

RELAZIONE DI ELETTRONICA

Amplificatori Operazionali

FRANCESCO FORCHER

Università di Padova, Facoltà di Fisica

francesco.forcher@studenti.unipd.it

Matricola: 1073458

ENRICO LUSIANI

Università di Padova, Facoltà di Fisica

enrico.lusiani@studenti.unipd.it

Matricola: 1073300

LAURA BUONINCONTRI

Università di Padova, Facoltà di Fisica

laura.buonincontri@studenti.unipd.it

Matricola: 1073131

8 maggio 2016

Sommario

L'obiettivo dell'esperienza è la misura della curva di trasferimento di un amplificatore (in configurazione invertente e non invertente) e lo studio della sua risposta in frequenza (in configurazione non invertente).

INDICE

I	Schema Circuiti	2
II	Parte I	3
I	Amplificatore invertente	3
I.1	Calcolo amplificazione	4
I.2	Analisi	4
II	Amplificatore non invertente	4
II.1	Calcolo amplificazione	5
II.2	Analisi	6
III	Parte II	8
I	Amplificatore con A=10	8
II	Amplificatore con A=5	8
III	Amplificatore con A=1	9
IV	Discussione dei punti precedenti	10
IV	Analisi dei dati	17
V	Appendice: calcolo degli errori	17
VI	Conclusioni	17
VII	Codice	18

I. SCHEMA CIRCUITI

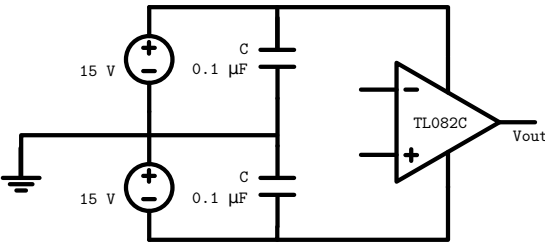


Figura 1: Resistenza in serie

Circuito di alimentazione:

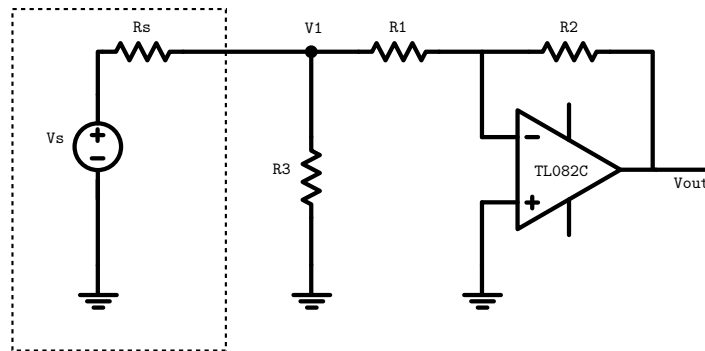


Figura 2: Resistenza in serie

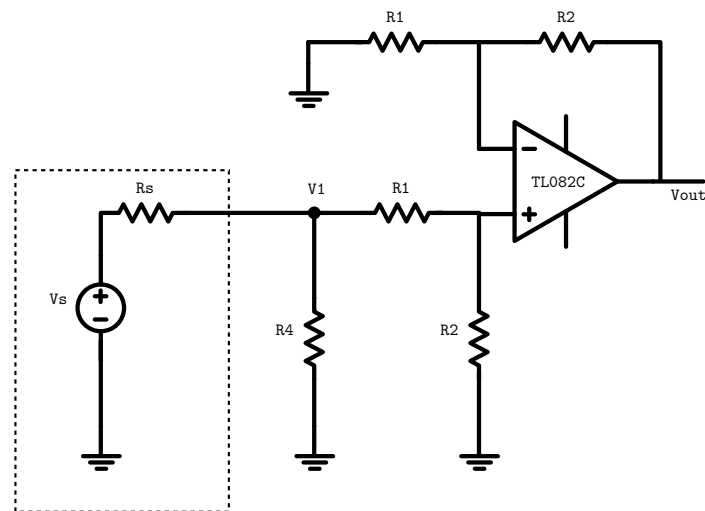


Figura 3: Resistenza in serie

II. PARTE I

II.1 Amplificatore invertente

Schema amplificatore invertente: Le resistenze sono state scelte in modo da avere guadagno $A = -10 \frac{V}{V}$

$$R_1 = 9.85 \pm 0.05 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 101.3 \pm 0.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 56.0 \pm 0.3 \Omega$$

Per il calcolo degli errori sul valore delle resistenze, lette sull'Agilent U1232A, è stata utilizzata la seguente formula:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_{\%}^2 + \sigma_{\text{dgt}}^2}$$

Per il calcolo delle σ_{tot} è stato cercato del datasheet dello strumento, l'errore percentuale e di digit corrispondente al fondo scala utilizzato.

I.1 Calcolo amplificazione

La relazione tra le resistenze, affinché soddisfino la richiesta $A=10$ è la seguente:

$$\begin{aligned}\frac{V_1 - V_n}{R_1} &= \frac{V_n - V_0}{R_2} \\ V_n &= 0 \\ \frac{V_1}{R_1} &= \frac{-V_0}{R_2} \\ V_0 &= -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_1\end{aligned}$$

Da cui si ricava la relazione per il calcolo di A .

I.2 Analisi

La stima di A teorica, a partire dalle resistenze misurate è:

$$A_{\text{teorica}} = 10.28 \pm 0.08$$

Le misure sono state fatte applicando una tensione sinusoidale di frequenza $f = 1 \text{ kHz}$, variando l'ampiezza tra $0.2V_{\text{pp}}$ e $4V_{\text{pp}}$.

In seguito è stato fatto il grafico della curva di trasferimento di un amplificatore invertente.

In seguito sono presentati i dati del **Grafico 1** acquisiti in laboratorio, con i rispettivi errori:

Per il calcolo degli errori sui valori di V_{in} e V_{out} letti sull'oscilloscopio, è stata utilizzata la seguente formula:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{(0.02 \cdot V_{\text{letto}})^2 + (0.06 \cdot V_{\text{div}})^2}$$

E' stata fatta l'interpolazione lineare dei punti nel **Grafico 1** pesata dei punti compresi tra 0 e 1.5 V.

$$q = 0.02 \pm 0.03 \text{ V}$$

$$m = -10.0 \pm 0.1 \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

II.II Amplificatore non invertente

Schema amplificatore non invertente: Le resistenze sono state scelte in modo da avere guadagno $A = 10 \frac{\text{V}}{\text{V}}$

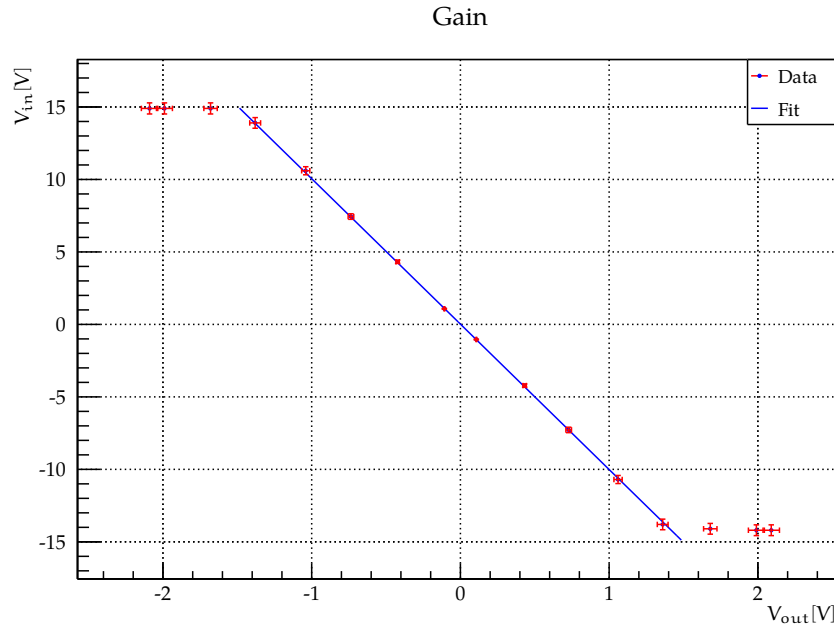
$$R_{1,\text{up}} = 9.91 \pm 0.05 \text{ k}\Omega$$

$$R_{1,\text{down}} = 9.85 \pm 0.05 \text{ k}\Omega$$

$$R_{2,\text{up}} = 99.7 \pm 0.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_{2,\text{down}} = 101.3 \pm 0.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 56.0 \pm 0.3 \Omega$$

Grafico 1 Curva di trasferimento di un amplificatore invertente

II.1 Calcolo amplificazione

La relazione tra le resistenze, affinché soddisfino la richiesta $A=10$ è la seguente:
 Nell'ingresso non invertente:

$$\frac{V_1 - V_p}{R_{1down}} = \frac{V_p}{R_{2down}}$$

$$\frac{V_1}{R_{1down}} = \frac{V_p}{R_{1down}} + \frac{V_p}{R_{2down}} = V_p \left(\frac{1}{R_{1down}} + \frac{1}{R_{2down}} \right)$$

Nell'ingresso invertente:

$$\frac{V_0 - V_n}{R_{2up}} = \frac{V_n}{R_{1up}}$$

$$\frac{V_0}{R_{2up}} = \frac{V_n}{R_{1up}} + \frac{V_n}{R_{2up}} = V_n \left(\frac{1}{R_{1up}} + \frac{1}{R_{2up}} \right)$$

Poichè

$$V_p = V_n$$

$$\frac{V_1}{R_{1down}} \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{1down}} + \frac{1}{R_{2down}} \right)} = \frac{V_0}{R_{2up}} \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{1up}} + \frac{1}{R_{2up}} \right)}$$

$$V_0 = \frac{R_{2up}}{R_{1down}} \cdot V_1 \frac{\left(\frac{1}{R_{1up}} + \frac{1}{R_{2up}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{1down}} + \frac{1}{R_{2down}} \right)}$$

Tabella 1: Dati curva di trasferimento

$V_{in+} \pm \sigma_{V_{in+}} (V)$	$V_{in-} \pm \sigma_{V_{in-}} (V)$	FS (V)	$V_{out+} \pm \sigma_{V_{out+}} (V)$	$V_{out-} \pm \sigma_{V_{out-}} (V)$	FS (V)
1.06 ± 0.03	-1.04 ± 0.03	0.3	-10.7 ± 0.3	10.6 ± 0.3	3
0.107 ± 0.003	-0.108 ± 0.003	0.03	-1.04 ± 0.03	1.08 ± 0.03	0.3
0.43 ± 0.01	-0.422 ± 0.01	0.12	-4.2 ± 0.1	4.32 ± 0.1	1.2
0.73 ± 0.02	-0.74 ± 0.02	0.2	-7.3 ± 0.2	7.4 ± 0.2	2
1.36 ± 0.04	-1.38 ± 0.04	0.4	-13.8 ± 0.4	13.9 ± 0.4	4
1.68 ± 0.05	-1.68 ± 0.05	0.5	-14.1 ± 0.4	14.9 ± 0.4	4
1.99 ± 0.05	-1.99 ± 0.05	0.6	-14.2 ± 0.4	14.9 ± 0.4	4
2.09 ± 0.06	-2.09 ± 0.06	0.6	-14.2 ± 0.4	14.9 ± 0.4	4

Da cui si ricava la relazione per il calcolo di A. Se poi si assume che $R_{1down} = R_{1up}$ e $R_{2down} = R_{2up}$, la relazione si semplifica a

$$V_0 = \frac{R_{2up}}{R_{1down}} \cdot V_1$$

II.2 Analisi

La stima di A teorica, a partire dalle resistenze misurate è:

$$A_{teorica} = 10.08 \pm 0.07$$

Le misure sono state fatte applicando una tensione sinusoidale di frequenza $f = 1$ kHz, variando l'ampiezza tra $0.2V_{pp}$ e $4V_{pp}$.

In seguito è stato fatto il grafico della curva di trasferimento di un amplificatore non invertente.

In seguito sono presentati i dati del **Grafico 2** acquisiti in laboratorio, con i rispettivi errori:

E' stata fatta l'interpolazione lineare pesata dei punti nel **Grafico 2** compresi tra 0 e 1.5 V.

$$q = -0.007 \pm 0.03 \text{ V}$$

$$m = 10.0 \pm 0.1 \frac{V}{V}$$

Grafico 2 Curva di trasferimento di un amplificatore invertente

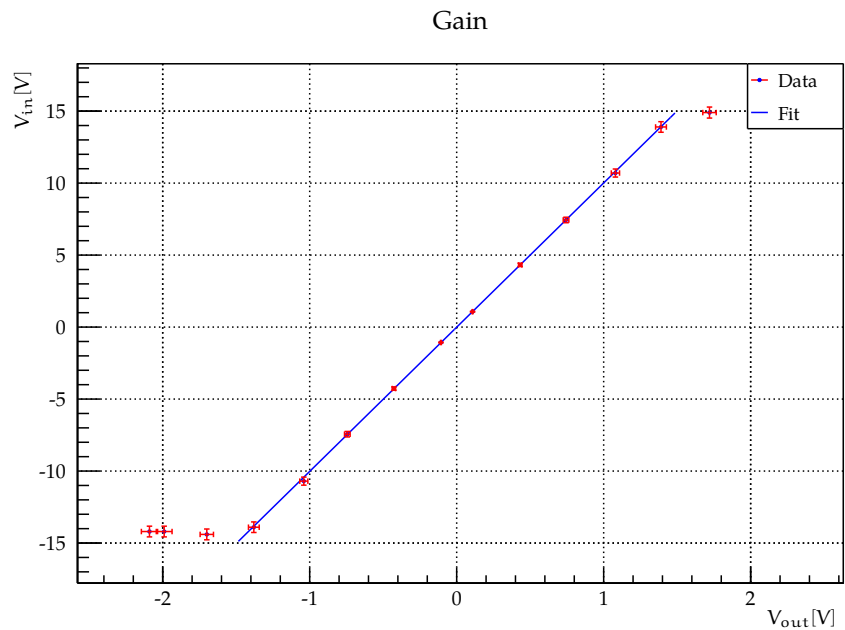


Tabella 2: Dati curva di trasferimento

$V_{in+} \pm \sigma_{V_{in+}}$ (V)	$V_{in-} \pm \sigma_{V_{in-}}$ (V)	FS (V)	$V_{out+} \pm \sigma_{V_{out+}}$ (V)	$V_{out-} \pm \sigma_{V_{out-}}$ (V)	FS (V)
1.08 ± 0.03	-1.04 ± 0.03	0.3	10.7 ± 0.3	-10.7 ± 0.3	3
0.108 ± 0.003	-0.107 ± 0.003	0.03	1.07 ± 0.003	-1.07 ± 0.03	0.3
0.43 ± 0.01	-0.43 ± 0.01	0.120	4.3 ± 0.1	-4.3 ± 0.1	1.2
0.74 ± 0.02	-0.74 ± 0.02	0.2	7.4 ± 0.2	-7.4 ± 0.2	2
1.39 ± 0.04	-1.38 ± 0.04	0.4	13.9 ± 0.4	-13.9 ± 0.4	4
1.72 ± 0.05	-1.70 ± 0.05	0.5	14.9 ± 0.4	-14.4 ± 0.4	4
2.04 ± 0.05	-1.99 ± 0.05	0.6	14.7 ± 0.4	-14.2 ± 0.4	4
2.14 ± 0.06	-2.09 ± 0.06	0.6	14.9 ± 0.4	-14.2 ± 0.4	4

III. PARTE II

Le misure sono state effettuate sull'amplificatore non invertente utilizzato al punto precedente e applicando una tensione sinusoidale di frequenza variabile mantenendo l'ampiezza $V_s = 2V_{pp}$.

III.I Amplificatore con $A=10$

Le resistenze inserite sono le stesse dello schema precedente, e quindi anche l'amplificazione teorica. In seguito è presentato il grafico della risposta in frequenza di un amplificatore invertente con $A=10$. In seguito sono presentati i dati del **Grafico 3** acquisiti in laboratorio.

Sono state interpolate separatamente la zona di plateau e di discesa del **Grafico 3**, ottenendo come risultati:

$$A_{\text{plateau}} = 10.1 \pm 0.1$$

$$q = 4.0 \pm 0.6$$

$$m = -0.6 \pm 0.1$$

La closed-loop bandwidth, f_b , del circuito, è stata ricavata trasformando il grafico come $y' = \log_{10}(y)$, interpolando la parte costante, traslandola di 3dB ($\log_{10}(\sqrt{2})$) verso il basso e intersecandola con la retta ottenuta interpolando la parte di discesa. La f_b era poi l'esponentiale in base 10 dell'intersezione. L'errore è stato poi calcolato effettuando una propagazione degli errori sulla f_b , tenendo conto anche dell'alta correlazione tra i coefficienti della retta (-0.9995).

$$f_b = 215 \pm 7 \text{ kHz}$$

Il GBP è

$$\text{GBP} = A_{\text{CL}} \cdot f_b = 2.17 \pm 0.08 \text{ MHz}$$

III.II Amplificatore con $A=5$

Le resistenze inserite sono state sostituite con:

$$R_{1,\text{up}} = 5.54 \pm 0.03 \text{ k}\Omega$$

$$R_{1,\text{down}} = 5.54 \pm 0.03 \text{ k}\Omega$$

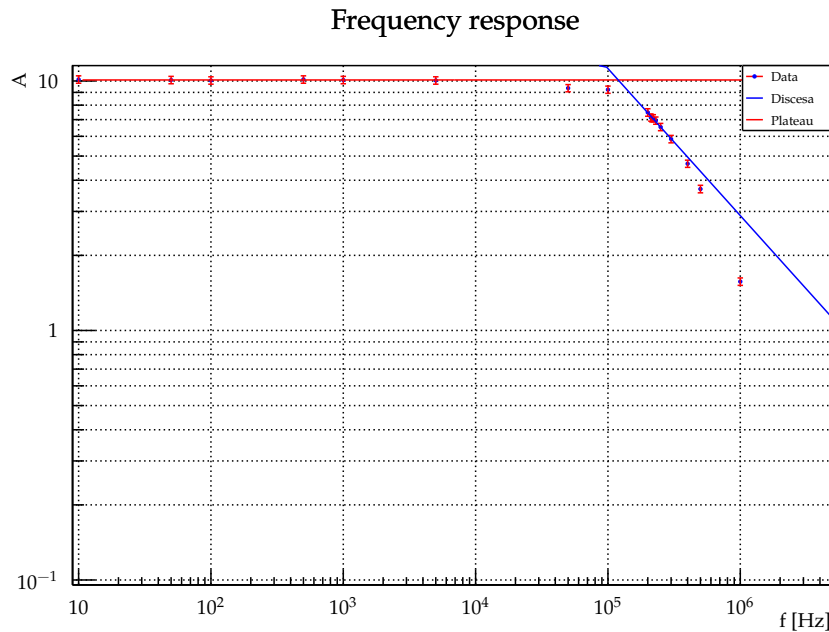
$$R_{2,\text{up}} = 26.9 \pm 0.1 \text{ k}\Omega$$

$$R_{2,\text{down}} = 26.9 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 56.0 \pm 0.3 \Omega$$

L'amplificazione teorica è perciò

$A_{\text{teorica}} = 4.86 \pm 0.03$ In seguito è presentato il grafico della risposta in frequenza di un amplificatore non invertente con $A=5$. In seguito sono presentati i dati del **Grafico 4** acquisiti in laboratorio.

Grafico 3 Risposta in frequenza di un amplificatore non invertente con $A=10$ 

Sono state interpolate separatamente la zona di plateau e di discesa del **Grafico 4**, ottenendo come risultati:

$$A_{\text{plateau}} = 4.88 \pm 0.06$$

$$q = 3.7 \pm 0.7$$

$$m = -0.5 \pm 0.1$$

Dall'interpolazione si è poi ricavato $f_b = 520 \pm 20 \text{ kHz}$

Il GBP è

$$\text{GBP} = A_{\text{CL}} \cdot f_b = 2.5 \pm 0.1 \text{ MHz}$$

III.III Amplificatore con $A=1$

Le resistenze inserite sono state sostituite con:

$$R_{1,\text{up}} = 32.6 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_{1,\text{down}} = 32.6 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_{2,\text{up}} = 32.7 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_{2,\text{down}} = 32.5 \pm 0.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 56.0 \pm 0.3 \Omega$$

L'amplificazione teorica è perciò

$A_{\text{teorica}} = 1.000 \pm 0.005$ In seguito è presentato il grafico della risposta in frequenza dell'amplificatore non invertente con $A=1$.

In seguito sono presentati i dati del **Grafico 5** acquisiti in laboratorio: Sono state interpolate separatamente la zona di plateau e di discesa del **Grafico 5**, ottenendo come risultati:

$$A_{\text{plateau}} = 1.01 \pm 0.01$$

$$q = 12.6 \pm 0.4$$

$$m = -2.11 \pm 0.06$$

Dall'interpolazione si è poi ricavato $f_b = 1.12 \pm 0.01 \text{ MHz}$

Il GBP è

$$\text{GBP} = A_{\text{CL}} \cdot f_b = 1.13 \pm 0.02 \text{ MHz}$$

III.IV Discussione dei punti precedenti

Tabella 3: *Dati risposta in frequenza*

f(Hz)	A
10	10.1±0.3
50	10.1±0.3
100	10.1±0.3
500	10.1±0.3
1000	10.1±0.3
5000	10.1±0.3
50000	9.4±0.3
100000	9.2±0.3
200000	7.5±0.3
211000	7.1±0.2
215000	7.1±0.2
220000	7.1±0.2
230000	6.9±0.2
250000	6.5±0.2
300000	5.9±0.2
400000	4.7±0.2
500000	3.69±0.1
1000000	1.57±0.05
5000000	0.110±0.003

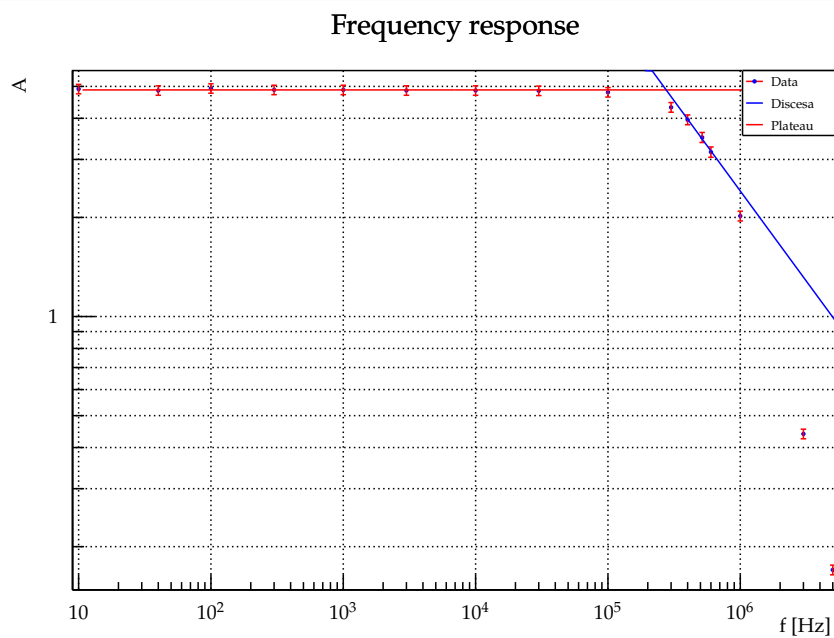
Grafico 4 Risposta in frequenza di un amplificatore non invertente con $A=5$ 

Tabella 4: *Dati risposta in frequenza*

f(Hz)	A
10	4.9 ± 0.2
40	4.9 ± 0.2
100	4.9 ± 0.2
300	4.9 ± 0.2
1000	4.9 ± 0.2
3000	4.9 ± 0.2
10000	4.9 ± 0.2
30000	4.9 ± 0.2
100000	4.8 ± 0.2
300000	4.3 ± 0.1
400000	4.0 ± 0.1
515000	3.5 ± 0.1
600000	3.2 ± 0.1
1000000	2.02 ± 0.07
3000000	0.44 ± 0.01
5000000	0.170 ± 0.006

Grafico 5 Risposta in frequenza di un amplificatore non invertente con $A=1$

Frequency response

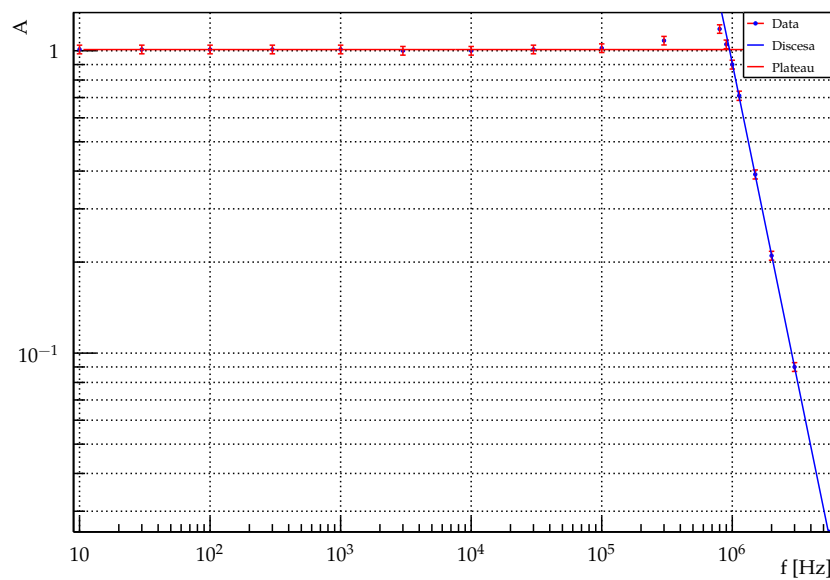
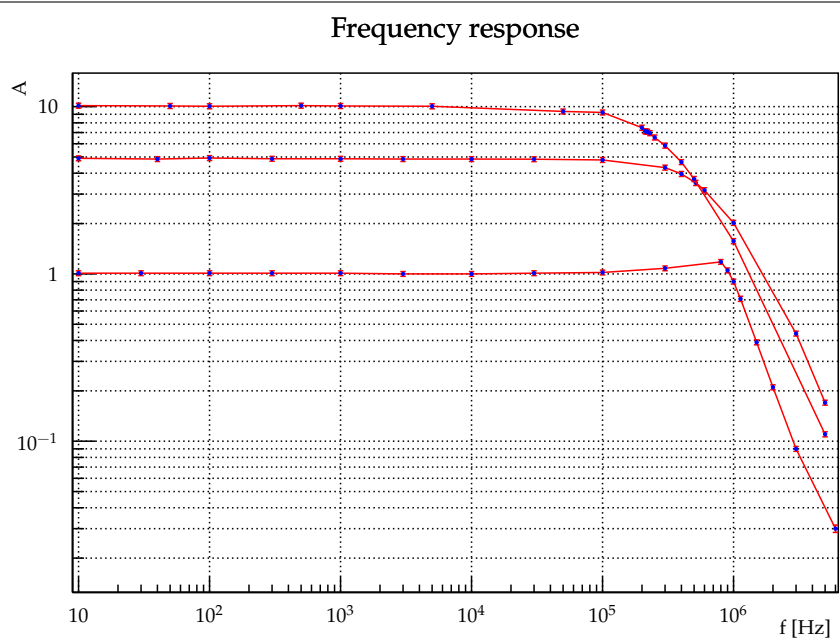


Tabella 5: *Dati risposta in frequenza*

f(Hz)	A
10	1.01 ± 0.03
30	1.01 ± 0.03
100	1.01 ± 0.03
300	1.01 ± 0.03
1000	1.01 ± 0.03
3000	1.00 ± 0.03
10000	1.00 ± 0.03
30000	1.01 ± 0.03
100000	1.02 ± 0.03
300000	1.08 ± 0.04
800000	1.18 ± 0.04
900000	1.05 ± 0.03
1000000	0.90 ± 0.03
1130000	0.71 ± 0.02
1500000	0.39 ± 0.01
2000000	0.210 ± 0.007
3000000	0.090 ± 0.003
6000000	0.030 ± 0.001

Grafico 6 Risposta in frequenza di un amplificatore non invertente a varie amplificazioni



IV. ANALISI DEI DATI

V. APPENDICE: CALCOLO DEGLI ERRORI

da cambiare

VI. CONCLUSIONI

da cambiare

VII. CODICE

È presentata qua la parte fondamentale del codice in c++ usato per i calcoli numerici. Inoltre è stato usato per i calcoli Mathematica.

```
1  /*
2   * OpampAnalisys.cpp
3   *
4   * Created on: 01/mag/2016
5   * Author: enrico
6   */
7
8  #include "OpampAnalisys.h"
9  #include "Graph.h"
10
11 #include <TR00T.h>
12 #include <TGraph.h>
13 #include <TGraphErrors.h>
14 #include <TF1.h>
15 #include <TCanvas.h>
16 #include <TAxis.h>
17 #include <TFitResult.h>
18 #include <TFrame.h>
19 #include <TLegend.h>
20
21 #include <iostream>
22
23 using namespace std;
24
25 string OpampAnalisys::basename = "";
26
27 unique_ptr<Graph> readGraph(string);
28
29 OpampAnalisys::OpampAnalisys(string filename)
30 : filename(filename)
31 {
32     string name = basename + filename + ".txt";
33     unique_ptr<Graph> gr = readGraph(name);
34
35     cout << gr->n() << endl;
36     g = unique_ptr<TGraphErrors>(new TGraphErrors(gr->n(), gr->x(),
37         gr->y(), gr->ex(), gr->ey()));
38 }
39
40 OpampAnalisys::~OpampAnalisys()
41 {
42     // TODO Auto-generated destructor stub
43 }
44
45 void OpampAnalisys::analisys()
46 {
```

```

46 TCanvas c("Interpolazione Opamp");
47 c.SetGrid();
48
49 g->SetFillColor(1);
50 g->SetLineColor(2);
51 g->SetLineWidth(1);
52 g->SetMarkerColor(4);
53 g->SetMarkerSize(0.7F);
54 g->SetMarkerStyle(1);
55 g->SetTitle("Gain");
56 g->GetXaxis()->SetTitle("V_{out} [V]");
57 g->GetYaxis()->SetTitle("V_{in} [V]");
58 g->Draw("AP");
59
60 TF1* f = new TF1("fit", "[0]+[1]*x");
61 f->SetParName(1, "m");
62 f->SetParName(0, "q");
63 f->SetLineColor(4);
64 f->SetLineWidth(1);
65
66 TFitResultPtr r = g->Fit(f, "S", "", -1.5, 1.5);
67 r->Print("V");
68 for (unsigned int i = 0; i < r->NPar(); ++i)
69 {
70     clog << r->ParName(i)
71         << " " << r->Parameter(i)
72         << " " << r->ParError(i) << endl;
73 }
74
75 TLegend *leg = new TLegend(0.8, 0.8, 0.9, 0.9);
76 leg->AddEntry(g.get(), "Data", "lp");
77 leg->AddEntry(f, "Fit", "l");
78 leg->Draw();
79
80 c.Update();
81 c.GetFrame()->SetFillColor(0);
82 c.GetFrame()->SetBorderSize(12);
83 c.Modified();
84
85 string name = "Result" + filename + ".tex";
86 c.Print(name.c_str());
87 }

```

../src/opamp_p1/OpampAnalysis.cpp