

Amplificatori operazionali

LORENZO BARTOLOZZI

LUCA PACIOSELLI

GIUSEPPE PRUDENTE

Università di Perugia

A.A. 2018/2019

Sommario

La presente esperienza è volta all'implementazione di un circuito contenente un amplificatore operazionale e alla sua caratterizzazione qualitativa come amplificatore invertente e non invertente. Nello specifico, si è scelta una delle due configurazioni e si è studiato il guadagno sia al variare dell'ampiezza che della frequenza del segnale di ingresso. Infine si è studiata la dipendenza del GBWP in funzione del guadagno del circuito.

I. INTRODUZIONE

i. Strumenti a disposizione

- generatore di funzioni (alimentatore in alternata, AC) GW GFG;
- alimentatore in CC (fondoscala utilizzato: 30V);
- oscilloscopio digitale RIGOL;
- basette sperimentali;
- resistenze varie;
- un amplificatore operazionale, od op-amp, 741.

ii. Cenni di teoria

Un amplificatore operazionale è un dispositivo in grado di amplificare l'ampiezza di un segnale in ingresso, una volta che gli sia fornita esternamente un'alimentazione in maniera duale. Tale tensione di alimentazione si dice duale (Dual Power Supply) o anche doppia se è fornita attraverso due canali di un alimentatore in corrente continua. Questo tipo di alimentazione è necessario per rispettare il vincolo sulla massima tensione di uscita fornita dall'operazionale, la quale sarà $V_{out} = A * (V_+ - V_-)$, dove A è definito come guadagno ad anello aperto e $(V_+ - V_-)$ come segnale in ingresso V_s .

Si noti che A è un guadagno diverso rispetto a quello che si andrà a studiare con la presente esperienza, G , che viene definito come guada-

gno ad anello chiuso, in quanto le configurazioni che si andranno ad implementare presentano entrambe un feedback negativo (perciò G è l'effettiva capacità che l'operazionale ha di incrementare l'ampiezza del segnale, ovvero il rapporto tra la tensione in uscita e quella in ingresso).

Il *negative feedback* consiste nel collegare il segnale di output dell'operazionale, all'input di polarità negativa dello stesso, in questo modo si crea un circuito autoregolante in grado di aumentare o abbassare V_{out} rispettivamente quando questo risulta essere < 0 o > 0 della V_{in} . Il guadagno G che ci interessa è proprio il risultato di questo processo, infatti il segnale che entra nell'amplificatore, che chiamiamo V_i (input), altro non è che il segnale erogato dal generatore di funzioni V_s diminuito di una quantità $\beta * V_o = V_f$ feedback, dove V_o (output) è il segnale in uscita dall'operazionale e β è una costante maggiore di zero, che indica il guadagno netto della rete di feedback. Facendo il sistema:

$$\begin{cases} V_o = AV_i \\ V_f = \beta V_o \\ V_i = V_s - V_f \end{cases}$$

si può ricavare:

$$G = \frac{V_o}{V_s} = \frac{A}{1 + \beta A}$$

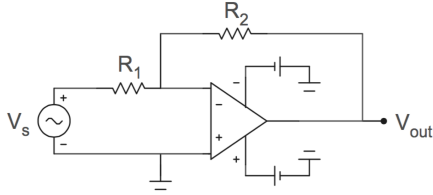
che è il guadagno dell'op-amp con feedback negativo. Si noti che è sempre verificata la di-

suguaglianza $G < A$.

G dipende, quindi, esclusivamente dal modo in cui il nostro operatore verrà implementato nel circuito, noi studieremo due possibili assemblaggi:

- *Amplificatore invertente:*

Figura 1: Amplificatore operazionale invertente



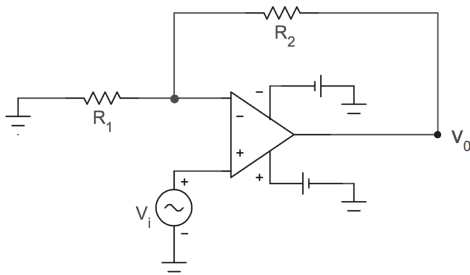
caratterizzato da un guadagno pari a $G = \frac{V_o}{V_s} = -\frac{R_2}{R_1}$ e perciò da un'inversione della polarità del segnale in uscita rispetto a quello in entrata.

Questo perché si ha, grazie al principio del corto virtuale e alla regola della corrente:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{(V_s - V_{GND})}{R_1} = \frac{V_s}{R_1} \\ I_1 = I_2 \\ V_{GND} - V_o = R_2 I_2 = V_s \frac{R_2}{R_1} \end{cases}$$

- *Amplificatore non-invertente:*

Figura 2: Amplificatore operazionale non invertente



caratterizzato da un guadagno pari a $G = \frac{V_o}{V_s} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ che mantiene la polarità della tensione in ingresso inalterata.

Questo perché si ha, grazie al principio del corto virtuale e alla regola della corrente:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{(V_{GND} - V_s)}{R_1} = -\frac{V_s}{R_1} \\ I_1 = I_2 \\ V_s - V_o = R_2 I_2 = -V_s \frac{R_2}{R_1} \end{cases}$$

II. PROCEDURA SPERIMENTALE

Per descrivere qualitativamente il funzionamento dell'amplificatore operazionale sia in configurazione invertente che non invertente vengono implementati su basetta rispettivamente i circuiti di Figura 1 e Figura 2.

Per entrambe le configurazioni si sono scelte come resistenze, $R_1 = (7,96 \pm 0,03)k\Omega$ e $R_2 = (21,3 \pm 0,2)k\Omega$ cosicché si avesse un guadagno per l'op-amp invertente pari a $G_{inv} = -2,65 \pm 0,03$ e per quello non invertente di $G_{non-inv} = 3,65 \pm 0,03$. Il circuito è stato infine alimentato con un $V_{+cc} = 15V$ e $V_{-cc} = -15V$, sono state collegate tutte le messe a terra in comune con quella del generatore di funzioni, e si è utilizzata una V_{in} piccola abbastanza da non fare andare V_{out} fuori dalla portata massima dell'oscilloscopio e da non farlo saturare.

Conclusa la caratterizzazione qualitativa dell'op-amp si è scelta la configurazione *invertente*, mantenendo le componenti e le alimentazioni del circuito precedente fatta eccezione per le resistenze che sono state cambiate in $R_1 = (8,15 \pm 0,03)k\Omega$ e $R_2 = (21,3 \pm 0,2)k\Omega$, per passare ad un'analisi quantitativa del guadagno in funzione dell'ampiezza in ingresso e di quello in funzione della frequenza.

Per entrambe le analisi si è generata un'onda sinusoidale, che nell'analisi in funzione della V_{in} ha frequenza fissata (a 100Hz) e nella caratterizzazione della banda passante ha V_{in} fissata e frequenza variabile.

Infine si sono andati a variare i guadagni, ovvero a cambiare le resistenze, e a caratterizzare ciascuna banda passante andando a fare il grafico del GBWP. Le varie coppie di resistenze

utilizzate sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = (8,15 \pm 0,03)k\Omega \text{ e } R_2 = (46,2 \pm 0,3)k\Omega \\ \rightarrow |G| = 5,60 \pm 0,06 \\ R_1 = (21,3 \pm 0,2)k\Omega \text{ e } R_2 = (46,2 \pm 0,3)k\Omega \\ \rightarrow |G| = 2,17 \pm 0,03 \\ R_1 = (8,15 \pm 0,03)k\Omega \text{ e } R_2 = (32,6 \pm 0,2)k\Omega \\ \rightarrow |G| = 4,00 \pm 0,04 \end{array} \right.$$

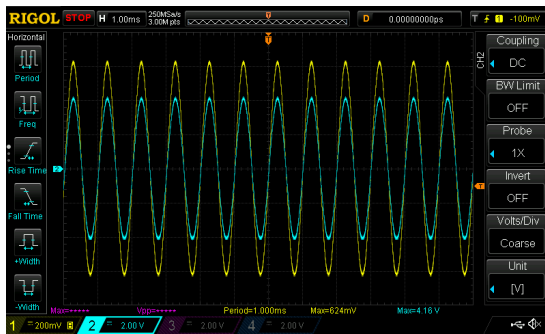
III. ANALISI DATI

Le acquisizioni per la verifica qualitativa del funzionamento di un op-amp invertente e non invertente sono rispettivamente in Figura 3 e 4.

Figura 3: Op-amp invertente



Figura 4: Op-amp non invertente



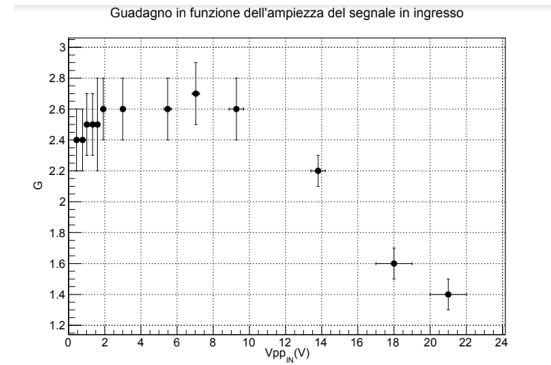
Si notano immediatamente (facendo attenzione alle scale diverse utilizzate per i due canali dell'oscilloscopio) i comportamenti fondamentali delle due configurazioni, cioè in Figura 3 il segnale in entrata (giallo) viene amplificato e invertito in uscita (blu) e in Figura 4 il segnale

in entrata (giallo) è amplificato ma non invertito in uscita (blu).

I dati per l'analisi del guadagno in funzione dell'ampiezza in ingresso e per quella del guadagno in funzione della frequenza sono raccolti rispettivamente nelle Tabelle 1 e 5.

Il grafico per la caratterizzazione dell'op-amp in funzione di V_{in} è:

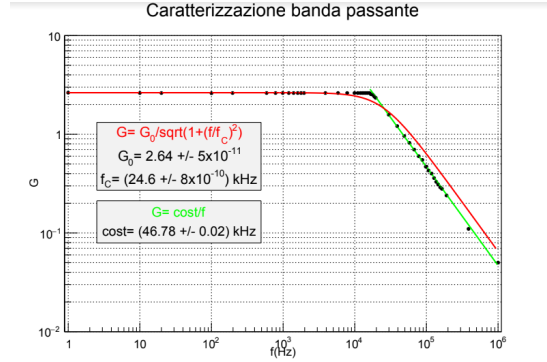
Figura 5: Caratterizzazione in funzione dell'ampiezza in ingresso: $|G| = 2,61$



in cui si nota l'andamento costante del guadagno fino ad una $V_{in} = (9,3 \pm 0,4)V$, coerentemente a quanto ci aspettavamo dato che avendo un'alimentazione dell'op-amp di $V_{+cc} = 15V$ e $V_{-cc} = -15V$ e un guadagno di $|G| = 2,61 \pm 0,03$ l'onda uscente deve venire clippata una volta raggiunta un'ampiezza picco-picco di 30V; dopo il tratto costante il guadagno decresce con un andamento iperbolico.

Il fit per la caratterizzazione della banda passante è:

Figura 6: Caratterizzazione banda passante: $|G| = 2,61$



da cui si possono estrarre i valori di G_0 e di frequenza di taglio f_c sperimentali:

$$\begin{aligned} G_0 &= 2,64 \\ f_c &= 24600 \text{ Hz} \end{aligned}$$

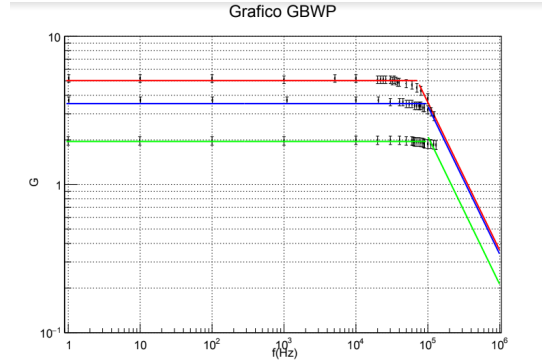
il primo risulta coerente con il valore teorico di $|G| = 2,61 \pm 0,03$ ed il secondo è indicativamente coerente con quanto si vede nel fit in Figura 6.

Inoltre andando a prendere i valori del guadagno a $f_1 = 100 \text{ kHz}$ e a $f_2 = 1 \text{ MHz}$ si ottiene che $\frac{G_2}{G_1} = \frac{0,05}{0,47} \approx 0,1$ e quindi si ha una caratterizzazione della slope del fit 6, per $f \gg f_c$, di:

$$10 \log\left(\left(\frac{G_2}{G_1}\right)^2\right) = 20 \log\left(\frac{G_2}{G_1}\right) \approx -20 \text{ dB/decade} \quad (1)$$

Infine i fit ottenuti con le tre configurazioni, in cui si hanno $|G| = 2,17 \pm 0,03$, $|G| = 4,00 \pm 0,04$ e $|G| = 5,60 \pm 0,06$ (Tabelle 3, 4 e 2), sono stati messi insieme per notare l'andamento differente, per diversi guadagni, in funzione della frequenza dovuto al GBWP:

Figura 7: GBWP



IV. CONCLUSIONI

I risultati sperimentali ottenuti sono tutti in ottima parte coerenti con quelli teorici attesi, fatta eccezione per il grafico del GBWP in cui si può notare come, nonostante le zone in cui le curve decrescono siano abbastanza simili tra loro, quella della curva verde non si allinea con quelle delle curve blu e rossa, probabilmente perché abbiamo concluso la presa dati troppo presto (si può notare infatti come gli ultimi punti stiano appena cominciando a decrescere e che probabilmente la curva si sarebbe allineata con le altre) non permettendo al fit di far vedere il reale andamento finale della curva verde.

Tabella 1: Caratterizzazione in funzione dell'ampiezza in ingresso: $|G| = 2,61 \pm 0,03$

$V_{P_{input}}(V)$	$ G $
$0,44 \pm 0,02$	$2,4 \pm 0,2$
$0,776 \pm 0,02$	$2,4 \pm 0,2$
$1,01 \pm 0,04$	$2,5 \pm 0,2$
$1,33 \pm 0,04$	$2,5 \pm 0,2$
$1,6 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,3$
$1,9 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,2$
$3,0 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,2$
$5,5 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,2$
$7,0 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,2$
$9,3 \pm 0,4$	$2,6 \pm 0,2$
$13,8 \pm 0,4$	$2,2 \pm 0,1$
18 ± 1	$1,6 \pm 0,1$
21 ± 1	$1,4 \pm 0,1$

Tabella 3: Caratterizzazione banda passante: $|G| = 2,17 \pm 0,03$

Frequenza (Hz)	$ V_{output}/V_{input} $
$1,00 \pm 0,01$	$2,0 \pm 0,1$
$9,90 \pm 0,01$	$2,0 \pm 0,1$
100 ± 1	$2,0 \pm 0,1$
1000 ± 10	$2,0 \pm 0,1$
10000 ± 100	$2,0 \pm 0,1$
20000 ± 100	$2,0 \pm 0,1$
30100 ± 100	$2,0 \pm 0,1$
40300 ± 100	$2,0 \pm 0,1$
50000 ± 100	$2,0 \pm 0,1$
59900 ± 100	$2,0 \pm 0,1$
62100 ± 100	$2,0 \pm 0,1$
64100 ± 100	$2,0 \pm 0,1$
66200 ± 100	$1,9 \pm 0,1$
70400 ± 100	$1,9 \pm 0,1$
75200 ± 100	$1,9 \pm 0,1$
80000 ± 100	$1,9 \pm 0,1$
84900 ± 100	$1,9 \pm 0,1$
88000 ± 1000	$1,9 \pm 0,1$
89000 ± 100	$1,9 \pm 0,1$
100000 ± 1000	$1,9 \pm 0,1$
110000 ± 1000	$1,9 \pm 0,1$
120000 ± 1000	$1,9 \pm 0,1$
130000 ± 1000	$1,9 \pm 0,1$

Tabella 2: Caratterizzazione banda passante: $|G| = 5,60 \pm 0,06$

Frequenza(Hz)	$ V_{output}/V_{input} $
$1,02 \pm 0,01$	$5,2 \pm 0,3$
$10,0 \pm 0,1$	$5,2 \pm 0,3$
100 ± 1	$5,2 \pm 0,3$
1000 ± 10	$5,1 \pm 0,3$
5100 ± 10	$5,2 \pm 0,3$
10000 ± 100	$5,2 \pm 0,3$
20000 ± 100	$5,1 \pm 0,3$
22000 ± 100	$5,1 \pm 0,3$
24000 ± 100	$5,1 \pm 0,3$
26000 ± 100	$5,1 \pm 0,3$
30100 ± 100	$5,1 \pm 0,3$
32000 ± 100	$5,0 \pm 0,3$
34000 ± 100	$5,1 \pm 0,3$
36000 ± 100	$5,0 \pm 0,3$
38000 ± 100	$4,9 \pm 0,3$
40000 ± 100	$4,9 \pm 0,3$
50000 ± 100	$4,8 \pm 0,3$
60200 ± 100	$4,7 \pm 0,3$
70400 ± 100	$4,5 \pm 0,3$
80000 ± 100	$4,3 \pm 0,3$
100000 ± 1000	$3,9 \pm 0,3$

Tabella 4: Caratterizzazione banda passante: $|G| = 4,00 \pm 0,04$

<i>Frequenza(Hz)</i>	$ V_{output} / V_{input} $
1,02 \pm 0,01	3,7 \pm 0,3
10,1 \pm 0,1	3,7 \pm 0,3
101 \pm 1	3,7 \pm 0,3
1100 \pm 10	3,7 \pm 0,3
10000 \pm 100	3,7 \pm 0,3
20500 \pm 100	3,7 \pm 0,3
30100 \pm 100	3,6 \pm 0,3
40300 \pm 100	3,6 \pm 0,3
45000 \pm 100	3,6 \pm 0,3
50000 \pm 100	3,5 \pm 0,3
54900 \pm 100	3,5 \pm 0,3
60200 \pm 100	3,5 \pm 0,3
65300 \pm 100	3,4 \pm 0,3
69900 \pm 100	3,4 \pm 0,3
75200 \pm 100	3,4 \pm 0,2
76900 \pm 100	3,4 \pm 0,3
80000 \pm 100	3,4 \pm 0,3
85500 \pm 100	3,3 \pm 0,2
90100 \pm 100	3,3 \pm 0,2
100000 \pm 1000	3,2 \pm 0,2
111000 \pm 1000	3,1 \pm 0,2
122000 \pm 1000	2,9 \pm 0,2

Tabella 5: Caratterizzazione banda passante: $|G| = 2,61 \pm 0,03$

<i>Frequenza(Hz)</i>	$ V_{output} / V_{input} $	<i>Frequenza(Hz)</i>	$ V_{output} / V_{input} $
1,00 \pm 0,01	2,64	16800 \pm 100	2,55
10,0 \pm 0,1	2,62	18000 \pm 100	2,50
20,0 \pm 0,1	2,62	18800 \pm 100	2,41
100 \pm 1	2,61	19600 \pm 100	2,34
197 \pm 1	2,62	29800 \pm 100	1,58
588 \pm 1	2,62	39100 \pm 100	1,21
784 \pm 1	2,62	49000 \pm 100	0,96
988 \pm 1	2,62	57000 \pm 100	0,82
1200 \pm 10	2,62	67400 \pm 100	0,70
1400 \pm 10	2,62	78000 \pm 100	0,60
1600 \pm 10	2,62	87700 \pm 100	0,55
1780 \pm 10	2,62	98000 \pm 100	0,47
1960 \pm 10	2,62	100000 \pm 1000	0,47
3890 \pm 10	2,62	107000 \pm 1000	0,43
5840 \pm 10	2,62	118000 \pm 1000	0,40
7840 \pm 10	2,62	128000 \pm 1000	0,36
9920 \pm 10	2,62	137000 \pm 1000	0,33
11000 \pm 100	2,62	146000 \pm 1000	0,31
12000 \pm 100	2,62	150000 \pm 1000	0,29
13000 \pm 100	2,62	165000 \pm 1000	0,28
14000 \pm 100	2,62	191000 \pm 1000	0,24
15000 \pm 100	2,62	387000 \pm 1000	0,11
16000 \pm 100	2,62	1000000 \pm 10000	0,05