UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA

DIPARTIMENTO DI ECONOMIA, INGEGNERIA, SOCIETÀ E IMPRESA

Corso di Laurea in Ingegneria Industriale

Laboratorio di Misure Meccaniche e Termiche

A.A 2022-2023

Relazione Esercitazione 2

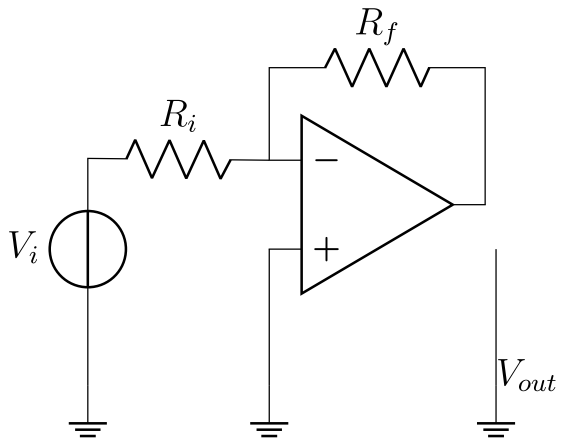
Amplificatore operazionale

Andrea Marchegiani, Gruppo 3, mat. 810513
andrea.marchegiani@studenti.unitus.it

28/11/2022

Indice

Amplificatore in configurazione invertente



Per il principio di massa virtuale

$$V_+ = V_-$$

Ciò in prima approssimazione può considerarsi corretto perché:

1. Come la resistenza interna all'amplificatore aumenta, diminuirà la corrente che vi scorre attraverso e quindi la differenza di potenziale ai morsetti + e - si ridurrà fino a tendere a zero.

2. Operativamente si osserva in uscita un segnale che non satura, allora nella relazione
$$V_{out} = A(V_+ - V_-)$$
Si può porre
$$A \to \infty \Rightarrow \Delta V \to 0$$
E quindi
$$V_+ \approx V_-$$

Nel circuito chiuso invertente il morsetto + è posto a terra e quindi $V_+ = 0$, applicando il principio di massa virtuale si osserva così che:

$$V_- = V_+ = 0$$

La corrente che scorre su R_i è

$$I^* = \frac{V_i - V_-}{R_i}$$

Mentre quella che scorre su R_f è

$$I^{**} = \frac{V_- - V_{out}}{R_f}$$

Poiché la corrente sul circuito è la stessa, questi di contribuiti devono essere uguali, si ricava così

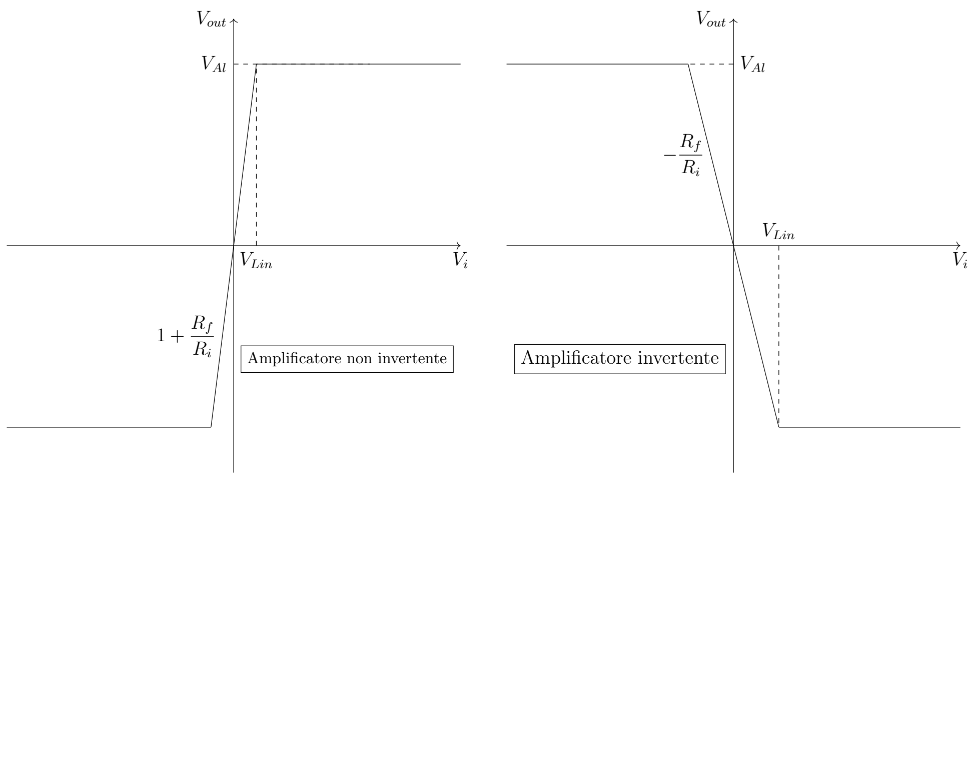
$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} V_i \tag{1}$$

La quantità $\dfrac{R_f}{R_i}$ altro non è che il guadagno, l'entità con cui si amplifica o si deamplifica il segnale in ingresso, la pendenza della curva caratteristica ingresso - uscita.

Similmente, per un circuito chiuso dove il segnale in ingresso è posto sul ramo non invertente (amplificatore non invertente), varrà

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_i$$

In questo caso il guadagno sarà sempre positivo e maggiore dell'unità per cui non sarà possibile deamplificare il segnale in ingresso.



Ai fini dell'esperienza, per realizzare un amplificatore invertente dal guadano di 2.2 si pone sul ramo di feedback una resistenza $R_f = 2.2\,\mathrm{k\Omega}$ mentre sul ramo invertente una resistenza di $R_i = 1\,\mathrm{k\Omega}$, in questo modo il guadagno teorico è pari a

$$G^{th} = \frac{2.2\,\mathrm{k\Omega}}{1\,\mathrm{k\Omega}} = 2.2$$

Quesito 1: determinare sperimentalmente il guadagno

Se il segnale in uscita è BLU e quello in ingresso è GIALLO si può calcolare il guadagno sperimentale dalla (1)

$$V_{out} = GV_i \Rightarrow G = \left|\frac{V_{out}}{V_i}\right|$$

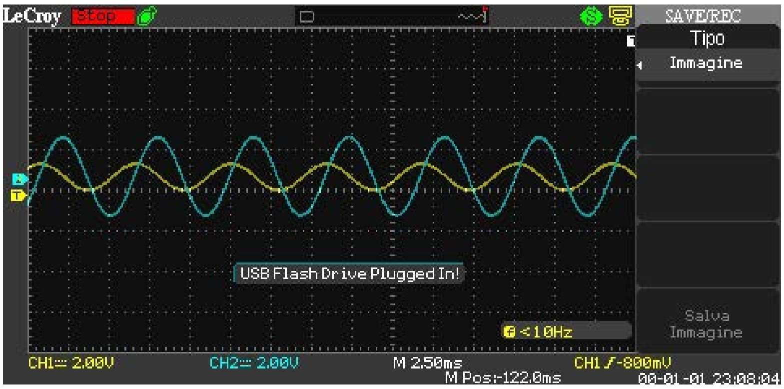


Figura 2: Amplificatore invertente, valutazione sperimentale del guadagno

Dall'oscilloscopio si legge che

$$V_i = 1.6\,\mathrm{V} \qquad V_{out} = 3.9\,\mathrm{V}$$

Per cui

$$G^{Re} = \frac{3.9\,\mathrm{V}}{1.6\,\mathrm{V}} = 2.4$$

Il segnale è deamplificato

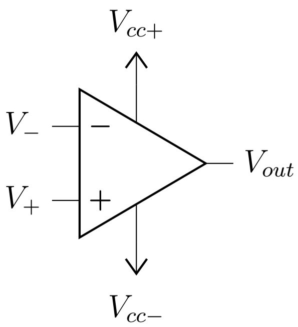
Quesito 2: Per quale ampiezza teorica l'amplificatore va in saturazione?

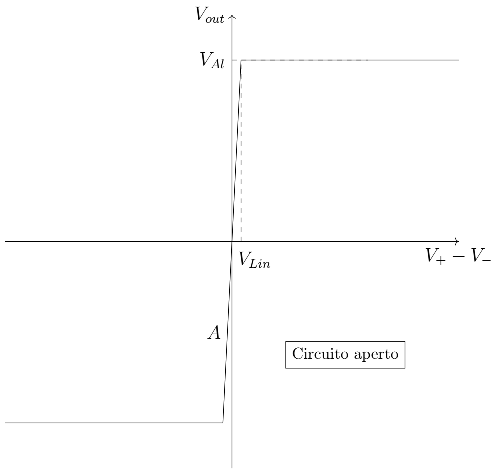
Per il teorema di non amplificazione, l'amplificatore va in saturazione quando in ingresso è applicato un segnale pari a quello di alimentazione dell'amplificatore stesso, che per l'amplificatore in esame ($\mu A741$) vale $V_{cc} = \pm 15\,\text{V}$.

Per un amplificatore a circuito aperto si può scrivere

$$V_{out} = A(V_+ - V_-)$$

In questo tipo di amplificatori il guadagno può raggiungere valori dell'ordine di $A = 10^6$, poiché il guadagno indica la pendenza della caratteristica ingresso - uscita, più il guadagno cresce più la retta diviene pendente, ciò significa avere una zona di linearità enormemente ridotta.





Infatti per in circuito aperto varrebbe

$$\Delta V_{Lin} = \frac{V_{cc}}{A} = 15\,\mu\text{V}$$

Ciò significa che non appena la differenza di tensione in ingresso è di pochissimo superiore allo zero, il segnale satura alla tensione di alimentazione: è per questo che il circuito aperto non può essere usato come amplificatore (tuttalpiù come comparatore), proprio a causa del suo elevatissimo guadagno che limita fortemente la sua zona di linearità.

Al fine perciò di realizzare un amplificatore che permetta la corretta visualizzazione del segnale amplificato si decide di chiudere il circuito e applicare una retroazione: il segnale in uscita viene riportato all'ingresso mediante un ramo di feedback costituito da elementi passivi, che sebbene comporti un abbassamento del guadagno, permette di avere una zona di linearità maggiore, pur non eliminando del tutto il problema della saturazione.

Per rispondere al quesito:
L'ampiezza teorica di saturazione sarà

$$\Delta V^{th} = \frac{V_{cc}}{G^{th}} = \frac{15\,\mathrm{V}}{2.2} = 6.81\,\mathrm{V}$$

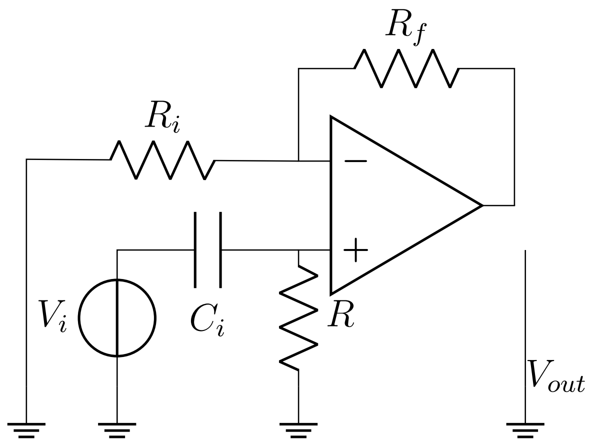
Mentre quella sperimentale sarà

$$\Delta V^{Re} = \frac{V_{cc}}{G^{Re}} = \frac{15\,\mathrm{V}}{2.4} = 6.25\,\mathrm{V}$$

Con un errore relativo pari a

$$e\% = \frac{\Delta V^{Re} - \Delta V^{th}}{\Delta V^{Re}} \cdot 100 = 8.2\%$$

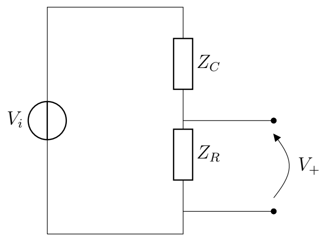
Filtro attivo passa alto non invertente



Si nota immediatamente che $V_- = 0$, per cui dall'uguaglianza della corrente che scorre sul ricruito si ricava

$$-\frac{V_+}{R_i} = \frac{V_+ - V_{out}}{R_f} \Rightarrow V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_+$$

V_+ diviene calcolabile a partire dalla formula del partitore di corrente-



$$V_+ = \frac{Z_R}{Z_R + Z_C} V_i = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} V_i = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} V_i$$

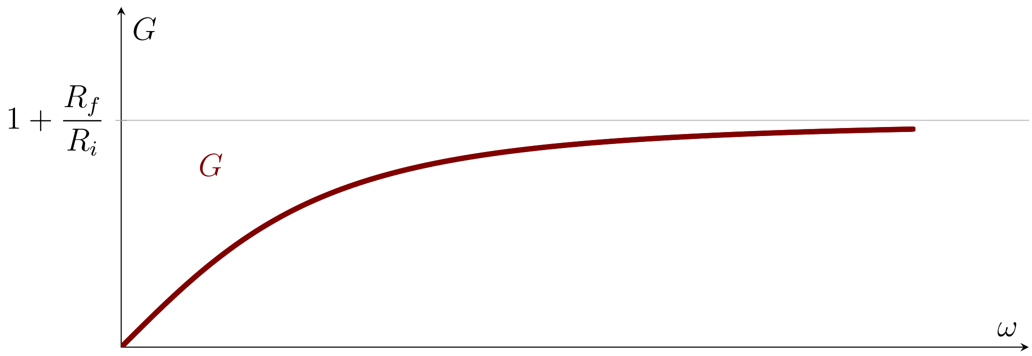
Per cui

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} V_i$$

Il guadagno sarà sempre

$$G = \left|\frac{V_{out}}{V_i}\right| = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \tag{2}$$

Evidenziando un andamento del genere



Ai fini dell'esperienza sono stati utilizzati sul ramo non invertente $C_i = 0.1\,\mu\text{F}$ e $R = 1\,\text{k}\Omega$, mentre sul ramo invertente e su quello di feedback rispettivamente $R_i = 1\,\text{k}\Omega$, $R_f = 1\,\text{k}\Omega$

Quesito 1: calcolare la frequenza di taglio teorica

La frequenza di taglio teorica si trova a partire dalla sua definizione, ci si chiede ossia dov'è che il segnale viene deamplificato dal suo massimo di 3 dB

$$-3 = 20\log_{10}\left(\frac{G_{f_t}}{G_0}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{\omega RC}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}\right)$$

Ovvero se e solo se

$$\frac{\omega RC}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

E quindi

$$2(\omega RC)^2 = 1 + (\omega RC)$$
$$\omega RC = 1$$

Poiché

$$\omega = 2\pi f_t$$

Allora

$$f_t = \frac{1}{2\pi RC}$$

Per rispondere al quesito, la frequenza di taglio teorica vale

$$f_t^{th} = \frac{1}{2\pi\cdot 1\times 10^{-7}\,\text{F}\cdot 1\times 10^{3}\,\Omega} = 1.591\,\text{kHz}$$

Quesito 2: Calcolare l'amplificazione

Il guadagno ideale si può calcolare come l'asintoto a cui tende il grafico del guadagno

$$G_0 = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{1\,\mathrm{k}\Omega}{1\,\mathrm{k}\Omega} = 2$$

Se il segnale in ingresso è BLU e quello in uscita è GIALLO si può calcolare il guadagno reale sempre come

$$G^{Re} = \left|\frac{V_{out}}{V_i}\right|$$

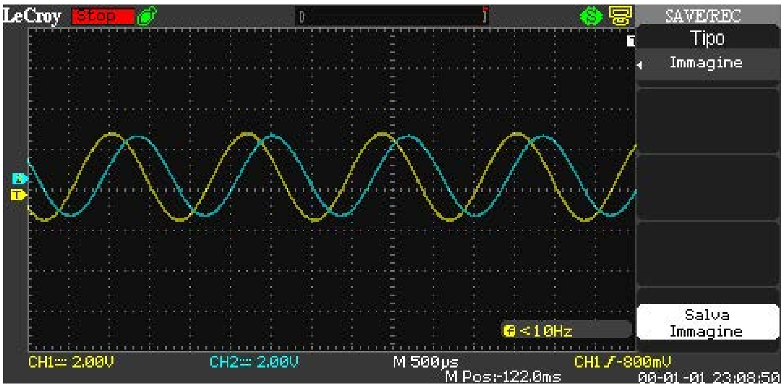


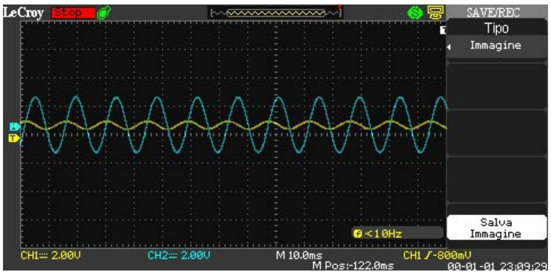
Figura 4: Filtro passa-alto, valutazione sperimentale del guadagno

Dall'oscilloscopio si legge che

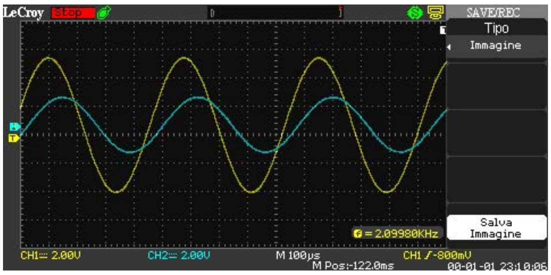
$$V_i = 4\,\mathrm{V} \qquad V_{out} = 4.4\,\mathrm{V}$$

Per cui

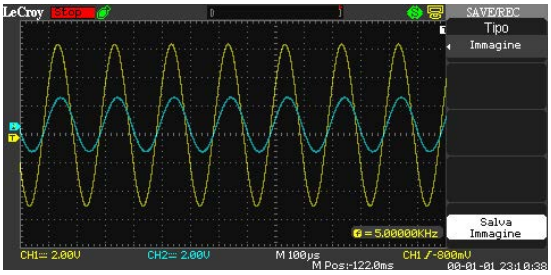
$$G^{Re} = \frac{4.4\,\mathrm{V}}{4\,\mathrm{V}} = 1.1$$



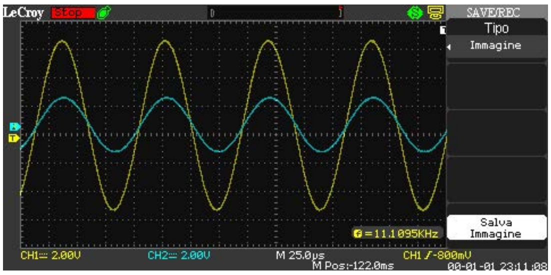
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5: Grafici di cui calcolare la frequenza del segnale in ingresso ed il guadagno sperimentale

Quesito 3: calcolare la frequenza del segnale in ingresso

$$f = \frac{1}{T}$$

La frequenza del segnale in ingresso è calcolabile dall'oscilloscopio.
Si divide la base dei tempi per il numero di divisioni della singola unità, dopodiché si moltiplica questo valore per il numero di divisioni individuate all'interno dei due massimi o due minimi successivi e si ottiene il periodo.

- 5a
$$\text{Base Tempi} = 2\frac{\text{ms}}{\text{div}}$$
$$T = 7\ \text{div} \cdot 2\frac{\text{ms}}{\text{div}} = 14\,\text{ms}$$
$$f = \frac{1}{T} = 0.071\,\text{kHz}$$

- 5b
$$\text{Base Tempi} = 20\frac{\mu\text{s}}{\text{div}}$$
$$T = 24\ \text{div} \cdot 520\frac{\mu\text{s}}{\text{div}} = 480\,\mu\text{s}$$
$$f = \frac{1000}{T} = 2.08\,\text{kHz}$$

- 5c
$$\text{Base Tempi} = 20\frac{\mu\text{s}}{\text{div}}$$
$$T = 10\ \text{div} \cdot 520\frac{\mu\text{s}}{\text{div}} = 200\,\mu\text{s}$$
$$f = \frac{1000}{T} = 5\,\text{kHz}$$

- 5d
$$\text{Base Tempi} = 5\frac{\mu\text{s}}{\text{div}}$$
$$T = 18\ \text{div} \cdot 5\frac{\mu\text{s}}{\text{div}} = 90\,\mu\text{s}$$
$$f = \frac{1000}{T} = 11.11\,\text{kHz}$$

Quesito 4: Costruire il grafico guadagno frequenza e calcolare sperimentalmente la frequenza di taglio

Il guadagno del segnale in ingresso è calcolabile dalla relazione (2)

$$G = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

Dove

$$\omega = 2\pi f$$

Allora per ogni immagine si avrà

Tabella 1: Quesito 4

Figura	ω [1/s]	G
5a	0.0446×10^4	0.0891
5b	1.3069×10^4	1.5884
5c	3.1416×10^4	1.9058
5c	6.9806×10^4	1.9798

In questo modo si trova che il guadagno massimo del segnale è pari a

$$G_{\max} = 1.9798$$

La frequenza di taglio si individua per una deamplificazione del guadagno massimo di 3 dB per cui

$$G_{f_t} = \frac{1.9798}{\sqrt{2}} = 1.3999 \simeq 1.4$$

Graficamente si ottiene una frequenza di taglio sperimentale pari a

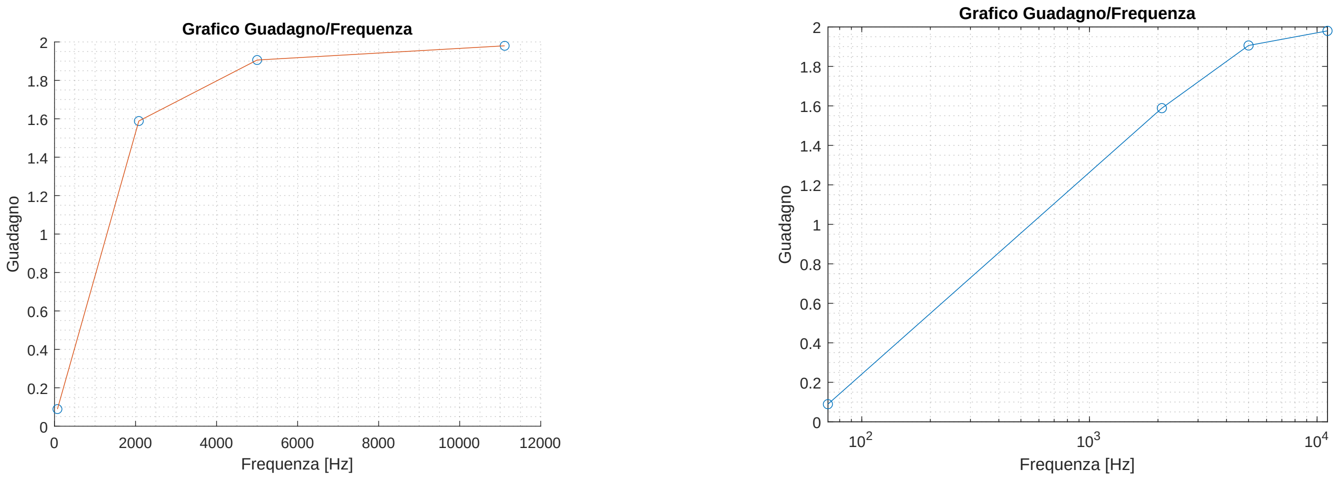
$$f_t^{Re} \simeq 1.9\,\text{kHz}$$

Attraverso un codice Matlab è possibile individuare l'intersezione tra G_{f_t} e la curva del valori per individuare con precisione la frequenza di taglio

$$f_t^{Re} = 1.8275\,\text{kHz}$$

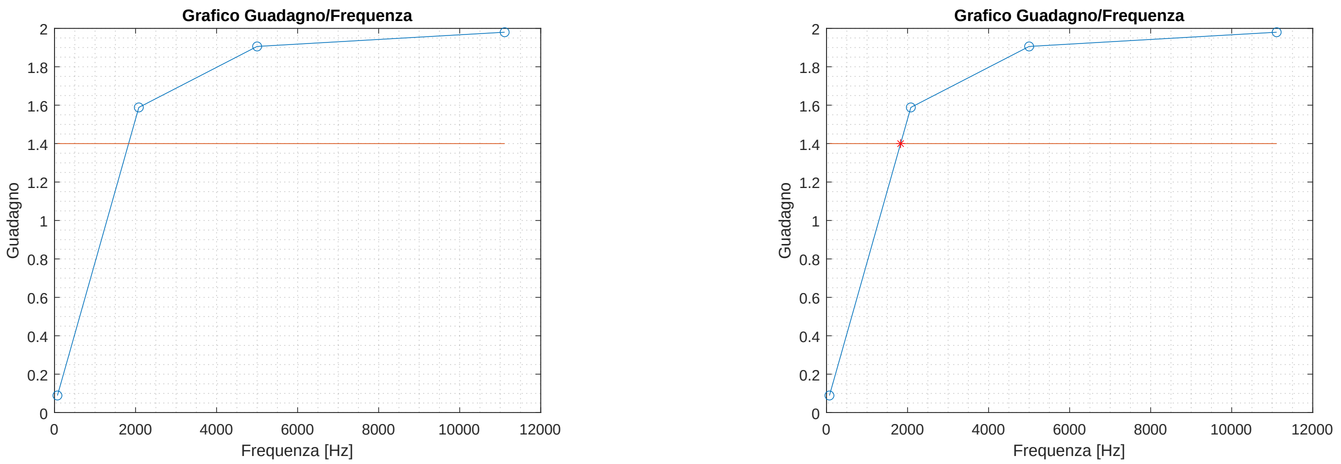
Grafici

Si riportano infine i grafici guadagno/frequenza, anche in scala semilogaritmica.



(a) (b)

E i grafici che conducono all'individuazione della frequenza di taglio



(a) (b)

Codice Matlab

```
clear all
close all
clc
format short

tic
%% Dati
f = [71 2080 5000 11110]; % Hz Frequenza
R = 1e3;
C = 1e-7;

% Calcolo del guadagno a partire dalla frequenza
G0 = 2;
omega = 2*pi.*f
wRC = omega*R*C;
den = sqrt(1+(wRC).^2);
G = G0*(wRC./den)
x = f; y = G;

%% Grafico dati
figure
plot(x,y, '-o')
grid minor
ylabel('Guadagno')
xlabel('Frequenza [Hz]')
title('Grafico Guadagno/Frequenza')
% Esportazione
ax = gca;
% exportgraphics(ax,'Gf_nonlog.pdf','Resolution',300)

%% Grafico semilogaritmico
figure
semilogx(x,y, '-o')
grid minor
ylabel('Guadagno')
xlabel('Frequenza [Hz]')
title('Grafico Guadagno/Frequenza semilogaritmico')
% Esportazione
ax = gca;
% exportgraphics(ax,'Gf_semilog.pdf','Resolution',300)


%% Individuazione della frequenza di taglio
yft = G(4)/sqrt(2)
xdb = [x(1) x(4)]; ydb = [yft yft];
figure
plot(x,y, '-o')
hold on
plot(xdb,ydb)
hold off
grid minor
ylabel('Guadagno')
xlabel('Frequenza [Hz]')
title('Grafico Guadagno/Frequenza')
```

```
% Impostazione degli assi
ax = gca;
ax.XAxisLocation = 'origin';
ax.YAxisLocation = 'origin';
% Esportazione
% exportgraphics(ax,'Gf_deamp.pdf','Resolution',300)


%% Intersezione
retta_db = polyfit(xdb, ydb,1);
retta_necessaria = polyfit([x(1) x(2)], [y(1) y(2)], 1);

x_intersect = fzero(@(x) polyval(retta_db-retta_necessaria,x),10e3);
y_intersect = polyval(retta_db,x_intersect);

figure
plot(x,y, '-o')
hold on
plot(xdb,ydb)
plot(x_intersect,y_intersect,'r*')
hold off
grid minor
ylabel('Guadagno')
xlabel('Frequenza [Hz]')
title('Grafico Guadagno/Frequenza')
% Impostazione degli assi
ax = gca;
ax.XAxisLocation = 'origin';
ax.YAxisLocation = 'origin';
% Esportazione
% exportgraphics(ax,'Gf_ft.pdf','Resolution',300)

disp(x_intersect)

toc
```