



Esercitazione 04: Op-Amp come amplificatore e open loop gain

Brognoli Roberto, Garbi Luca, Libardi Gabriele

Issue: 1

Date: September 11, 2020

University of Trento
Department of Physics
Via Sommarive 14, 38123
Povo (TN), Italy

Introduzione

L'obiettivo di questa esperienza è quello di studiare tre circuiti di amplificazione di segnali; verrà infatti utilizzato l'operazionale OP07 per costruire un amplificatore invertente, non-invertente e differenziale. La seconda parte dell'esperienza è dedicata alla stima del guadagno a loop aperto a bassa frequenza A dello stesso operazionale.

1 Setup

1.1 Materiali

- Generatore di funzione d'onda *Rigol DG1022* (impedenza nominale in uscita $R_s = 50 \Omega$);
- multimetro digitale (DMM) *Agilent 34410A*;
- oscilloscopio *Agilent DSOX2002A*;
- cavi coassiali BNC-banana e BNC-BNC;
- 1 trimmer da $2 \text{ k}\Omega$, resistori vari;
- 1 Op-Amp OP07.

1.2 Procedure di misura

Nella prima parte dell'esperienza vengono studiati tre circuiti basati sull'amplificatore operazionale OP07. Per l'intera durata dell'esperienza l'operazionale viene alimentato a $\pm 12 \text{ V}$. Vengono inizialmente realizzate le configurazioni in figura (1) e ne viene misurato il guadagno tramite un'acquisizione delle forme d'onda in ingresso e in uscita rappresentate sull'oscilloscopio. I valori delle resistenze misurati sperimentalmente sono $R_1 = (9953.2$

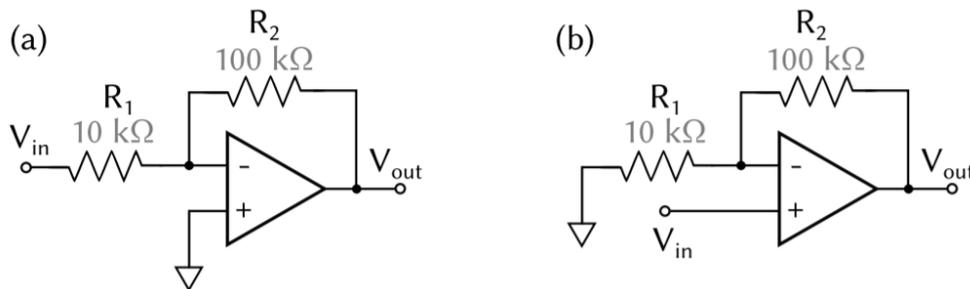


Figure 1: (a) Amplificatore invertente. (b) Amplificatore non invertente.

$\pm 1.1) \Omega$ e $R_2 = (99073 \pm 11) \Omega$. Il segnale V_{in} in ingresso utilizzato è una sinusoide di frequenza 1 kHz e di ampiezza picco-picco 1 V .

Nella seconda parte, per realizzare l'amplificatore differenziale, vengono aggiunte due resistenze $R'_1 = (9962 \pm 1.1) \Omega$ e $R'_2 = (99350 \pm 11) \Omega$ all'ingresso non-invertente dell'operazionale (Fig.2). In questo caso utilizziamo entrambi i canali del generatore di funzione ad una frequenza di 1 kHz ed ampiezze $V_1 = 0.5 \text{ V}$ e $V_2 = 0.4 \text{ V}$. Acquisiamo 3 forme d'onda del segnale in uscita sul quale effettuiamo un fit sinusoidale alla funzione

$$V(t) = k + A \cos(\omega x - \phi). \quad (1)$$

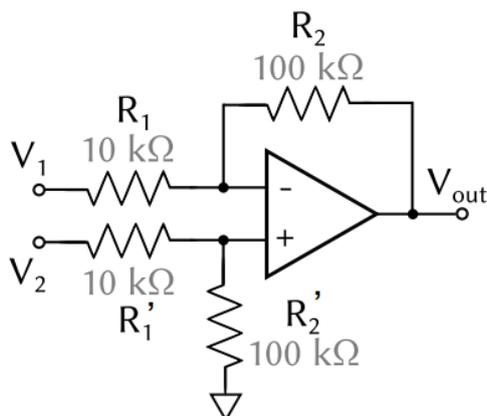


Figure 2: Amplificatore differenziale con op-amp OP07.

Dopodiché impostiamo $V_1 = V_2 = 0.5 \text{ V}$ e per uno sfasamento di V_1 e V_2 pari a $\Delta\phi = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ acquisiamo ancora 3 schermate dell'oscilloscopio. In questa parte dell'esperienza non vengono utilizzate medie.

Successivamente entrambi i segnali vengono impostati alla stessa fase e ampiezza 0.5 V , ma viene ridotta la frequenza di V_2 a 999 Hz . Anche in questo caso viene presa un'acquisizione senza medie.

Nell'ultima parte dell'esperienza per la stima del guadagno a loop aperto utilizziamo la configurazione seguente (Fig.3), dove (b) rappresenta il circuito equivalente. La *tee-*

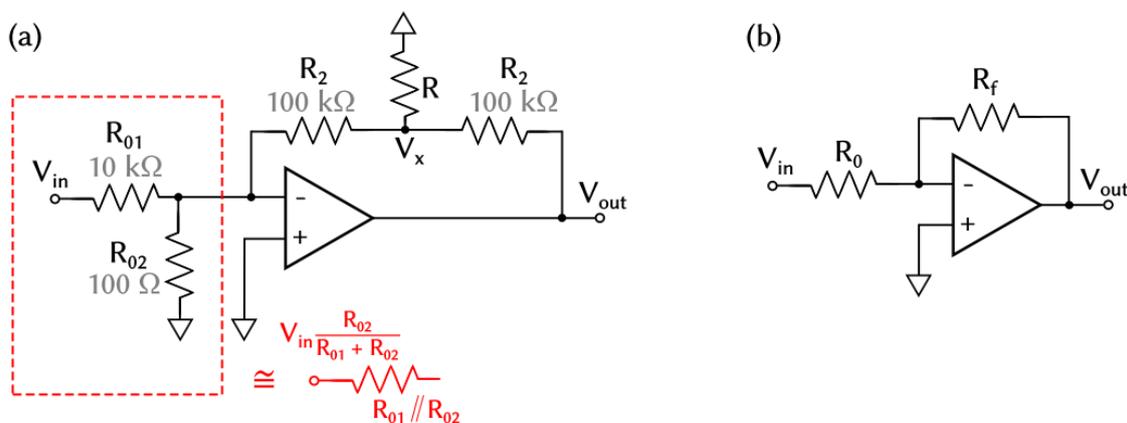


Figure 3: Circuito per la stima di A; lo stadio di input, evidenziato dal riquadro rosso, è equivalente ad un generatore V_{in} in serie ad una resistenza R_0 . L'intero circuito equivalente è la configurazione in (b).

network è composta dai resistori R_2 , R'_2 e un trimmer da $2 \text{ k}\Omega$ per R , mentre abbiamo utilizzato $R_{01} = (9953.2 \pm 1.1) \Omega$ e $R_{02} = (98.7 \pm 0.2) \Omega$. Nel circuito equivalente si ha

$$R_f = 2R_2 + \frac{R_2^2}{R}, \quad R_0 = R_{01} || R_{02}.$$

Utilizziamo come segnale in ingresso un sinusoidale di $f=7 \text{ Hz}$ e ampiezza 2 mV . Prendiamo 5 acquisizioni del segnale in uscita cambiando la resistenza R della rete a T, per la quale utilizziamo i seguenti valori nominali $R = 400 \Omega, 550 \Omega, 700 \Omega, 850 \Omega, 1 \text{ k}\Omega$.

2 Descrizione e discussione dei risultati

L'analisi dei dati è suddivisa in due sotto sezioni: nella prima vengono esposti i risultati ottenuti nel calcolo del guadagno dell'amplificatore invertente, non invertente e differenziale; nella seconda è presente l'analisi per la stima del guadagno dell'amplificatore a loop aperto.

Non viene riportata una sezione per la conclusione in quanto i risultati vengono già esaminati e commentati in questa sezione.

2.1 Amplificatore invertente, non invertente e differenziale

L'output del circuito in figura (1.a) è dato da

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1}V_{in} . \quad (2)$$

Essendo il guadagno definito come il rapporto tra l'onda in uscita e quella in ingresso, il guadagno teorico dell'amplificatore invertente ideale è

$$G = -\frac{R_2}{R_1} = -9.954 \pm 0.001$$

Per la misura sperimentale del guadagno possiamo eseguire un fit sinusoidale del tipo

$$V = V_0 + A\cos[\omega t - \phi]$$

sul segnale in ingresso e su quello in uscita, dove il parametro che ci interessa determinare è l'ampiezza A dell'onda. Calcolando il rapporto tra le ampiezze delle due onde otteniamo un guadagno sperimentale pari a $G_{exp} = -10.01 \pm 0.02$. Il segno negativo del guadagno deriva dal fatto che le due onde, oltre ad essere diverse in ampiezza, sono sfasate di 180° , com'è possibile vedere nella rappresentazione in figura (4).

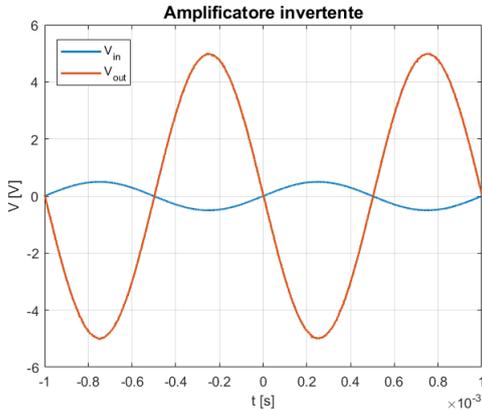


Figure 4: Segnale in ingresso e in uscita dell'amplificatore invertente. Si nota che i segnali sono sfasati di 180° .

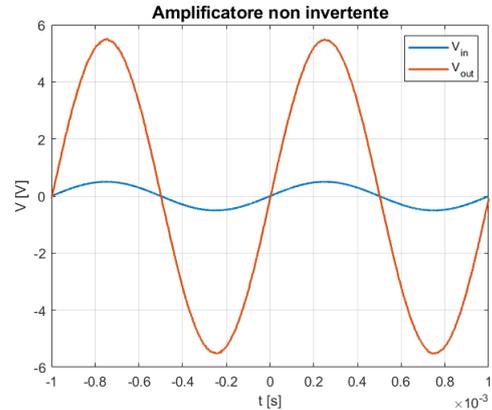


Figure 5: Segnale in ingresso e in uscita dell'amplificatore non invertente. I segnali sono in fase tra loro.

Sebbene entro tre deviazioni standard il guadagno teorico e sperimentale risultano essere compatibili; è necessario però ricordare che la formula per il guadagno sperimentale è un'approssimazione derivante dall'idealizzazione dell'operazionale.

Studiamo allo stesso modo l'amplificatore non invertente in figura (1.b). Questa volta l'output del circuito è

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{in} . \quad (3)$$

Il guadagno risulta quindi essere pari a

$$G' = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 10.951 \pm 0.001$$

Eseguendo la procedura descritta precedentemente otteniamo un guadagno sperimentale pari a $G'_{exp} = 10.94 \pm 0.01$. Anche in questo caso il guadagno teorico e quello misurato risultano compatibili.

Una volta realizzato l'amplificatore differenziale in figura (2), ci aspettiamo un output del tipo

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(\tilde{V}_2 - \tilde{V}_1)$$

Effettivamente è quello che troviamo sperimentalmente (fig.6, in blu).

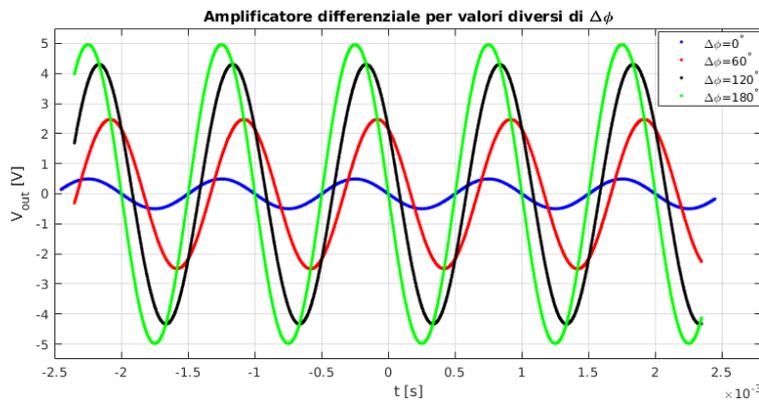


Figure 6: Amplificatore differenziale con op-amp OP07, per diversi valori di fase.

Impostando $V_2 - V_1 = 0.1$ V (e in fase) otteniamo infatti un'ampiezza del segnale in uscita pari a (992 ± 7) mV. Impostando una differenza di fase $\Delta\phi$ invece il segnale in uscita è chiaramente maggiore a causa di una maggior differenza di potenziale in ingresso. Si può notare (Fig.(6)) come, aumentando la fase relativa tra i segnali, aumenti V_{out} , che raggiunge il suo massimo per $\Delta\phi = 180^\circ$, ovvero quando $\tilde{V}_2 - \tilde{V}_1 = 1$ V (e di conseguenza $V_{out} = (9.93 \pm 0.11)$ V).

Una volta impostati i segnali alla stessa fase e ampiezza (0.5 V), con frequenze $f_1 = 1$ kHz e $f_2 = 999$ Hz il segnale in uscita all'amplificatore è quello riportato in figura (7). Quello che

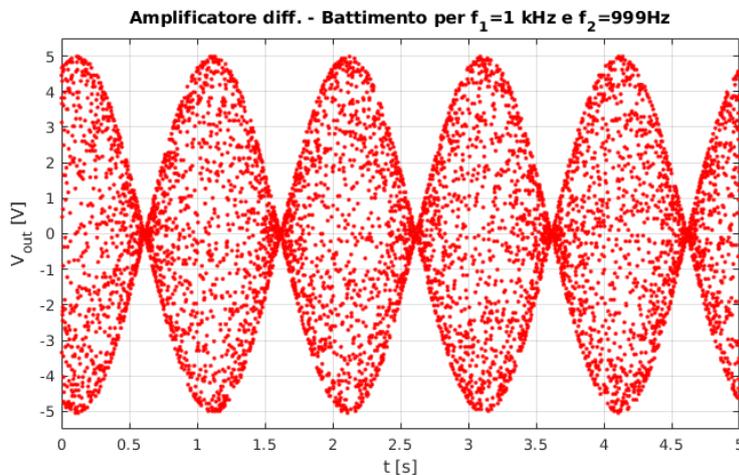


Figure 7: Amplificatore differenziale con op-amp OP07, si nota la frequenza battimento di 1 Hz.

si ottiene è un fenomeno di battimento essendo le due frequenze utilizzate relativamente vicine tra di loro. Quello che ci aspettiamo è di ottenere una frequenza di battimento pari a $|f_1 - f_2| = 1$ Hz. Possiamo verificare che è quello che accade anche graficamente, notando che l'involuppo della nostra onda presenta una periodicità di 1 s.

2.2 Stima del guadagno a loop aperto

Come anticipato nelle procedure, per il guadagno a loop aperto vengono acquisite 5 schermate dell'oscilloscopio per diversi i valori di resistenza R . Da queste acquisizioni sono stati fatti dei fit sinusoidali alla funzione (1) per calcolare i parametri utili a questa analisi, in particolare l'ampiezza A . Una volta ottenuti i valori di ampiezza delle onde sinusoidali in uscita (V_{out}) e in entrata (V_{in}) per ogni valore di R , se ne è fatto il rapporto per calcolare il guadagno del circuito. In tabella sono riportati i valori di ampiezza A con le rispettive incertezze, che sono state ricavate tenendo presente che i parametri del fit sono stati calcolati con una confidenza del 95%, e i rispettivi guadagni G .

Resistenza R [Ω]	Ampiezza $V_{out} - A$ [V]	Guadagno G
395.2 ± 0.3	0.9180 ± 0.0003	-93564 ± 116
550.7 ± 0.3	0.8309 ± 0.0003	-84686 ± 106
700.4 ± 0.3	0.7817 ± 0.0003	-79672 ± 100
850.5 ± 0.3	0.7269 ± 0.0003	-74087 ± 94
976.7 ± 0.3	0.6864 ± 0.0003	-69959 ± 89

Facendo sempre riferimento alla figura (3), si trova dopo alcuni passaggi algebrici che il guadagno del circuito è rappresentato dalla relazione:

$$G = -\frac{\frac{R_f}{R_0 + R_f}}{\frac{1}{A} + \frac{R_0}{R_f + R_0}} = -\frac{R_0}{R_0 + R_f} \left[A \left(1 + \frac{R_f}{R_0} \right) \right] \quad (4)$$

R_0 e R_f sono già stati definiti nelle procedure di misura e A si riferisce al guadagno dell'op-amp. Per stimarlo, viene fatto un fit a questa funzione, tenendo libero il parametro A e usando come guadagno G e le relative resistenze R i valori sperimentali trovati sopra. Il fit e i dati sperimentali sono riportati nel grafico sottostante (8) in arancione. Il fit a un

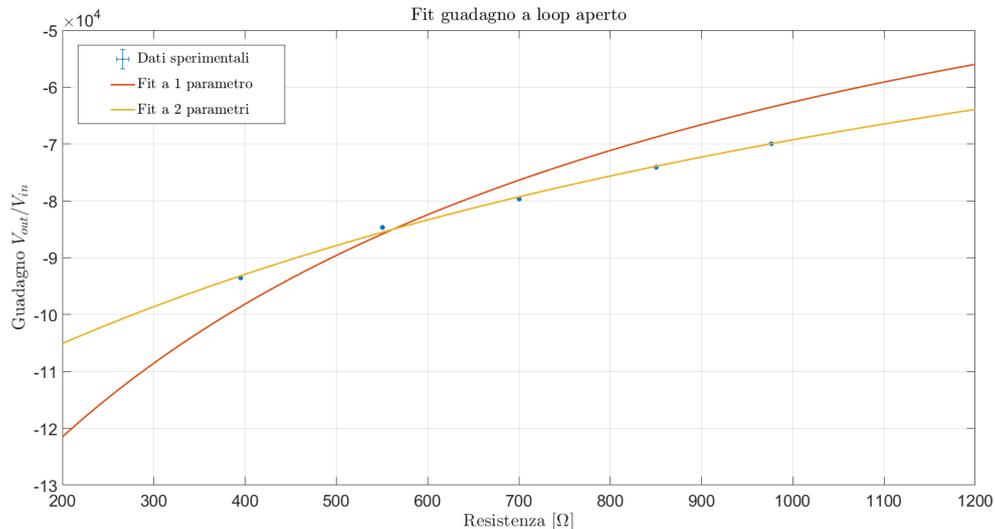


Figure 8: Fit guadagno loop aperto con 1 e 2 parametri, e relativi dati sperimentali

parametro restituisce con una confidenza del 95% un valore del guadagno $A = (1.6 \pm 0.2) \times 10^5$, in accordo con il valore minimo riportato sul datasheet dell'op-amp OP07 di 1.5×10^5 . In prima analisi il fit non sembrerebbe coerente con l'andamento dei dati sperimentali, così abbiamo scelto di ripetere il fit precedente, aggiungendo una costante moltiplicativa di normalizzazione B . Questa volta il fit sembra essere in accordo con i dati sperimentali entro le incertezze (Fig.8 in giallo), ma questo ha portato ad un dimezzamento del guadagno dell'amplificatore che ha assunto il valore di $A = (7.7 \pm 1.2) \times 10^4$, valendo la costante di normalizzazione $B = 1.6 \pm 0.2$. Questa divergenza dal valore sul datasheet può essere data dal fatto che nel nostro caso abbiamo usato un'alimentazione di ± 12 V ai capi dell'op-amp, diversa da quella di 15 V usata per ottenere i dati sul datasheet. In più le frequenze in entrata usate all'ingresso del canale invertente e non invertente sono diverse da quelle riportate nel datasheet.

Nell'ipotesi in cui $R_f \gg R_0$, come nel nostro caso, si può approssimare l'espressione (4) riscrivendo

$$G = - \left[A \parallel \frac{R_f}{R_0} \right] = A \parallel G_r \quad (5)$$

Provando a fare un fit a 1 e 2 parametri, come nell'esempio precedente, si ottengono gli stessi risultati, a riprova del fatto che questa è una buona approssimazione.

In molti casi, quando vale la disuguaglianza $A \gg (1 + R_f/R_0)$, nella formula del guadagno (4) prevale il termine minore del parallelo, quindi $G \cong -R_f/R_0 = G_r$ e siamo nell'approssimazione di massa virtuale per l'ingresso invertente. Nel caso di questa esperienza sono stati misurati guadagni simili in ordine di grandezza al guadagno dell'op-amp A . È stata infatti riscontrata la necessità di considerare il termine A nel guadagno totale nell'analisi precedente. Per evidenziare il fatto che in queste condizioni non vale più l'approssimazione di massa virtuale, vengono riportati due grafici (Fig.9). Il primo mostra

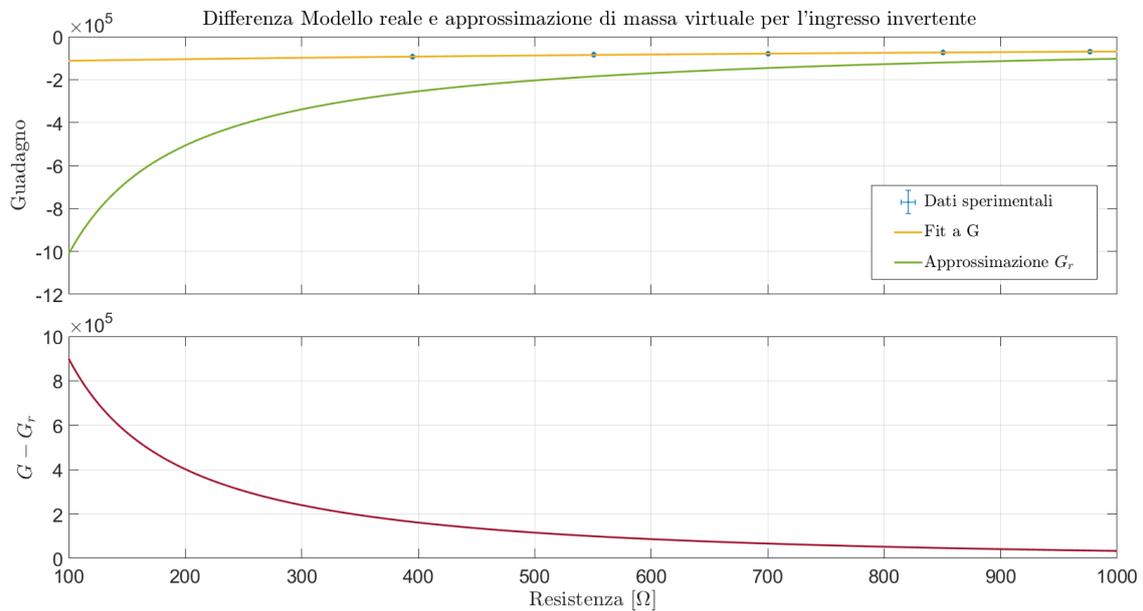


Figure 9: Due grafici, il primo rappresenta i dati sperimentali, il fit di G e il modello approssimato G_r , il secondo grafico invece la differenza tra il modello di G e G_r .

i dati sperimentali, il modello ottenuto dal fit a 2 parametri e il modello approssimato di G_r , mentre nel secondo è rappresentata la differenza tra il fit di G e l'approssimazione G_r . Nel primo grafico si osserva che il modello G_r non è coerente con i dati sperimentali, quindi

non è una buona approssimazione del modello di G per i valori di R usati. Nel secondo grafico si capisce come l' approssimazione G_r diventa tanto più buona e compatibile con G man mano che la resistenza R aumenta (quindi diminuisce R_f e il modulo del guadagno G).