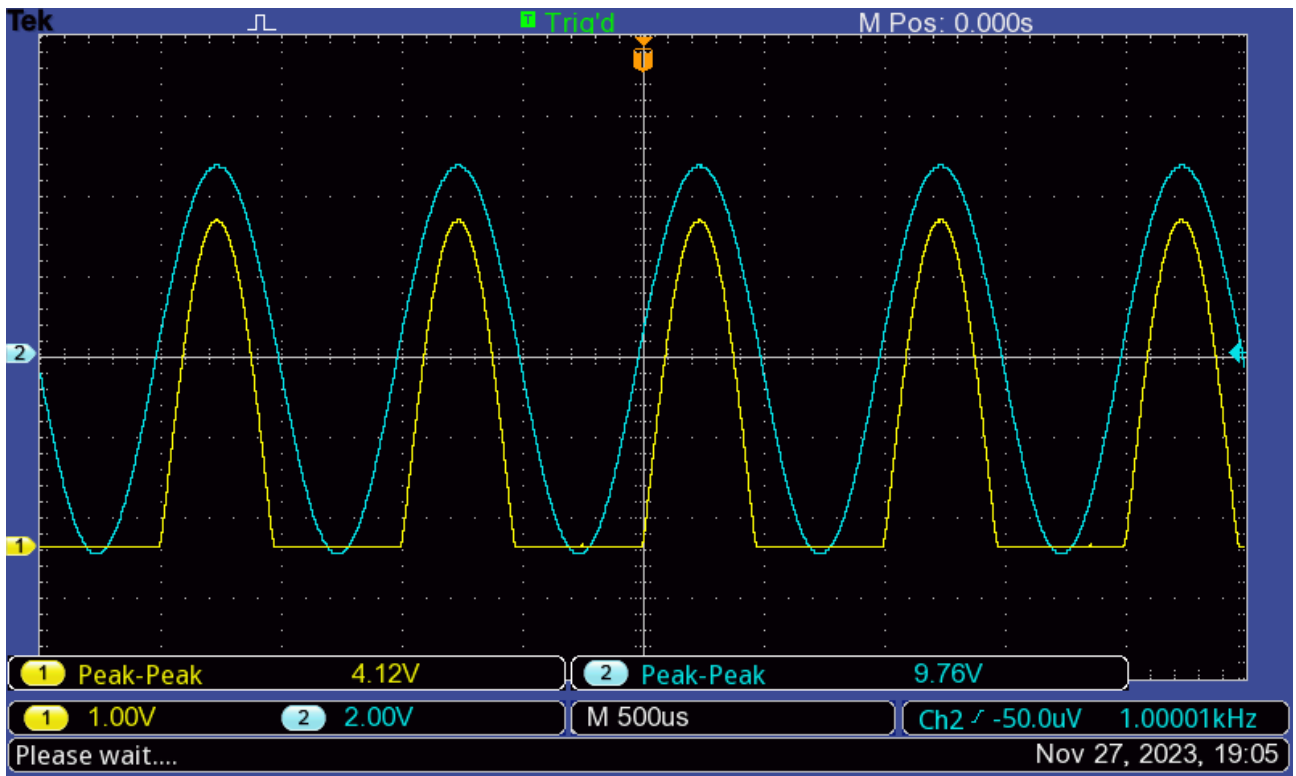
$R_1 = (2.164 \pm 0.001) \text{ k}\Omega$ (scala 10 k Ω)

$R_{L0} = (3.275 \pm 0.001) \text{ k}\Omega$ (scala 10 k Ω)

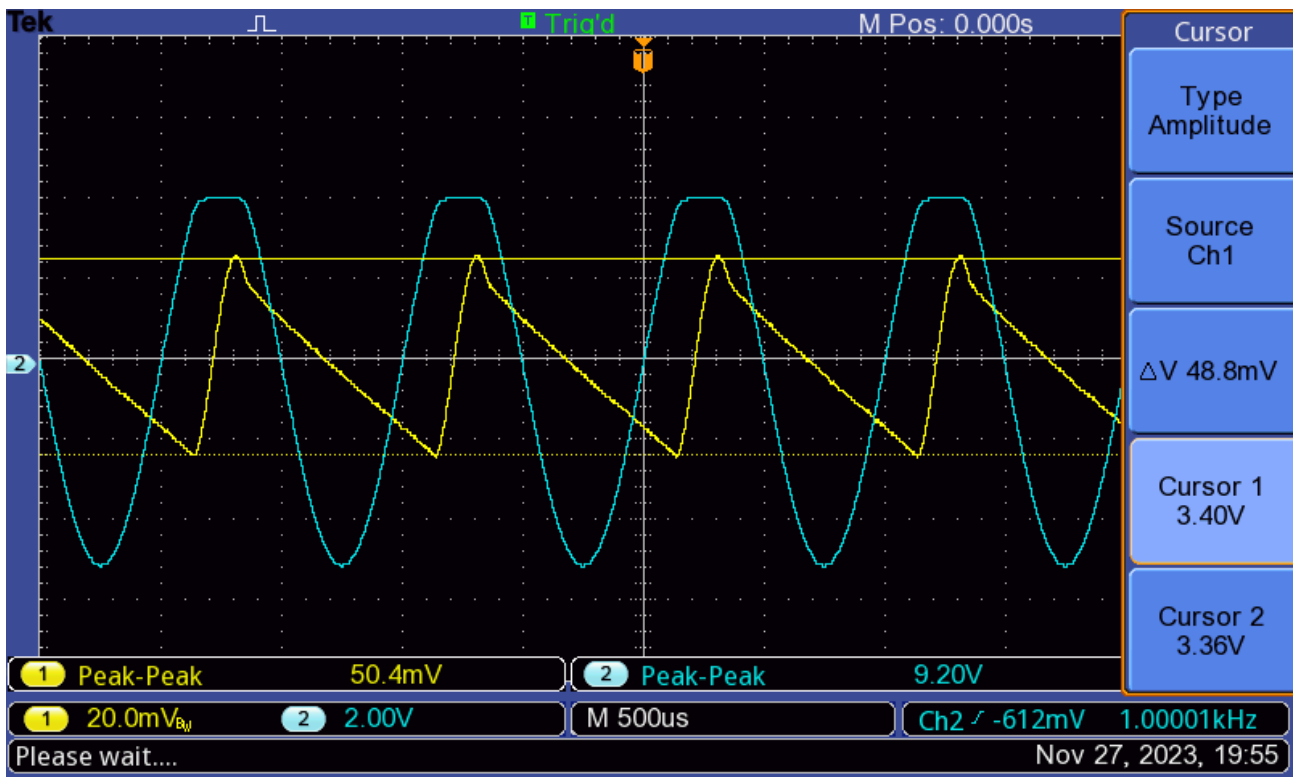
$C_1 = (47.3 \pm 0.5) \mu\text{F}$ (scala 100 μF)

| $R_L \text{ [k}\Omega\text{]}$ | $V_{\text{ripple}} \text{ [V]}$ | $V_{\text{DC}} \text{ [V]}$ |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 1.173 ± 0.001 | 0.0504 | 2.9471 ± 0.0007 |
| 4.598 ± 0.002 | 0.0432 | 3.3551 ± 0.0007 |
| 9.885 ± 0.004 | | 3.4530 ± 0.0008 |

| $f \text{ [kHz]}$ | $V_{\text{ripple}} \text{ [V]}$ | $V_{\text{DC}} \text{ [V]}$ |
|-------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 0.1 | 0.444 | 3.2655 ± 0.0007 |
| 2 | 0.0344 | 3.2895 ± 0.0007 |
| 4 | 0.0232 | 3.2902 ± 0.0007 |



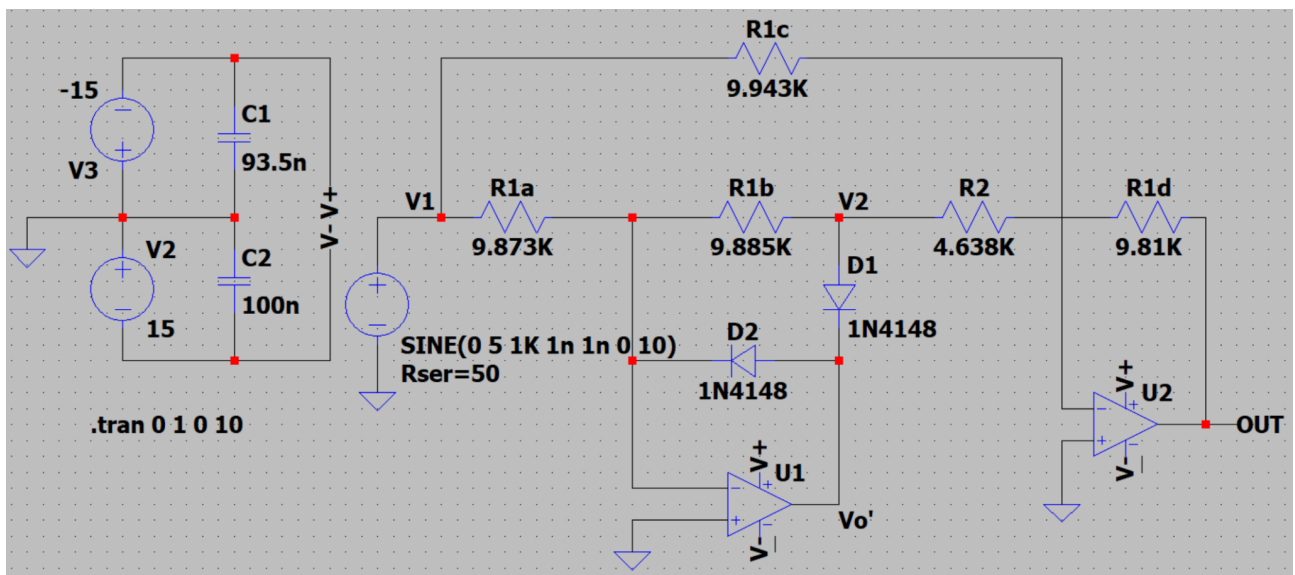
(max senza RI e senza C)



(con RI)

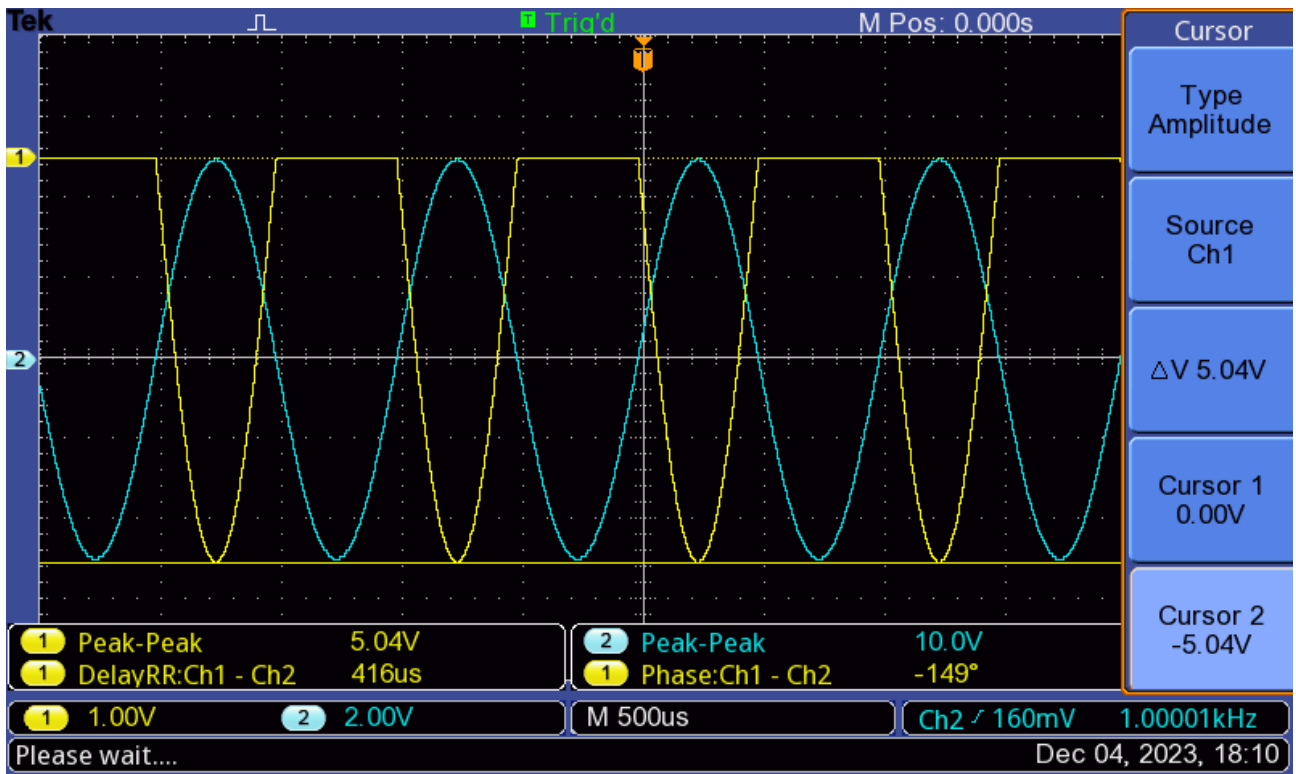
12) Circuito raddrizzatore di precisione

La forma del circuito ed i valori dei componenti circuitali scelti sono riportati nella seguente immagine:

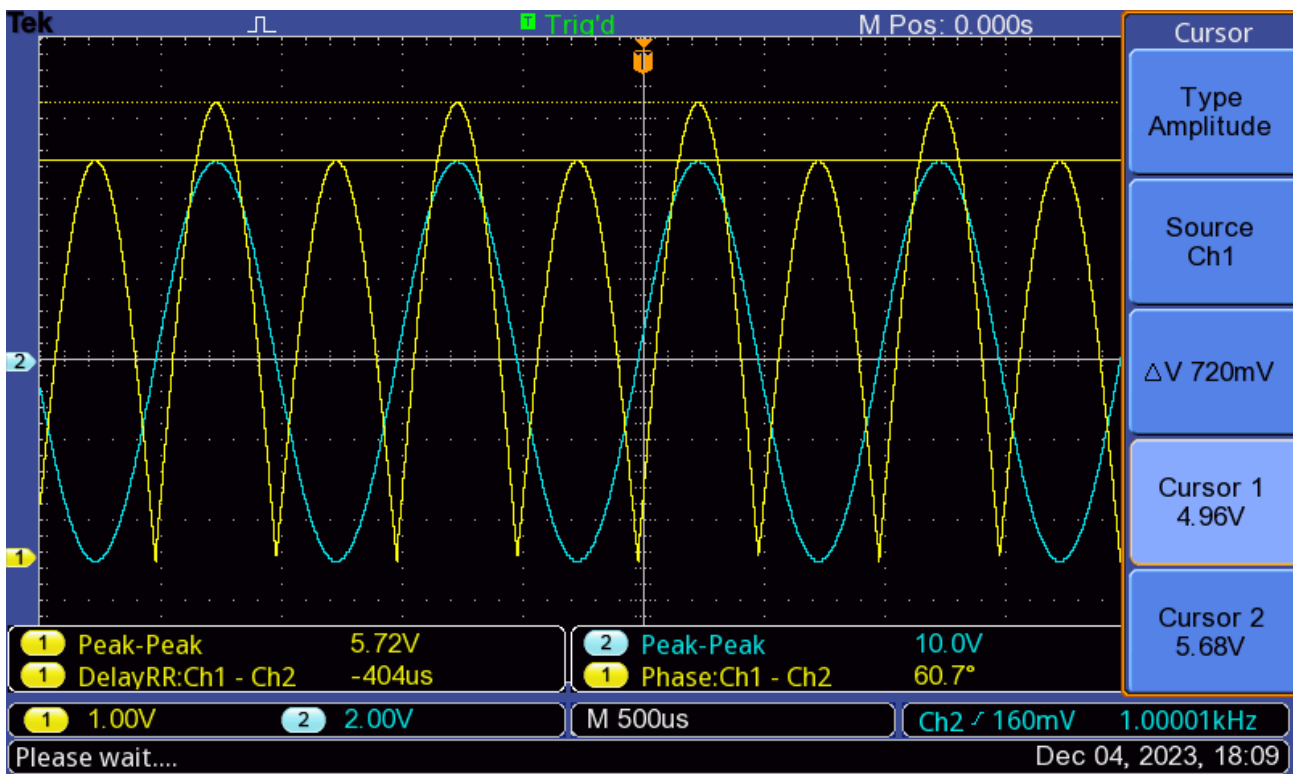


Riportiamo ora gli screenshot dell'oscilloscopio con le sonde nei seguenti punti di interesse

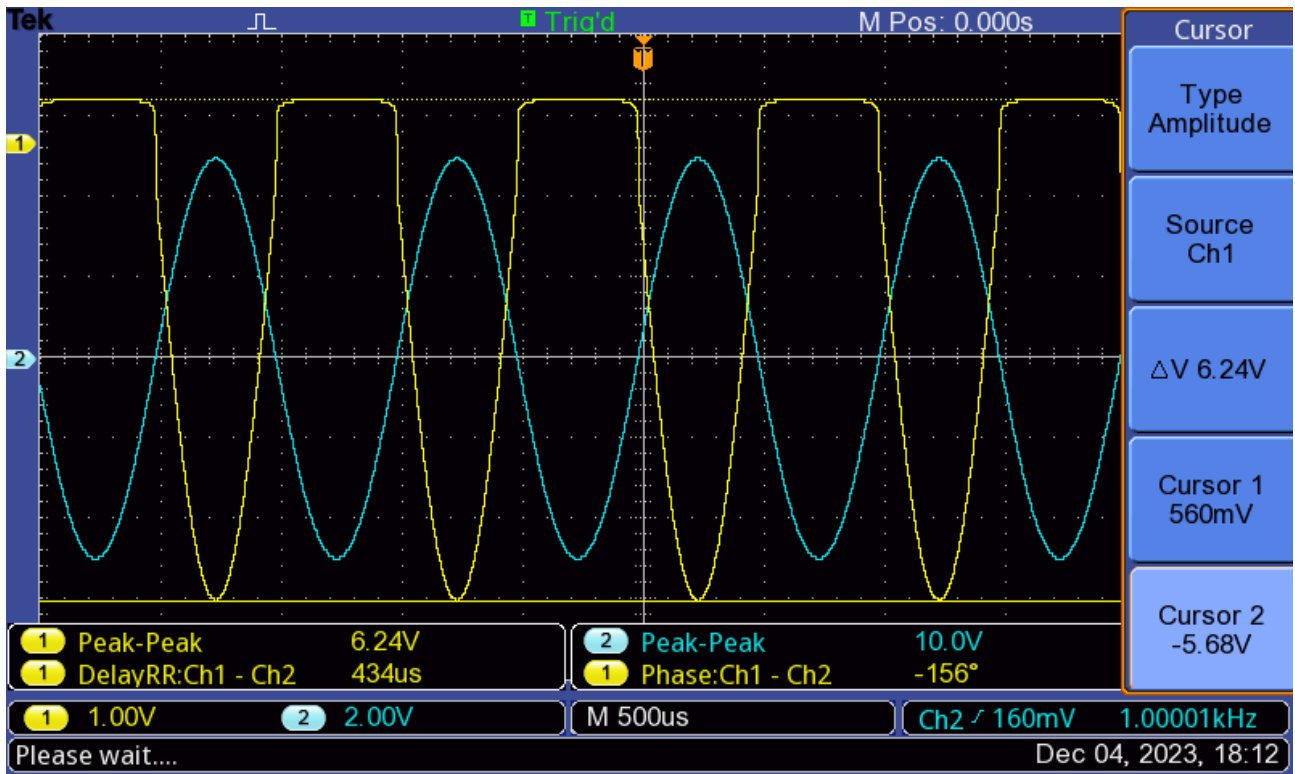
1° foto: V_{IN} (canale 2) vs V_{OUT} (canale 1)



2° foto V_{IN} (canale 2) vs V_2 (canale 1)



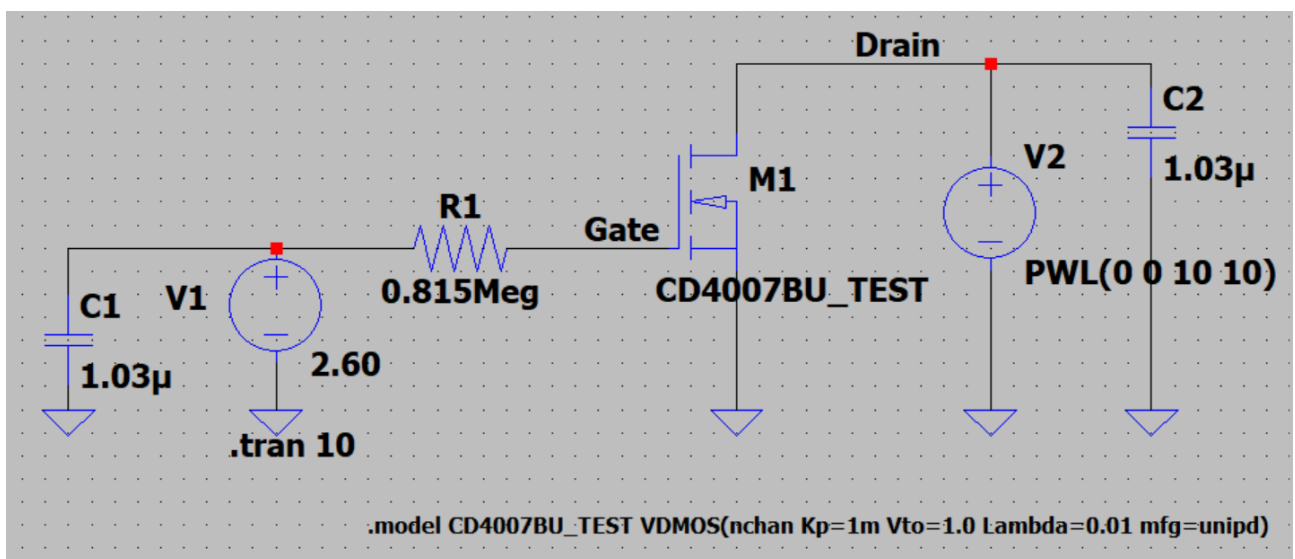
3° foto $V_{O'}$ (canale 1) vs V_{IN} (canale 2)



Semplici circuiti con i Transistor Mosfet

13) Misura dei parametri caratteristici del transistor nei pressi del punto di lavoro (Q-point)

La forma del circuito ed i valori dei componenti circuitali scelti sono riportati nella seguente immagine:



13.1) Determinazione sperimentale del Q-point

$$\begin{aligned}R_1 &= 815.6 \text{ k}\Omega \\V_{DS}^{Q-pt} &= 6.0310 \text{ V} \\I_D^{Q-pt} &= 0.7969 \text{ mA} \\V_{GS}^{Q-pt} &= 2.4504 \text{ V}\end{aligned}$$

13.2) Misura di λ_n

$$\begin{aligned}V_{DS}^{(2)} &= 8.0010 \text{ V} \\I_D^{(2)} &= 0.8059 \text{ mA}\end{aligned}$$

$$\lambda_n = 0.5 \text{ (mV)}^{-1}$$

13.3) Misura di k_n e V_{TN}

$$\begin{aligned}V_{DS}^{Q-pt} &= 8.0010 \text{ V} \\V_{GS}^{(3)} &= 2.6368 \text{ V} \\I_D^{(3)} &= 1.0598 \text{ mA}\end{aligned}$$

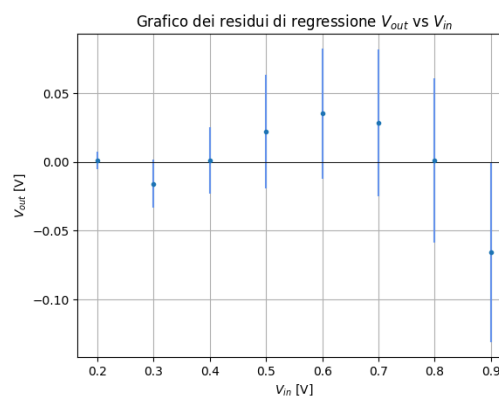
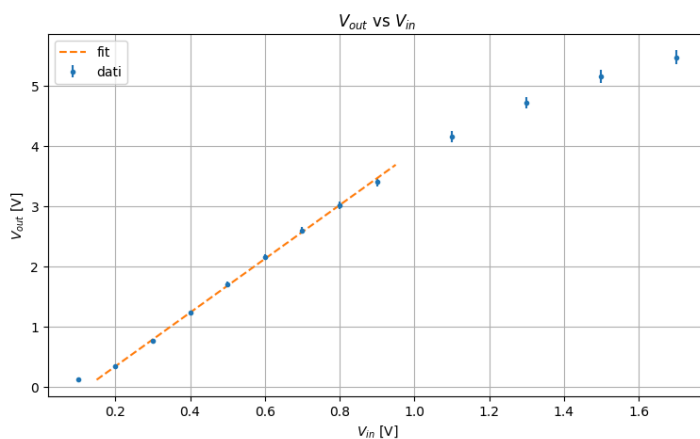
$$\begin{aligned}k_n &= 1.2 \text{ mA} / \text{V}^2 \\V_{TN} &= 1.3 \text{ V}\end{aligned}$$

14) Utilizzo del MOSFET in zona di saturazione: l'amplificatore in tensione

$$\begin{aligned}R_D &= 9.859 \text{ k}\Omega \\F &= 2 \text{ kHz}\end{aligned}$$

| V_{IN} [V] | V_{OUT} [V] |
|--------------|-------------------|
| 0.100 | 0.124 ± 0.002 |
| 0.200 | 0.338 ± 0.007 |
| 0.300 | 0.77 ± 0.02 |
| 0.400 | 1.23 ± 0.02 |
| 0.500 | 1.70 ± 0.04 |
| 0.600 | 2.18 ± 0.05 |
| 0.700 | 2.60 ± 0.05 |
| 0.800 | 3.02 ± 0.06 |
| 0.900 | 3.40 ± 0.07 |
| 1.10 | 4.16 ± 0.09 |
| 1.30 | 4.7 ± 0.1 |
| 1.50 | 5.2 ± 0.1 |
| 1.70 | 5.5 ± 0.1 |

L'intervallo su cui è stata fatta l'analisi è quello tra il secondo e il non punto



Risultati fit ($y = a + bx$):

$$a = (-0.56 \pm 0.01) \text{ V}$$

$$b = 4.47 \pm 0.05$$

$$\chi^2 = 3 \quad (NDOF = 6)$$

$$\rho = 1.00 \pm 0.01$$

$$\delta = 0.03 \text{ V}$$

La stima dell'amplificazione è quindi $A = (4.47 \pm 0.05)$

15) Utilizzo del MOSFET in zona di interdizione e conduzione : l'inverter logico e le porte logiche

16) Raddrizzatore a doppia semionda con ponte a diodi (facoltativo)

17) CMOS inverter (facoltativo)

18) Realizzazione di un amplificatore Common Source a singolo transistor (facoltativo)

note
