

# 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

<b>I Schema Circuiti</b>	<b>2</b>
<b>II Parte I</b>	<b>4</b>
I Amplificatore invertente . . . . .	4
I.1 Calcolo amplificazione . . . . .	4
I.2 Analisi . . . . .	4
II Amplificatore non invertente . . . . .	5
II.1 Calcolo amplificazione . . . . .	6
II.2 Analisi . . . . .	7
<b>III Parte II</b>	<b>8</b>
I Amplificatore con $A=10$ . . . . .	8
II Amplificatore con $A=5$ . . . . .	9
III Amplificatore con $A=1$ . . . . .	10
IV Discussione dei punti precedenti . . . . .	10
<b>IV Discussioni e conclusioni</b>	<b>17</b>
<b>V Codice</b>	<b>20</b>

## I. SCHEMA CIRCUITI

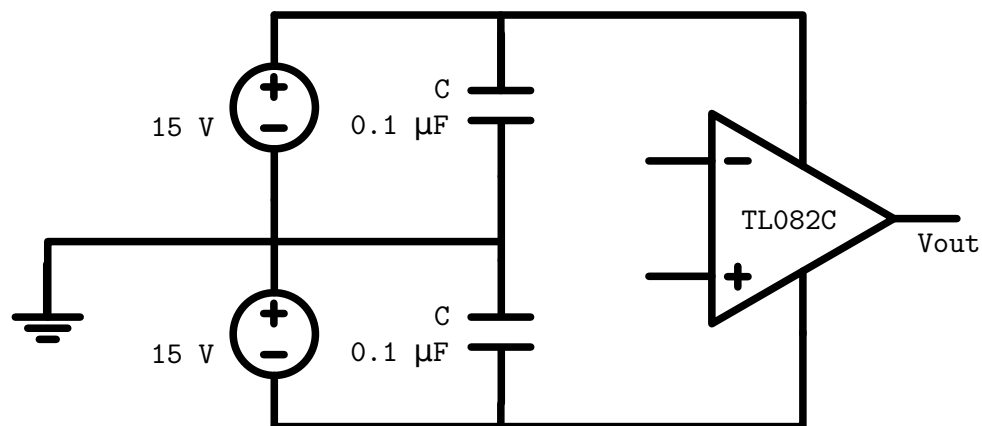


Figura 1: Alimentazione OpAmp

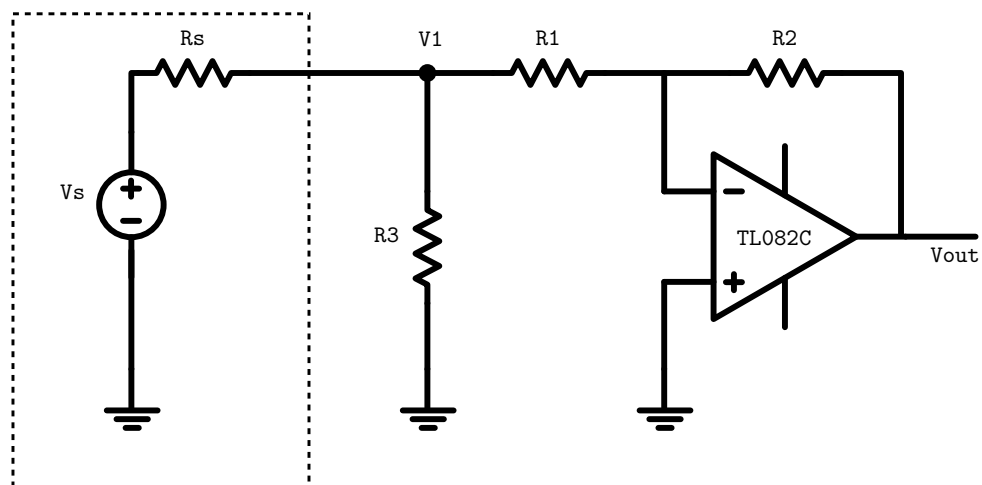


Figura 2: Amplificazione configurazione invertente

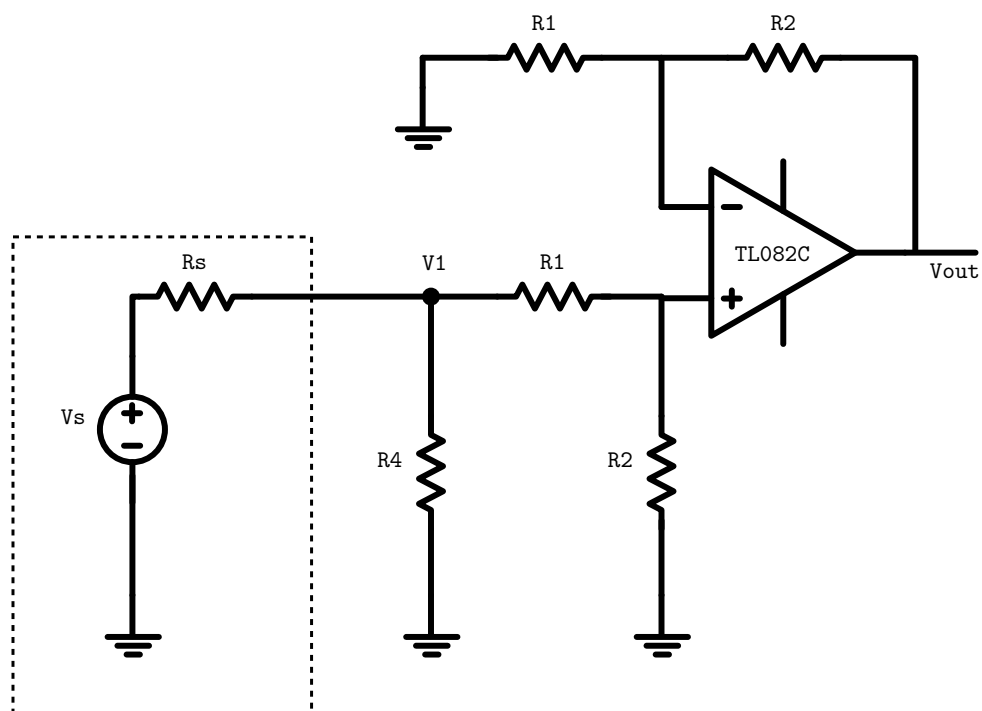


Figura 3: Amplificazione configurazione non invertente

## 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  $\sigma_{\text{tot}}$  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:

$$\frac{V_1 - V_n}{R_1} = \frac{V_n - V_0}{R_2}$$

$$V_n = 0$$

$$\frac{V_1}{R_1} = \frac{-V_0}{R_2}$$

$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_1$$

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

#### I.2 Analisi

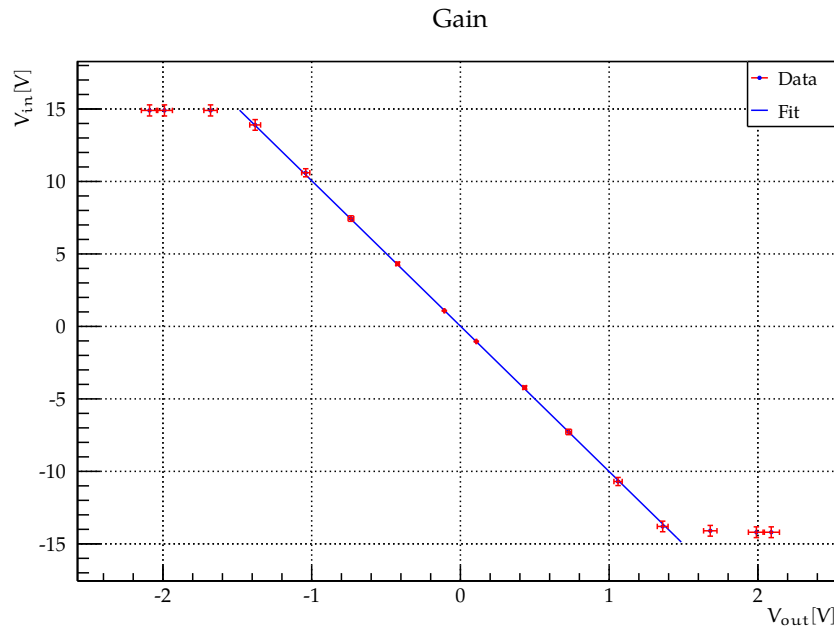
La stima di A teorica, a partire dalle resistenze misurate è:

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

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:

**Grafico 1** Curva di trasferimento di un amplificatore invertente

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

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

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  $A = 10 \frac{\text{V}}{\text{V}}$

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

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

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

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

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

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

## 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:

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

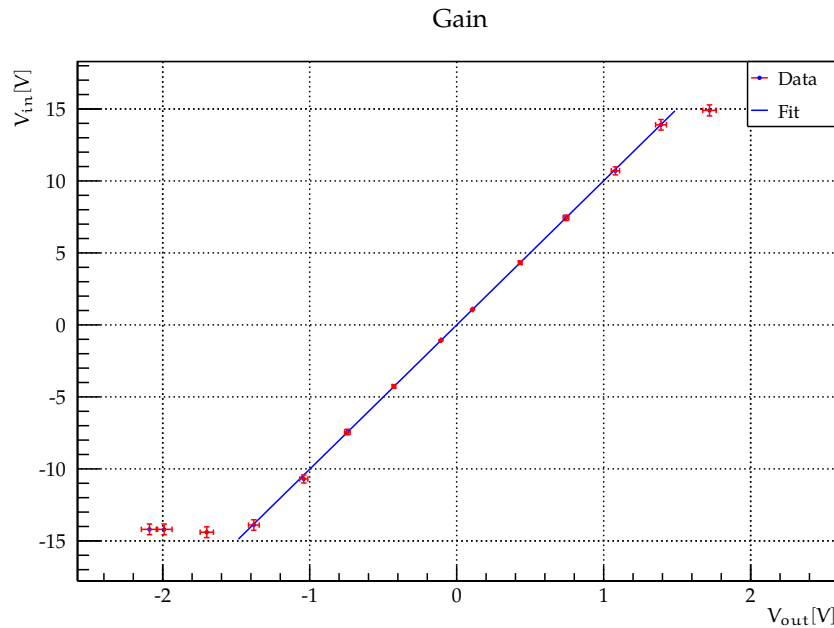
$$\frac{V_0}{R_{2up}} = \frac{V_n}{R_{1up}} + \frac{V_n}{R_{2up}} = V_n \left( \frac{1}{R_{1up}} + \frac{1}{R_{2up}} \right)$$

Poichè

$$V_p = V_n$$

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

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

**Grafico 2** Curva di trasferimento di un amplificatore invertente

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

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

## II.2 Analisi

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

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

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 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.

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

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

**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)
$1.08 \pm 0.03$	$-1.04 \pm 0.03$	0.3	$10.7 \pm 0.3$	$-10.7 \pm 0.3$	3
$0.108 \pm 0.003$	$-0.107 \pm 0.003$	0.03	$1.07 \pm 0.003$	$-1.07 \pm 0.003$	0.3
$0.43 \pm 0.01$	$-0.43 \pm 0.01$	0.120	$4.3 \pm 0.1$	$-4.3 \pm 0.1$	1.2
$0.74 \pm 0.02$	$-0.74 \pm 0.02$	0.2	$7.4 \pm 0.2$	$-7.4 \pm 0.2$	2
$1.39 \pm 0.04$	$-1.38 \pm 0.04$	0.4	$13.9 \pm 0.4$	$-13.9 \pm 0.4$	4
$1.72 \pm 0.05$	$-1.70 \pm 0.05$	0.5	$14.9 \pm 0.4$	$-14.4 \pm 0.4$	4
$2.04 \pm 0.05$	$-1.99 \pm 0.05$	0.6	$14.7 \pm 0.4$	$-14.2 \pm 0.4$	4
$2.14 \pm 0.06$	$-2.09 \pm 0.06$	0.6	$14.9 \pm 0.4$	$-14.2 \pm 0.4$	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.1 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:

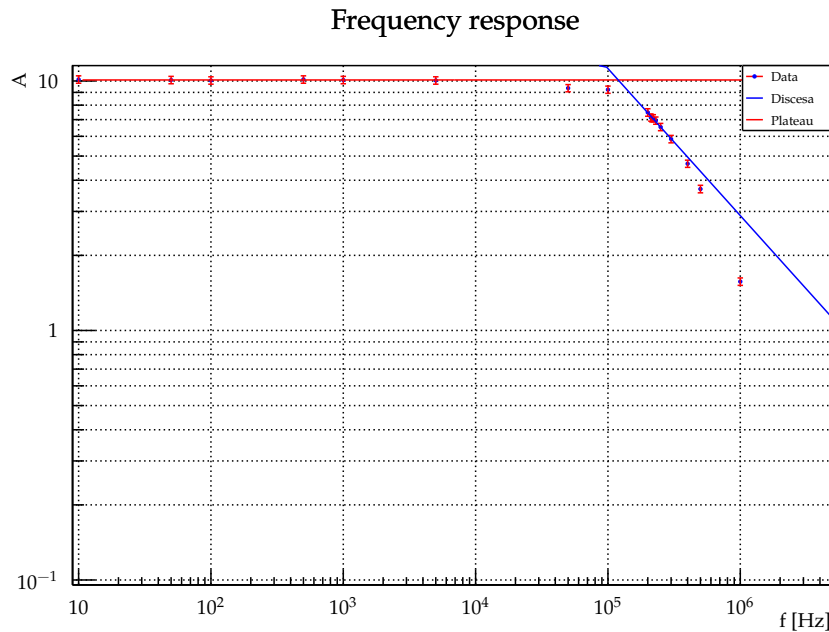
$$A_{\text{plateau}} = 10.1 \pm 0.1$$

$$q = 4.0 \pm 0.6$$

$$m = -0.6 \pm 0.1$$

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



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

$(-0.9995)$ .

$f_b = 215 \pm 7$  kHz

Il GBP è

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

### III.II Amplificatore con $A=5$

Le resistenze inserite sono state sostituite con:

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

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

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

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

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

L'amplificazione teorica è perciò

$A_{teorica} = 4.86 \pm 0.03$  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.

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

$A_{plateau} = 4.88 \pm 0.06$

$q = 3.7 \pm 0.7$

$m = -0.5 \pm 0.1$

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:

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

$$q = 12.6 \pm 0.4$$

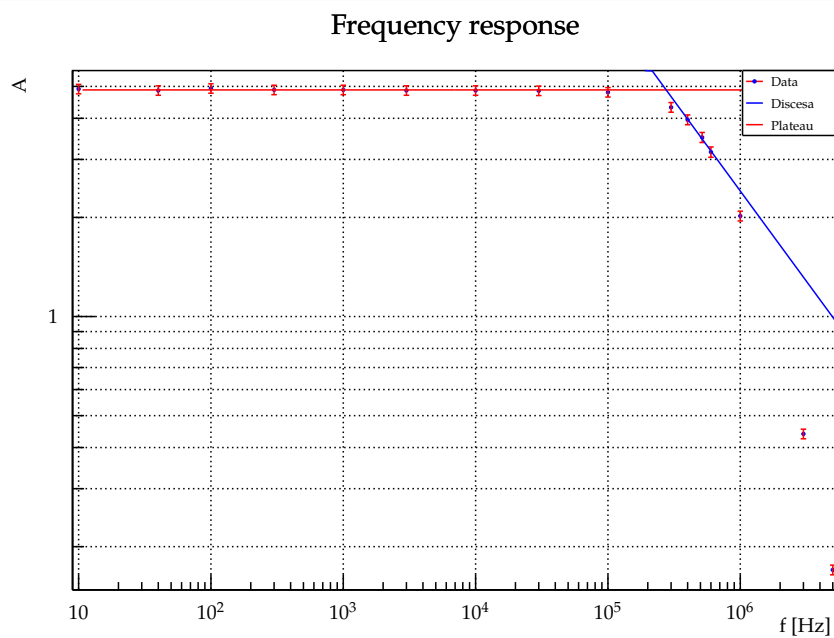
$$m = -2.11 \pm 0.06$$

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

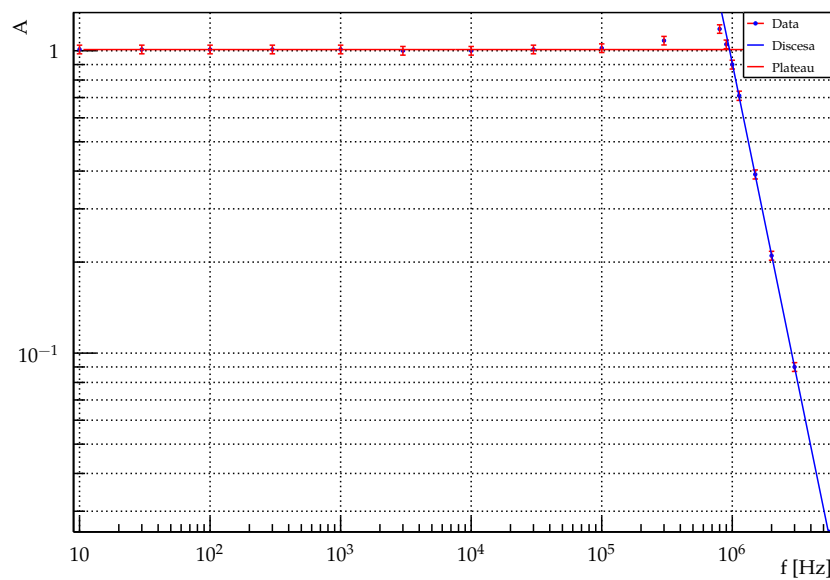
**Grafico 4** Risposta in frequenza di un amplificatore non invertente con  $A=5$ 

**Tabella 4:** *Dati risposta in frequenza*

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

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

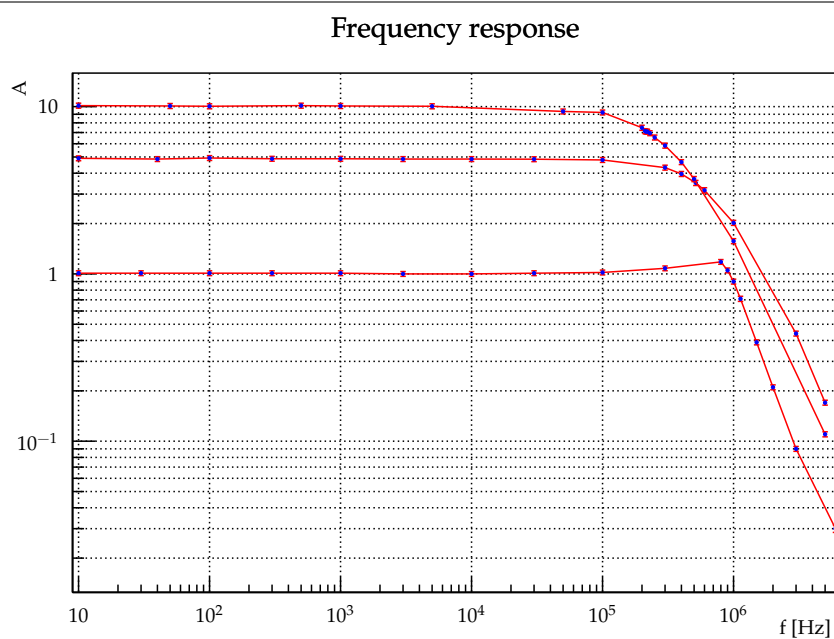
Frequency response



**Tabella 5:** *Dati risposta in frequenza*

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

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



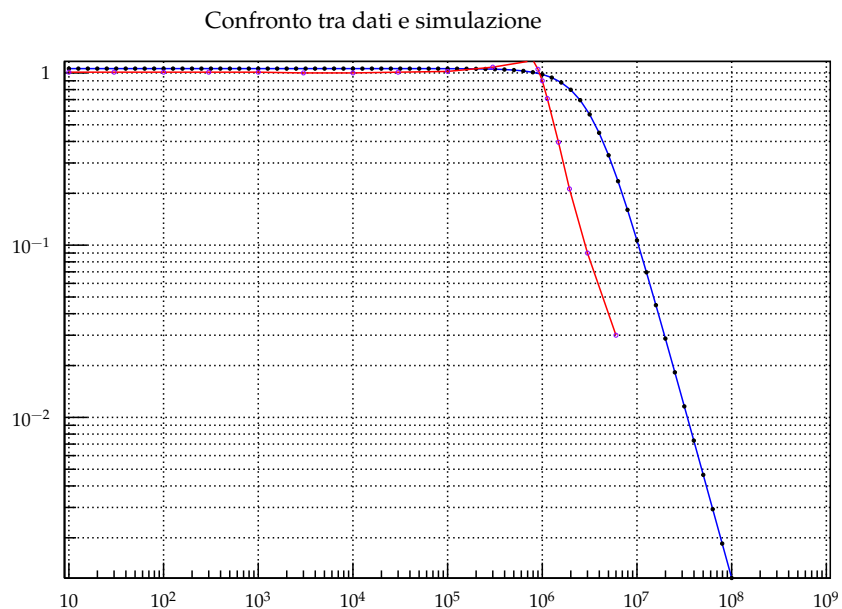


## IV. DISCUSSIONI E CONCLUSIONI

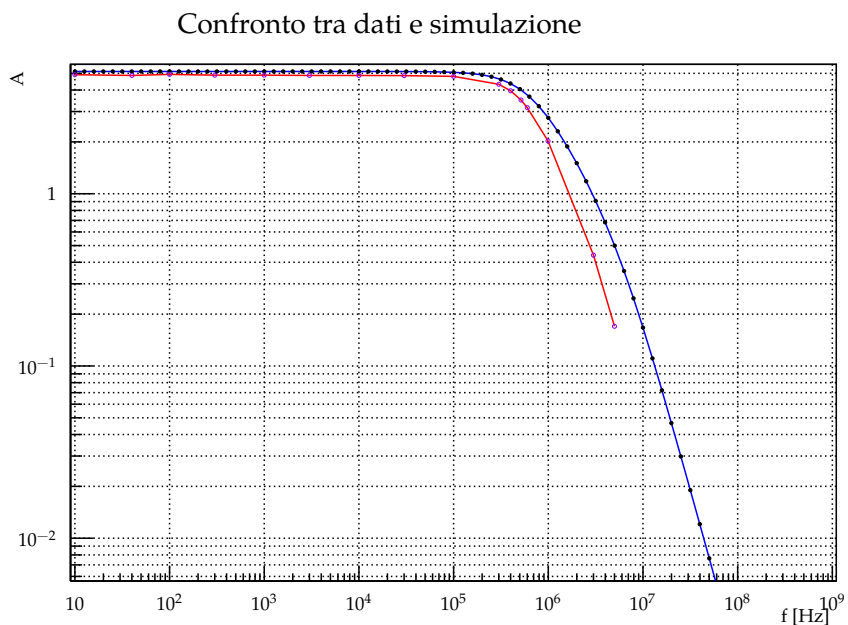
E' stata fatta la simulazione per la risposta in frequenza utilizzando Spice, con l'accortezza di scaricare la libreria del componente dal sito della Texas Instrument. I **Grafico 8** e **Grafico 9** mostrano il confronto della simulazione con i dati sperimentali e mostrano un buon accordo tra i dati e la simulazione. Nel **Grafico 7**, relativo all'amplificazione  $A=1$ , si nota una deviazione dei dati sperimentali dovuta alla risonanza, causata dalle induttanze parassite nel circuito reale, che comportano lo spostamento verso le basse frequenze del polo.

Queste differenze si ripercuotono sul Gain-Bandwidth Product. Infatti è più basso di quello previsto nel datasheet fornito dal produttore ( $3 \cdot 10^6$ ), differenza visibile soprattutto con amplificazione  $A=1$ . Leggendo il datasheet della Texas Instrument è emerso che una possibile giustificazione a questa discrepanza è che non sono state seguite alcune linee guida indicate. Non sono stati posti, ad esempio, i condensatori vicino all'amplificatore operazionale, accorgimento che avrebbe ridotto l'induttanza del circuito di alimentazione ad alte frequenze. Inoltre l'uso di una breadboard ha introdotto numerose capacità e induttanze parassite, che hanno interferito nella delicata misura di  $f_b$ .

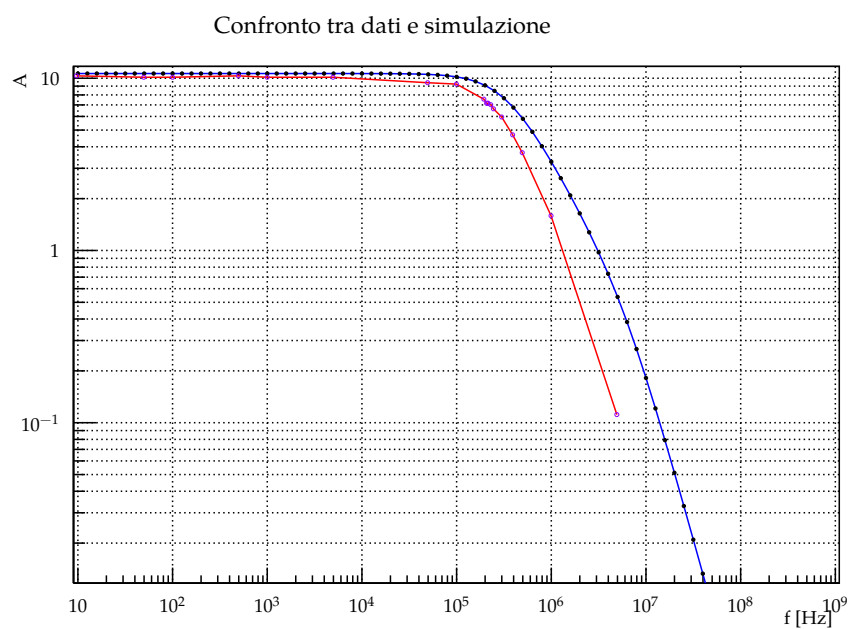
**Grafico 7** Risposta in frequenza con Spice confrontata coi dati sperimentali (A=1)



**Grafico 8** Risposta in frequenza con Spice confrontata coi dati sperimentali (A=5)



**Grafico 9** Risposta in frequenza con Spice confrontata coi dati sperimentali (A=10)



## V. 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